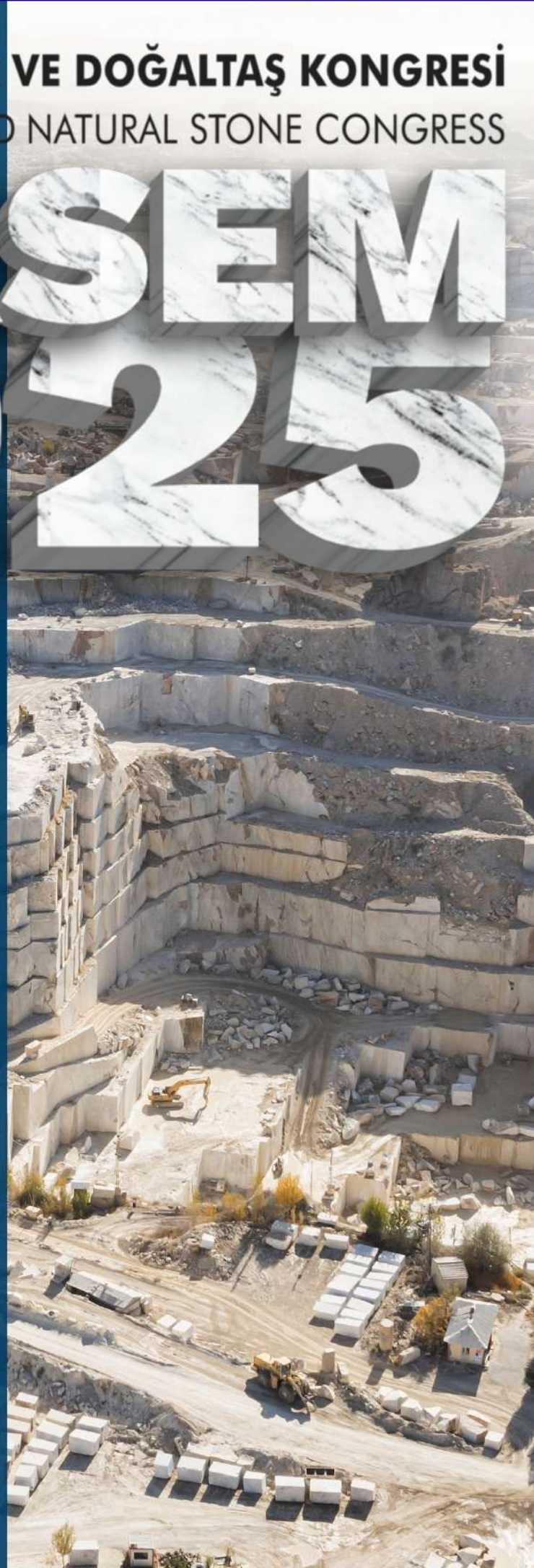


12. ULUSLARARASI MERMER VE DOĞALTAŞ KONGRESİ
12TH INTERNATIONAL MARBLE AND NATURAL STONE CONGRESS

MERSEM 2025

23-25 EKİM/OCTOBER
AFYONKARAHİSAR - TÜRKİYE



12. ULUSLARARASI MERMER VE DOĞALTAŞ KONGRESİ

12. INTERNATIONAL MARBLE AND NATURAL STONE CONGRESS

23-25 Ekim 2025
(23-25 October 2025)
AFYONKARAHİSAR

BİLDİRİLER KİTABI PROCEEDING BOOKS

EDİTÖRLER (Editors):

Prof. Dr. İ. Sedat BÜYÜKSAĞIŞ
Prof. Dr. İrfan Celal ENGİN
Dr. Mustafa GÜRSOY
Dr. Oğuzhan ÖZ
Arş. Gör. Sami Serkan İŞOĞLU

Editör (Editor)
Editör Yardımcısı (Assistant Editor)
Editör Yardımcısı (Assistant Editor)
Editör Yardımcısı (Assistant Editor)
Editör Yardımcısı (Assistant Editor)

ÖNSÖZ

Türkiye, Dünyanın en genç tektonik kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya Kuşağı içerisinde yer almakta olup yaklaşık 7,8 milyar m³ doğaltaş kaynağına sahip olduğu tahmin edilmektedir. Bu rakam dünya toplam doğaltaş rezervinin tahminen yaklaşık %35'ine karşılık gelmekte olup Türkiye'yi doğaltaş üretimi ve ihracatında dünya üzerinde üst sıralara taşımaktadır. Türk doğaltaş sektörünün en önemli avantajları arasında; doğaltaş kaynaklarının çeşitliliği, muhtemel rezerv zenginliği, teknoloji kullanımı ve renk çeşitliliği bakımından dünya üzerinde önemli bir konuma sahiptir. Bunlarla birlikte, Türkiye'nin jeopolitik konumuna bağlı olarak farklı ulaşım rotaları ve görece ucuz lojistik maliyetlerine sahiptir. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre Türkiye'de yaklaşık 2241 işletme izinli doğaltaş sahası bulunmaktadır. Bunların yaklaşık olarak 1500 kadarı aktif olarak çalışmakta, geri kalanı ise pasif durumdadır. Doğaltaş sahalarından çıkan mermerlerin işlendiği yaklaşık 2000 adet fabrika, 9000 adet küçük ve orta ölçekli atölye bulunmakta olup bu işletmeler yaklaşık 300.000 kişiye istihdam sağlamaktadır. 1990'lı yıllarda yaklaşık 40 milyon US\$ seviyesinde olan doğaltaş ihracat rakamı, 2000'li yılların başında 1 milyar US\$ seviyesine ulaşmıştır. 2024 yılına gelindiğinde ise yaklaşık 2 milyar dolar seviyesine ulaşan ihracat rakamı Türkiye ekonomisine büyük katma değer sağlamaktadır. Günümüzde Türk doğaltaş sektörü 2019 Covid pandemisi sebebiyle birkaç yıl durağan seyretnmiş ancak pandemi etkilerinin ortadan kalkması ve dünya genelindeki rekabetin artmasına rağmen gelişmeye devam etmektedir. Doğaltaş sektörünün gelişmesine paralel olarak çeşitli sorunlar da bulunmaktadır. Bunlar; eğitim, yönetim ve organizasyon yapısındaki eksiklikler, standardizasyon, pazarlama alanındaki eksiklikler, teknolojik gelişme, üretim yöntemlerinin yenilenmesi, yüksek enerji maliyetleri, bürokraside yaşanan aksamalar temel sorunlardır. Doğal kaynağımızın yüksek verimle üretilmesi ve ihraç edilebilmesi için devletin vermiş olduğu teşviklerin yanında, sektördeki tüm paydaşların, kamu kurum ve kuruluşların üst düzeyde örgütlenmesi ve ortak hareket etmesi büyük öneme sahiptir. Sürdürülebilir ve çevre duyarlılığı açısından rekabet anlayışının benimsenmesi hem üretim anında çevrenin korunmasına hem de mermer ocaklarındaki verimin en üst düzeye taşınmasına destek olacaktır.

Afyonkarahisar ilimizin önemli markalarından biri olan MERSEM (Mermer Sempozyumu) ilk olarak 6-7 Nisan 1995 tarihinde gerçekleşmiş olup sonrasında her iki yılda bir düzenlenerek geleneksel bir hal almıştır. 2010 yılından itibaren uluslararası düzeye ulaşmış ve kongreye dönüşmüş olup 11.'si en son 2021 yılında Diyarbakır'da düzenlenmiştir. 23-25 Ekim 2025 tarihleri arasında Afyonkarahisar ilimizde düzenlenen MERSEM'2025 12. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi, doğaltaş sektörünün bilimsel, teknik, ekonomik ve çevresel açıdan incelemeyi, sektörün mevcut durumunu ve geleceğe yönelik vizyon ve çözümleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bunun yanında dünyanın farklı ülke ve bölgelerinden araştırmacıları, sanayicileri, kamu kurum ve kuruluş temsilcilerini, sektör paydaşlarını, ülkemizdeki araştırmacıları aynı platformda bir araya getirerek tüm paydaşlar arasındaki iş birliğini güçlendirmeyi ve üniversite-sanayi iş birliğini geliştirmeyi hedeflemektedir. Dünya ve Türkiye'deki üniversitelerden, kamu ve özel sektörden gelen çok sayıda araştırmacı, yönetici ve seçkin bilim insanlarının çağrılı bildirilerle katılması kongreye özgün bilimsel katkı sağlamaktadır. MERSEM'2025 Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ) ve TMMOB Maden Mühendisleri Odası iş birliği gerçekleştirilmek olup Kongrenin düzenlenmesine katkı sağlayan başta Afyon Kocatepe Üniversitesi Rektörü Sayın Prof. Dr. Mehmet KARAKAŞ'a, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Başkanı Ayhan YÜKSEL'e kongre yürütme kurulunda yer alan öğretim üyeleri, kamu ve özel sektörü paydaşlarına, sekreteryaya kısmını yürüten öğretim elemanlarına, bildirilerin akademik olarak değerlendirilme sürecini yöneten değerli Bilim Kurulu üyelerine, Danışma Kurulu üyelerine, bildirileri ile katkı sunan kıymetli bilim insanlarına ve sektör temsilcilerine; ek olarak destekleri ile kongremizin gerçekleşmesine katkı sunan Afyonkarahisar Valiliği, Afyonkarahisar Belediye Başkanlığı, ATSO (Afyonkarahisar Ticaret ve Sanayi Odası), İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB), Ege İhracatçı Birlikleri (EMİB), TÜMMER (Türkiye Mermer Doğaltaş ve Makinaları Üreticileri Birliği) ve tüm sponsor kurum ve kuruluşlara teşekkür ederiz.

Kongremizin ülkemiz doğaltaş sektörüne ve bilim dünyasına katkı sağlamasını diler, tüm katılımcılara başarılı ve verimli bir kongre geçirmelerini temenni ederiz.

Prof. Dr. İ. Sedat BÜYÜKSAĞIŞ
Yürütme Kurulu Başkanı

Ayhan YÜKSEL
TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu
Başkanı

FOREWORD

Türkiye is located within the Alpine-Himalayan Belt, one of the youngest tectonic zones in the world, and is estimated to possess approximately 7.8 billion cubic meters of natural stone resources. This figure accounts for approximately 35% of the world's total natural stone reserves, positioning Turkey among the leading countries in global natural stone production and export. Among the major advantages of the Turkish natural stone industry are the diversity of its stone resources, the abundance of potential reserves, the use of advanced technologies, and its wide range of colors, all of which contribute to its significant position in the global market. Furthermore, Turkey's strategic geopolitical position provides access to multiple transportation corridors and ensures comparatively cost-effective logistics. According to data from the General Directorate of Mining and Petroleum Affairs (MAPEG), there are approximately 2,241 licensed natural stone quarry sites in Türkiye. Approximately 1,500 of these sites are currently active, while the remainder are inactive or temporarily closed. There are approximately 2,000 factories and 9,000 small- and medium-sized workshops processing the marble extracted from natural stone quarries, collectively providing employment to around 300,000 people. In the 1990s, Turkey's natural stone exports amounted to approximately 40 million US dollars, rising sharply to about 1 billion US dollars by the beginning of the 2000s. By 2024, Turkey's export volume, which has reached approximately 2 billion dollars, makes a substantial contribution to the national economy. Currently, the Turkish natural stone sector—after undergoing several years of stagnation as a result of the 2019 COVID-19 pandemic—has resumed its growth trajectory, even in the face of rising global competition and the gradual disappearance of pandemic-related impacts. Alongside the growth of the natural stone sector, a range of problems persist. These primarily relate to inadequacies in education, management and organizational systems, standardization, marketing strategies, technological progress, modernization of production techniques, rising energy expenses, and delays in bureaucratic procedures. For the high-efficiency production and successful export of the country's natural resources, not only governmental incentives but also the strong coordination and collective efforts of all sectoral stakeholders and public institutions are essential. Adopting a competitive approach grounded in sustainability and environmental awareness will contribute both to the protection of the environment during production and to maximizing efficiency in marble quarries. As one of the distinguished brands representing Afyonkarahisar, MERSEM (Marble Symposium) was inaugurated on April 6–7, 1995, and has been organized every two years thereafter, gaining a traditional status. Since 2010, it has reached an international level and transformed into a congress, with its 11th edition most recently held in Diyarbakır in 2021. 12th International Marble and Natural Stone Congress (MERSEM'2025), held in Afyonkarahisar between October 23–25, 2025, aims to examine the natural stone industry from scientific, technical, economic, and environmental perspectives, while fostering insights and solutions for its current state and future vision. In addition, it aims to bring together researchers, industrial representatives, public institutions, sectoral stakeholders, and academics from various countries and regions around the world on a common platform to strengthen collaboration among all stakeholders and promote university–industry cooperation. By hosting invited presentations from many researchers, managers, and eminent academics from universities worldwide and from both the public and private sectors, the congress gains distinctive scientific value and originality. MERSEM'2025 was organized through a collaboration between Afyon Kocatepe University (AKÜ) and the Chamber of Mining Engineers of TMMOB. We extend our sincere gratitude to Prof. Dr. Mehmet KARAKAŞ, Rector of Afyon Kocatepe University, and Ayhan YÜKSEL, President of the Chamber of Mining Engineers of TMMOB, as well as to the faculty members serving on the organizing committee, stakeholders from the public and private sectors, and the academic staff managing the secretariat. We also wish to thank the esteemed members of the Scientific Committee for overseeing the academic review process, the Advisory Board members, and the distinguished scientists and industry representatives who contributed through their presentations. Furthermore, we acknowledge the support of Afyonkarahisar Governorship, Afyonkarahisar Municipality, Afyonkarahisar Chamber of Commerce and Industry (ATSO), Istanbul Minerals Exporters' Association (İMİB), Aegean Exporters' Associations (EMİB), TÜMMER (Turkey Marble, Natural Stone and Machinery Producers' Association), and all sponsor institutions and organizations, whose contributions were instrumental in the successful realization of the congress. We hope that our congress will make a significant contribution to the natural stone sector in Turkey and the scientific community, and we wish all participants a successful and productive event.

Prof. Dr. İ. Sedat BÜYÜKSAĞIŞ
Chairman of the Congress Executive Committee

Ayhan YÜKSEL
TMMOB The Chamber of Mining Engineers of Turkey
President

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI YÖNETİM KURULU

Executive Board of the Chamber of Mining Engineers of TMMOB

Ayhan Yüksel	Yönetim Kurulu Başkanı
Bülent TOKA	II. Başkan
Veyis SIR	Yazman
Mehmet ZAMAN	Sayman
Pelin KERTMEN	Üye
Alper ENTOK	Üye
Fatih TÜTÜNCÜ	Üye

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI AFYON İL TEMSİLCİLİĞİ

*Afyon Provincial Representation of the Chamber of Mining Engineers,
Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects (TMMOB)*

Deniz YILDIRIM	İl Temsilcisi

ONUR KURULU

Honorary Board

Doç. Dr. Kübra GÜRAN YİĞİTBAŞI	Afyonkarahisar Valisi
Burcu KÖKSAL	Afyonkarahisar Belediye Başkanı
Prof. Dr. Mehmet KARAKAŞ	Afyon Kocatepe Üniversitesi Rektörü
Ayhan YÜKSEL	TMMOB Maden Mühendisleri Odası Başkanı
Prof. Dr. Seyfi KULAKSIZ	TMMOB Maden Mühendisleri Odası

YÜRÜTME KURULU

Executive Board

Prof. Dr. İ. Sedat BÜYÜKSAĞIŞ	Başkan
Prof. Dr. İrfan C. ENGİN	Başkan Yardımcısı
Prof. Dr. Ahmet YILDIZ	Üye
Prof. Dr. Ş. Ebru OKUYUCU	Üye

Prof. Dr. M. Yavuz ÇELİK	Üye
Prof. Dr. Ahmet BAYTOK	Üye
Doç. Dr. Metin ERSOY	Üye
Doç. Dr. Fatih BAYRAM	Üye
Doç. Dr. Erkan ÖZKAN	Üye
Doç. Dr. A. Ekren ARITAN	Üye
Doç. Dr. Metin BAĞCI	Üye
Dr. Öğr. Üyesi Feyzullah Ekrem ÇONKAR	Üye
Öğr. Gör. Dr. Oğuzhan ÖZ	Sekreteryä
Arş. Gör. Dr. Mustafa GÜRSOY	Sekreteryä
Arş. Gör. Sami Serkan İŞOĞLU	Sekreteryä
Fatih TÜTÜNCÜ	Sayman
Deniz YILDIRIM	Üye
İbrahim ALİMOĞLU	Üye
Funda BEKİŞOĞLU	Üye
Muharrem ÇAKMAK	Üye
Dr. Mehmet Sıtkı MERDİVENCİ	Üye
Hüsnü SERTESER	Üye
Kadir SAYIN	Üye
Hanifi ŞİMŞEK	Üye
Ömer YILDIZ	Üye

BİLİM KURULU

Scientific Board

Prof. Dr. Ahmet Hamdi DELİORMANLI	Dokuz Eylül University
Prof. Dr. Ahmet YILDIZ	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. Ahmet Mahmut KILIÇ	Çukurova University
Prof. Dr. Ali SARIİŞİK	Harran University
Prof. Dr. Ali Bahadır YAVUZ	Dokuz Eylül University
Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN	İstanbul University
Prof. Dr. Atilla EVCİN	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. Atiye TUĞRUL	İstanbul University
Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER	Hacettepe University si
Prof. Dr. Bayram KAHRAMAN	Dokuz Eylül University

Prof. Dr. Cemal BALCI	İstanbul Teknik University
Prof. Dr. Deniz TUMAÇ	İstanbul Teknik University
Prof. Dr. Fuat KARA	Düzce University
Prof. Dr. Gencay SARIİŞİK	Harran University
Prof. Dr. Gökhan AYDIN	Karadeniz Teknik University
Prof. Dr. Gülşen DİŞLİ	Necmettin Erbakan University
Prof. Dr. Hakan ELÇİ	Dokuz Eylül University
Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR	İstanbul Teknik University
Prof. Dr. Hatice Derya ARSLAN	Necmettin Erbakan University
Prof. Dr. İ. Sedat BÜYÜKSAĞIŞ	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. İbrahim UĞUR	Süleyman Demirel University
Prof. Dr. İrfan C. ENGİN	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. Kaan ERARSLAN	Dumlupınar University
Prof. Dr. Kemal GÖKAY	Konya Teknik University
Prof. Dr. Kerim AYDINER	Karadeniz Teknik University
Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. M. Kemal ÖZFIRAT	Dokuz Eylül University
Prof. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK	Süleyman Demirel University
Prof. Dr. Mahmut YAVUZ	Eskişehir Osmangazi University
Prof. Dr. Mehmet KIZIL	Queensland University
Prof. Dr. Mehmet ÖZKUL	Pamukkale University
Prof. Dr. Melih İPHAR	Eskişehir Osmangazi University
Prof. Dr. Murat UYSAL	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. Murat YURDAKUL	Bilecik Şeyh Edebali University
Prof. Dr. Mustafa TOPALOĞLU	Özyeğin University
Prof. Dr. Mustafa Y. ÇELİK	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. Nazmi ŞENGÜN	Süleyman Demirel University
Prof. Dr. Ömer ELİTOK	Süleyman Demirel University
Prof. Dr. Özen KILIÇ	Çukurova University
Prof. Dr. Özgür AKKOYUN	Dicle University
Prof. Dr. Rabia Köse DOĞAN	Selçuk University
Prof. Dr. Raşit ALTINDAĞ	Süleyman Demirel University
Prof. Dr. Sair KAHRAMAN	Hacettepe University
Prof. Dr. Saffet YAĞIZ	Nazarbeyav University
Prof. Dr. Serkan SAYDAM	University of New South Wales

Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ	Süleyman Demirel University
Prof. Dr. Ş. Ebru OKUYUCU	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. Şemsettin CARAN	Süleyman Demirel University
Prof. Dr. Şuayip ÖZDEMİR	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. Tamer KORALAY	Pamukkale University
Prof. Dr. Tayfun UYGUNOĞLU	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. Tuğrul KANDEMİR	Afyon Kocatepe University
Prof. Dr. Turgay ONARGAN	Dokuz Eylül University
Prof. Dr. Ümit ATICI	Niğde Ömer Halisdemir University
Prof. Dr. Yılmaz ÖZÇELİK	Hacettepe University
Prof. Dr. Yusuf Kaan KADIOĞLU	Ankara University
Prof. Emilio TRIGUEROS	Cartagena University
Prof. Jamal ROSTAMİ	Colorado School of Mines
Prof. Marco Lezzerini	Pisa University
Prof. Michele LANZETTA	Pisa University
Prof. Mikael RINNE	Aalto University
Prof. Nicola CAREDDU	Cagliari University
Prof. Pedro AMARAL	Technical University of Lisbon
Prof. Sandro TURCHETTA	Cassino University
Prof. Wilma POLINI	Cassino University
Doç. Dr. Ali Ekrem ARITAN	Afyon Kocatepe University
Doç. Dr. Cihan DOĞRUÖZ	Çankırı Karatekin University
Doç. Dr. Erkan ÖZKAN	Afyon Kocatepe University
Doç. Dr. Fatih BAYRAM	Afyon Kocatepe University
Doç. Dr. Gültekin COŞKUN	Sivas Cumhuriyet University
Doç. Dr. İbrahim MUTLU	Kocaeli University
Doç. Dr. M. Kübra MÜEZZİNOĞLU	Fırat University
Doç. Dr. Mete KUN	Dokuz Eylül University
Doç. Dr. Metin BAĞCI	Afyon Kocatepe University
Doç. Dr. Metin ERSOY	Afyon Kocatepe University
Doç. Dr. Mustafa ERKAYAOĞLU	Ortadoğu Teknik University
Doç. Dr. Mustafa Emre YETKİN	Dokuz Eylül University
Doç. Dr. Mohammad Taghi HAMZABAN	Sahand University of Technology
Doç. Dr. Nihal Canbakal ATAÖĞLU	Karadeniz Teknik University
Doç. Dr. Nimet ÖZTANK	Emekli Öğretim Üyesi

Doç. Dr. Onur ÖZBEK	Düzce University
Doç. Dr. Selçuk DEMİRCİ	Ege University
Doç. Dr. Sevgi ÇETİNTAŞ	Akdeniz University
Doç. Dr. Taşkın Deniz YILDIZ	Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji University
Dr. Öğr. Üyesi Emre YILMAZKAYA	Hacettepe University
Dr. Carla KHATER	Lübnan Ulusal Bilimsel Araştırma Konseyi
Dr. Konstantinos N. LASKARİDİS	Hellenic Survey of Geology and Mineral Exploration (HSGME)

AKADEMİK DANIŞMA KURULU

Academic Advisory Board

Prof. Dr. Erdoğan YÜZER
Prof. Dr. Faruk ÇALAPKULU
Prof. Dr. Halil KÖSE
Prof. Dr. Mehmet ÖZKUL
Prof. Dr. Mustafa KUŞÇU
Prof. Dr. Yaşar KİBİCİ
Prof. Dr. Can AYDAY
Prof. Dr. Burhan ERDOĞAN
Prof. Dr. Osman Zeki HEKİMOĞLU
Prof. Dr. Yedigâr MÜFTÜOĞLU

SEKTÖREL DANIŞMA KURULU

Sectoral Advisory Board

Dr. Muhterem KÖSE
Adnan DEMİREL
Ahmet GÜREL
Ali EMİROĞLU
Aslan NARİN
Burak ALİMOĞLU
Celaiddin GÜREL
Ebubekir ALİMOĞLU
Erdoğan AKBULAK
Eyüp BATAL

Haşim ACAR
İbrahim YÜZER
İhya KANGAL
Jak ESKİNAZİ
Mehmet YILMAZ
Metin BALIBEY
Metin ÇEKİÇ
Metin MERCAN
Osman Cavit TURUNÇ
Osman UYSAL
Remzi ÖZCAN
Sadık CEYLAN
Suat SARISOY
Şuayip DEMİREL
Umur TEMİZER
Zafer HARMANDAL

DESTEKLEYEN KURULUŞLAR

Supporting Organizations

Afyonkarahisar Valiliği
Afyonkarahisar Belediye Başkanlığı
Afyonkarahisar Ticaret ve Sanayi Odası
Afyonkarahisar Sanayici İş İnsanları Derneği
Afyon-İscehisar Mermerciler Derneği
Afyon Boğaz Mermerciler Derneği
Ege Maden İhracatçıları Birliği
İstanbul Maden İhracatçıları Birliği
Tüm Mermer Doğaltaş ve Makinaları Üreticileri Birliği

SPONSOR KURULUŞLAR

Sponsor Organizations

Afyonkarahisar Belediye Başkanlığı
Afyonkarahisar Ticaret ve Sanayi Odası
ALİMOĞLU Madencilik San. ve Tic. A.Ş.
Denizli İhracatçılar Birliği
Ege Maden İhracatçıları Birliği

Efesus Stone-REİSOĞLU MERMER San. ve Tic. Ltd. Şti.

EMEK MERMER Sanayi Ticaret A.Ş.

GENÇLER MERMER Sanayi Ticaret A.Ş.

GÖBEKLİTEPE Uluslararası Araştırma Geliştirme Eğitim Mühendislik Madencilik İnşaat Proje Danışmanlık
San. ve Tic. Ltd. Şti.

GRANİTAŞ Granit Sanayi ve Pazarlama A.Ş.

HARTEK Kesme Teknolojileri Ltd. Şti.

İstanbul Maden İhracatçıları Birliği

KARAMEHMET Mermer A.Ş.

Marble Systems-TUREKS Turunç Madencilik İç ve Dış Tic. A.Ş.

MEGAMER&Detay Mermer Maden San. ve Tic. Ltd. Şti

PINAR MERMER Ltd. Şti.

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Sayfa

1.BÖLÜM / 1. CHAPTER

Mermer ve Doğaltaş Hammadde Potansiyelleri ve Üretimi 1

Sedimanter Doğaltaşların Mikro ve Makro Özellikleri ile Doğrusal Kesme Deneylerinden Elde Edilen Kazı Parametreleri Arasındaki İlişkilerin Analizi

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MICRO AND MACRO PROPERTIES OF SEDIMENTARY NATURAL STONES AND THE SPECIFIC ENERGY PARAMETERS OBTAINED FROM LINEAR CUTTING TESTS

C. Polat, A. Shaterpour-Mamaghani, D. Tumaç.....2

Üçkuyu Köyü (Bekilli, Denizli) Mermerlerinin Fiziko-Mekanik Özellikleri'nin Mineralojik-Petrografik ve Kimyasal Özellikleri ile Birlikte Değerlendirilmesi

EVALUATION OF THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF ÜÇKUYU VILLAGE (BEKİLLİ, DENİZLİ) MARBLES TOGETHER WITH THEIR MINERALOGICAL-PETROGRAPHIC AND CHEMICAL PROPERTIES

A. Kahya 15

Doğaltaş (Mermer) Sektörü İçin Yeni Bir Kaynak ve Rezerv Raporlama Yöntemi

A NEW RESOURCE AND RESERVE REPORTING METHOD FOR DIMENSION STONE (MARBLE) SECTOR

B. Ünver.....24

Mermer Ocaklarında Elmas Tel Kesme ve Patlatmalı Örtü Kazı Yöntemlerinin Karşılaştırılması

COMPARISON OF DIAMOND WIRE CUTTING AND BLASTING METHODS FOR OVERBURDEN EXCAVATION IN MARBLE QUARRIES

S. Cevheroğlu Çıra, Z. Cevizci, Ö. Akkoyun 47

Bazı Türk Doğaltaş Ocaklarında Zincirli Kollu Kesici Makinaların Verimlilik Analizi

ARMED CHAIN SAW MACHINE PERFORMANCE ANALYSIS OF SOME TURKISH NATURAL STONE

S. Kulaksız, F. Bayram, E. Özkan.....58

Effect of Discontinuities on Blast Fragmentation in Open-Pit Excavation: A Comparative Study Between Different Rock Type

Nur Lyana Khalil, Muhammad Irman Khalif Ahmad Aminuddin, Hareyani Zabidi 65

Mermer Yataklarının Umrek Kodu Kapsamında Ekonomik Olarak Değerlendirilebilirliği

ARMED CHAIN SAW MACHINE PERFORMANCE ANALYSIS OF SOME TURKISH NATURAL STONE

A. Yıldız, İ.C. Engin, M. Bağcı.....72

An Investigation on Radiometric Characteristics of Marble and Granites in Türkiye Bazaar

B. Camgöz, Y. Işık Camgöz, G. Yaprak 81

Mermer Ocaklarında Blok Üretim Maliyetlerinin Üretim Kapasitesi ile Değişiminin Araştırılması

INVESTIGATION OF VARIATION IN BLOCK PRODUCTION COSTS WITH PRODUCTION CAPACITY IN MARBLE QUARRY

T. Mallı, A. H. Deliormanlı 102

Capturing Anisotropy in Marble Quality Estimation Through Orientation-Aware Neural Networks

I. Kapageridis, A. Patra, C. Albanopoulos, F. Pavloudakis 111

2.BÖLÜM / 2. CHAPTER

Mermer ve Doğaltaş Kesme-İşleme Süreçleri ve Üretim Teknolojileri 121

Hybrid Numerical Modeling Of Rock Indentation: Insights From Cerchar Test Simulations M.T. Hamzaban, S. Balaie	122
Piroklastik Kayaçların Suda Dağılmaya Karşı Dayanıklılık İndeksinin Dolaylı Deneylerden Tahmin Edilebilirliğinin Araştırılması <i>INVESTIGATION OF THE RESISTANCE INDEX OF PYROCLASTIC ROCKS TO DISSOLUTION IN WATER FROM INDIRECT TESTS</i> S. Kahraman, M. Fener, O. Günaydın.....	133
Doğaltaş Ocaklarının Etkinliğinin Veri Zarflama Analizi Yöntemi ile Araştırılması <i>INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF NATURAL STONE QUARRIES BY USING DATA ENVELOPMENT ANALYSIS</i> Ş. A. Koç, E. Özkan	141
Görüntü İşleme ile Doğaltaş Seçiminde Yöntem Önerisi <i>NEW METHOD PROPOSAL FOR NATURAL STONE SELECTION BY USING IMAGE PROCESSING</i> Ö. Akkoyun, Y. Fırat	153
Çoklu İnce Telli Katraklar ve Çoklu Elmas Telli Katrakların Verimliliklerinin Karşılaştırılması <i>COMPARISON OF THE EFFICIENCIES OF MULTIPLE FINE WIRE GANG DRILLS AND MULTIPLE DIAMOND WIRE GANG DRILLS</i> O. Öz, A. Gürel, E. Özkan.....	164
Yüksek Gözenekli Doğaltaşlarda Numune Yüksekliğinin Kılcal Su Emme Katsayısına Etkisinin Araştırılması <i>INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SAMPLE HEIGHT ON THE COEFFICIENT OF CAPILLARY WATER ABSORPTION IN HIGHLY POROUS NATURAL STONES</i> M. Sert, G. Ekincioglu, D. Akbay	172
Lamalı ve Elmas Telli Katraklarda Kesim Kalitesinin Doğaltaşların Silim Performansına Etkisi <i>EFFECT OF CUTTING QUALITY IN BLADE AND MULTI-WIRE GANG SAWS ON THE POLISHING PERFORMANCE OF NATURAL STONES</i> A. K. Özdoğan, M. Karaabat Varol, S. Demirdağ.....	186
Kırıkkale-Çelebi Granatlarının Su Jetinde Kullanımının Araştırılması <i>THE INVESTIGATION OF KIRIKKALE ÇELEBİ GARNET IN WATER JET CUTTING</i> S. Kulaksız	195
Karbür Kaplamalı Takımla İşlemede İri Taneli Mermer Üzerindeki Performans Analizi ve Takım Aşınması <i>PERFORMANCE ANALYSIS AND TOOL WEAR IN CARBIDE COATED TOOL MACHINING ON COARSE GRAINED MARBLE</i> O. Öz, N. Çetingül, E. Özkan.....	203
Doğaltaş Ocakları Blok Üretim Optimizasyonu İçin Stratejik ADIMLAR <i>STRATEGIC STEPS FOR OPTIMIZING NATURAL STONE QUARRIES BLOCK PRODUCTION</i> A. Turanboy, E. Ülker	213
Blok Mermer Üretiminde Dijital Dönüşüm: Web Tabanlı Bir Ocak Modellemesi Sistemi <i>DIGITAL TRANSFORMATION IN BLOCK MARBLE PRODUCTION: A WEB-BASED QUARRY MODELING SYSTEM</i> E. Ülker, A. Turanboy	223
Tam Mekanize Doğaltaş Kesim Hatları ve Verimlilik <i>FULLY MECHANIZED CUTTING LINES IN NATURAL STONE AND EFFICIENCY</i> E. Kundak, M. Yurdakul.....	233

Doğaltaş Endüstrisinde 4,3 Mm Çaplı Elmas Tel Kullanımının Kesim Verimliliği ve Sürdürülebilirliğe Etkisi: Hartaş Mermer Tesisinde Uygulamalı Bir Çalışma
THE EFFECT OF 4,3 MM DIAMETER DIAMOND WIRE USAGE ON CUTTING EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY IN THE NATURAL STONE INDUSTRY: AN INDUSTRIAL CASE STUDY IN THE HARTAS MARBLE FACTORY

Y. E. Erbay, I. Kerti, M. S. Eken 246

Doğaltaş Ocaklarında Elmas Telli Kesme Hızı, Delici Delme Hızı ve Kayaçların Bazı Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Araştırılması
INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN DIAMOND WIRE CUTTING RATE, DRILLING RATE AND SOME MECHANICAL PROPERTIES OF ROCKS IN NATURAL STONE QUARRIES

Y. Özçelik, E. Yılmazkaya, Y. Entok.....255

Advancements in Marble Slab Processing: Fully Integrated Resin And Polishing Lines

C. Kılınç, N. Atar 263

Effects of Surface Hardness on Abrasion Resistance and Surface Roughness of Some Carbonate Stones Subjected to Foot Traffic

I. S. Büyüksagis, A. Cakir, M. Gursoy, J. Rostami 271

Impact of Electricity Mix on The Life Cycle Performance of Marble Production in Türkiye

A. Dönmez, M. Erkayaoğlu, N. Demirel 284

3.BÖLÜM / 3. CHAPTER

Mermer ve Doğaltaş Sektörünün Çevre-Döngüsel Ekonomi İlişkileri..... 293

Mermer Artıkların Yol Üst Yapısında Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanımı

THE USE OF MARBLE WASTE AS BASE AND SUBBASE MATERIALS

E. Yıldırım, S. A. Yıldırım, E. B. Aydın, G. Bulut 294

Exploring The Feasibility of Natural Stone Cutting Wastes As Abrasives in Waterjet Machining

S. Kaya, G. Aydın, I. Karakurt 303

Mermer Madencilğinde Çevresel Etki Değerlendirme (Çed) Süreçlerinde Karşılaşılan Sorunların Maden Mühendisliği Açısından Değerlendirilmesi

EVALUATION OF ISSUES ENCOUNTERED IN ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT (EIA) PROCESSES OF MARBLE MINING FROM A MINING ENGINEERING PERSPECTIVE

T. Mallı, A. H. Deliormanlı 312

The Effect of Calcination Temperature in Synthesizing Eco-Friendly Cement Using Granite Waste

N. I. Anor, K. E. H. K. Ishak, S. F. S. Hashim 322

Reviving Degraded Limestone Landscapes: Evaluating Rehabilitation Strategies in Malaysian Quarries

N. A. Jabit, K. E. H. Ku, S. Ismail, H. Zabidi 335

Doğaltaş Sektöründe Eko-Verimlilik: Yeşil/Eko Etiket

ECO-EFFICIENCY IN THE NATURAL STONE SECTOR: GREEN/ECO LABEL

R. Altındağ, N. Şengün, İ. Uğur, D. Akbay, G. Ekincioglu.....343

4.BÖLÜM / 4. CHAPTER

Mermer ve Doğaltaş Sektörünün İnsan Kaynağı Eğitimi ve ISG Uygulamaları 362

Doğaltaş Ocaklarında Pasa Taşıma İşlemi Yapan Kamyonlarda Şoförlerin Maruz Kaldıkları Titreşimin İncelenmesi

EVALUATION OF VIBRATION EXPOSURE IN ROCK TRUCK OPERATORS ENGAGED IN WASTE ROCK TRANSPORTATION AT NATURAL STONE QUARRIES

A. E. Arıtan, E. Ahi, S. Çelebi.....363

Doğaltaş Fabrika Çalışanlarının Farklı Mevsim Şartlarında Termal Konfor Şartlarının Araştırılması
INVESTIGATION OF THERMAL COMFORT CONDITIONS OF NATURAL STONE FACTORY WORKERS UNDER DIFFERENT SEASONAL CONDITIONS

A. E. Arıtan, Z. Memiş.....372

Mermer İşleme Tesislerinde Hataların Hatatürleri ve Etkileri Analiz (Htea) Yöntemiyle Risk Değerlendirmesi

RISK ASSESSTMENT OF DEFECTS IN MARBLE PROCESSING PLANTS WITH THE FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) METHOD

I. Kutbay, S. N. Günaydın.....380

Mermer Blok Kesiminde Elmas Tel Kopmalarının Nedenleri ve Önleyici Tedbirler

CAUSES OF DIAMOND WIRE BREAKAGE IN MARBLE BLOCK CUTTING AND PREVENTIVE MEASURES

O. Öz, Ö. Zontur, E. Özkan.....395

Doğaltaş Madencilğinde İş Kazaları ve İş Güvenliğine Bir Bakış

AN OVERVIEW OF WORK ACCIDENTS AND OCCUPATIONAL SAFETY IN NATURAL STONE MINING

M. Çebi, M. Geniş.....403

Yeraltı Mermer Madencilğinde Üretimin İş Sağlığı ve Güvenliği Yaklaşımları ile Modellenmesi

MODELING OF PRODUCTION IN UNDERGROUND MARBLE MINING WITH OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY APPROACHES

M. K. Özfirat, E. Özkan, M. E. Yetkin, Ü. Sayın, A. K. Eyüboğlu 416

5.BÖLÜM / 5. CHAPTER

Mermer ve Doğaltaş Sektörünün Pazarlama-Ekonomik Gelişmeleri ve Kanun Mevzuatı..... 430

Türkiye Doğaltaş Sektörünün Küresel Rekabetçiliği: 2024 Yılı Perspektifinde Fırsatlar, Zorluklar ve Stratejiler

GLOBAL COMPETITIVENESS OF THE TURKISH NATURAL STONE INDUSTRY: OPPORTUNITIES, CHALLENGES AND STRATEGIES IN 2024 PERSPECTIVE

B. Akyüz, M. Uslu 431

Türkiye'nin Mikronize Kalsit Minerali Dış Ticareti ve Gelişimi

FOREIGN TRADE AND DEVELOPMENT OF MICRONIZED CALCITE MINERAL OF TURKEY

M. S. Delibalta 444

Türkiye'den Mısır'a Yapılan Doğaltaş İhracatının Değerlendirilmesi

EVALUATION OF NATURAL STONE EXPORTS FROM TURKIYE TO EGYPT

E. Elsharkawi, E. Kundak 453

6.BÖLÜM / 6. CHAPTER

Mermer ve Doğaltaş Sektörünün Pazarlama-Ekonomik Gelişmeleri ve Kanun Mevzuatı..... 460

Türkiye Doğaltaş Sektörünün Küresel Rekabetçiliği: 2024 Yılı Perspektifinde Fırsatlar, Zorluklar ve Stratejiler

ANALYZING THE USE OF NATURAL STONE IN DESIGN COMPETITIONS THROUGH PARTICIPATION PROJECTS: INTERNATIONAL DIFFERENT NATURAL STONE DESIGN COMPETITION

E. Okuyucu, F. Mazlum	461
Kent Estetiği Bağlamında taş Malzemenin Mimari Üslup oluşturmaları: Afyonkarahisar Örneği <i>ARCHITECTURAL STYLE CREATION OF STONE MATERIAL IN THE CONTEXT OF URBAN AESTHETICS: THE CASE OF AFYONKARAHİSAR</i> Ş. E. Okuyucu, S. Baks, F. Mazlum	472
Travertenlerin Farklı Tuz Çözeltileri ile Tuz Kristallenmesine Bağlı Fiziko-Mekanik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi <i>INVESTIGATION OF CHANGES IN PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF TRAVERTINE DUE TO SALT CRYSTALLIZATION WITH DIFFERENT SALT SOLUTIONS</i> M. Sert, M. Y. Çelik, Z. Arsoy	482
Lycus Vadisi Yerleşimindeki Mimari Mermer Blokları İçin Olası Bir Kaynak Alanı: Thionta (Gözler-Denizli) Antik Mermer Ocakları <i>A POSSIBLE PROVENANCE FOR ARCHITECTURAL MARBLE BLOCKS IN LYCUS VALLEY SETTLEMENTS: THIOUNTA (GOZLER-DENIZLI) ANCIENT MARBLE QUARRIES</i> T. Koralay, M. Özkul.....	494
Fosilli Mermerler ve Fosillerin, Mermerler İçindeki Olumlu ve Olumsuz Etkileri <i>FOSSILLED MARBLES AND THE POSITIVE AND NEGATIVE EFFECTS OF FOSSILS IN MARBLES</i> A. Karabaşoğlu	507
Doğaltaşların Dış Cephe Kaplama Malzemesi Olarak Kullanımında Donma-Çözülme Döngülerinin Etkileri <i>EFFECTS OF FREEZE-THAW CYCLES ON THE USAGE OF NATURAL STONES AS FACADE CLADDING MATERIALS</i> M. Kaptanlar, F. Bayram.....	513
Adını Mermerinden Alan Bir İlçe: Gölarmara <i>A DISTRICT NAMED AFTER ITS MARBLE: GÖLMARMARA</i> Ö. Bostancı.....	524
İscehisar (Dokimeion) Menekşe (Pavonazetto) Mermerlerinin Parmak İzi (Fingerprint) Özelliklerinin, Çoklu Analiz Yöntemleriyle İncelenmesi <i>INVESTIGATION OF FINGERPRINT FEATURES OF İSCEHİSAR (DOKIMEION) VIOLET (PAVONAZZETTO) MARBLES WITH MULTIPLE ANALYSIS METHODS</i> M. Bağcı, A. Yıldız, Z. Hüseyinağa.....	533
Afyonkarahisar Kentsel Sit Alanda Doğaltaş Kullanımına İlişkin Bir Gözlem <i>AN OBSERVATION ON THE USE OF NATURAL STONE IN THE AFYONKARAHİSAR URBAN SITE</i> N. Öztank	547
New Marble Applications K. V. Rastogi	558
Doğaltaş Yüzeylerde Bozulma Sınıflandırması: Afyonkarahisar'daki Üç Tarihi Çeşme Üzerinden Bir Değerlendirme <i>CLASSIFICATION OF DETERIORATION ON NATURAL STONE SURFACES: AN EVALUATION THROUGH THREE HISTORICAL FOUNTAINS IN AFYONKARAHİSAR</i> E. Okuyucu, M. Çiftçi.....	566
7.BÖLÜM / 7. CHAPTER Diğer Konu Başlıkları.....	578
Doğaltaş Sektörünün Kurumsallaşmasının Önündeki Engeller ve Çözüm Önerileri	

OBSTACLES AND SOLUTION SUGGESTIONS TO THE INSTITUTIONALIZATION OF THE NATURAL STONE INDUSTRY

H. Acar, İ. S. Büyüksagis, M. Gürsoy 579

8.BÖLÜM / 8. CHAPTER

Invited Speakers..... 586

Circular Economy In Marble Scraps And Good Practices

N. Careddu 587

Mine Technologies For Geo-Sensing And Modelling And Their Applications In Marble And Natural Stone Quarries

M. Elmouttie, W. Stasinowsky, B. Zhou, Y. Duan, K. Hoehn 597

The Dual Imago Method: A Visual Strategy To Reshape The Quarrying World

O. Pandolfi, N. Santoro, L. Pia, S. Dundar, C. Meanti.....606

9.BÖLÜM / 8. CHAPTER

Destekleyen Kuruluşlar 647

10.BÖLÜM / 9. CHAPTER

Sponsorlar..... 649

BİLDİRİLER / PAPERS

1.Bölüm

SEDİMANTER DOĞALTAŞLARIN MİKRO VE MAKRO ÖZELLİKLERİ İLE DOĞRUSAL KESME DENEYLERİNDEN ELDE EDİLEN KAZI PARAMETRELERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ANALİZİ

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MICRO AND MACRO PROPERTIES OF SEDIMENTARY NATURAL STONES AND THE SPECIFIC ENERGY PARAMETERS OBTAINED FROM LINEAR CUTTING TESTS

C. Polat ^{1*}, A. Shaterpour-Mamaghani², D. Tumaç¹

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü*

²*İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü*

*Sorumlu yazar: polatca@itu.edu.tr

ÖZ

Doğaltaşlarda mikro ve makro özelliklerin kazı parametreleri üzerindeki etkisini inceleyebilmek adına on farklı sedimanter doğaltaş Türkiye'nin farklı ocaklarından alınmıştır. İlk olarak, yoğunluk tayini, tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, Knoop mikro sertlik, Cerchar aşındırıcılık indeksi, doku katsayısı, tane boyutu, Schmidt sertlik çekici değeri, Shore Scleroscope sertliği ve toplam gözeneklilik olmak üzere on farklı fiziksel-mekanik ve mineralojik-petrografik deneyler gerçekleştirilmiştir. Ardından, elmas boncuklu tel kesme makinesi ve zincirli kesme makinelerinin arazideki çalışma şartlarını laboratuvarında modelleyebilmek adına 1,0 mm, 1,5 mm, 2,5 mm ve 3,5 mm kesme derinliklerinde kama indeks keski ile yardımsız olarak kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, elde edilen deney sonuçları basit regresyon yöntemiyle analiz edilmiş; kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji, normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri, doğaltaşların makro ve mikro özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada, kesme derinliği, doğaltaşların fiziksel-mekanik ve mineralojik-petrografik özelliklerinin spesifik enerji parametresi üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ise Shore Scleroscope ve Schmidt çekici sertlik değerlerinde spesifik enerji için azalan kesme derinliklerinde yüksek belirlilik katsayısı değerleri elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kaya mekaniği, kazı mekaniği, spesifik enerji, basit regresyon

ABSTRACT

To investigate the influence of micro and macro properties on natural stone quarrying at a laboratory scale, ten different sedimentary natural stone samples were collected from various quarries across Türkiye. Initially, ten different physical, mechanical, and mineralogical-petrographical properties were determined to characterize the stone samples. These properties include density, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Knoop microhardness, Cerchar abrasivity index, texture coefficient, grain size, Schmidt hammer hardness, Shore Scleroscope hardness, and total porosity. Subsequently, to simulate the cutting processes of diamond wiresaw and chainsaw machines in a laboratory environment, linear cutting experiments were conducted using a chisel-shaped cutting tool under unrelieved conditions. Four different cutting depths—1.0 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, and 3,5 mm—were applied to each

natural stone sample. Finally, the obtained data were analyzed using simple regression analysis, comparing the cutting depth values with the micro and macro properties of the natural stones. The findings indicate that Shore Scleroscope hardness and Schmidt hammer hardness values exhibit stronger correlations with decreasing cutting depths.

Keywords: Rock mechanics, rock cutting mechanics, specific energy, simple regression

GİRİŞ

Doğaltaşların kullanımı günlük hayatta sanayi, inşaat sanat gibi alanlarda her geçen gün artmakta olup üretim aşamalarının verimli, ekonomik ve etik kurallar çerçevesinde yürütülmesi oldukça önemlidir. Doğaltaş ocaklarında kullanılan elmas boncuklu tel kesme ve zincirli kesme makinelerinin performansı tasarımı ve uygun şekilde kullanımı doğaltaş üretiminde ele alınması konuların başında yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında ele alınan laboratuvar çalışmaları kısmında doğaltaş karakterizasyonu ve kesme simülasyonu için araziden alınan numuneler üzerinde çeşitli kaya ve kazı mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, elde edilen laboratuvar verileri basit regresyon yöntemi ile karşılaştırılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

Kama keski kullanılarak gerçekleştirilen küçük ölçekli ve taşınabilir doğrusal kesme deneyleri, literatürde kayaçların fiziksel-mekanik ve mineralojik-petrografik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Öztürk vd. (2004), sedimanter kayaçların doku katsayısı ile küçük ölçekli doğrusal kesme deneyleri sonucunda elde edilen spesifik enerji, normal kuvvet ve kesme kuvveti arasındaki ilişkileri incelemiştir. Balcı ve Bilgin (2007), doğrusal kesme deneylerinde kullanılan konik keski ile elde edilen sonuçları, basit kama keski kullanılarak gerçekleştirilen deneyler ile karşılaştırmıştır. Çopur (2010) ve Çopur vd. (2011), zincirli kesme makinelerinin kesme simülasyonunu küçük ölçekli doğrusal kesme deney aletinde basit kama keski kullanarak modellemiştir. Tumaç (2014), spesifik enerji, normal kuvvet ve kesme kuvveti gibi bağımlı değişkenlerin Shore Scleroscope sertlik değeri ile kestirilebileceğini ortaya koymuş ve zincirli testere makinelerinin performans tahmini üzerine değerlendirmelerde bulunmuştur. Tumaç vd. (2018), 18 farklı doğaltaş üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada, basit kama keski ile elde edilen kesme deney sonuçlarını doku katsayısı ile karşılaştırmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada geçtiğimiz on yıllık süreçte iki farklı TÜBİTAK ve doktora tezi kapsamında elde edilen on farklı sedimanter kökenli doğaltaş üzerinde yürütülen fiziksel mekanik ve mineralojik petrografik deneyler kesme deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Arazide kullanılan elmas boncuklu tel kesme makineleri ve zincirli kesme makinelerinin kesme derinliği milimetre değerinin çok altında olmasına rağmen, kesme simülasyonunu gerçekleştirmek adına tasarlanan kesme deney setinde yardımsız olarak 1,0 1,5 2,5 ve 3,5 mm kesme derinlikleri kullanılmış ve bu sayede laboratuvar simülasyonu gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Kazı deneylerinden elde edilen SE, FN ve FC bağımlı değişkenleri ardından on farklı fiziksel-mekanik ve mineralojik-petrografik bağımsız değişkenleri ile de karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Bu çalışmada kullanılan doğaltaş örnekleri, farklı araştırma projeleri ve akademik çalışmalar kapsamında temin edilmiştir. Kaklık Traverten (KT), Sandıklı Siyah Kireçtaşı (SBL), Finike Limra Kireçtaşı (FLL) ve Korkuteli Bej (KBL) örnekleri, 112M860 numaralı TÜBİTAK projesinden; Menderes Kireçtaşı (ML), Gönen I Kireçtaşı (GL-I) ve Gönen II Kireçtaşı (GL-II) örnekleri, 117M975 numaralı TÜBİTAK projesinden; Emirdağ Gümüş Traverten (ET-I), Emirdağ Klasik Traverten (ET-II) ve Şuhut Açık Gri Bej (SLGB) örnekleri ise bir doktora tezi kapsamında elde edilmiştir (Tumaç vd., 2015; Tumaç vd., 2019; Polat, 2024). Çalışma kapsamında, sedimanter kökenli doğaltaşların deneysel incelemeleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada,

kayaçların karakterizasyonunu sağlamak amacıyla on farklı fiziksel, mekanik ve mineralojik-petrografik deney uygulanmıştır. İkinci aşamada ise laboratuvar ölçeğinde kesme simülasyonunu gerçekleştirmek amacıyla, kesme deneyleri dört farklı derinlikte yürütülerek kesme parametreleri analiz edilmiştir.

Fiziksel mekanik ve mineralojik petrografik deneyler

Fiziksel ve mekanik deneyler doğaltaşların makro özelliklerini belirlemek amacıyla Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği tarafından önerilen test yöntemleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir (ISRM, 2007). Makro özelliklerin belirlenmesi adına yoğunluk tayini (ρ), tek eksenli basınç dayanımı (UCS), dolaylı çekme dayanımı (BTS), Schmidt sertlik çekici deneyi (SHH), Shore Scleroscope sertlik deneyi (SSH) testleri yürütülmüştür. Yoğunluk tayini taşın kütesinin kütle değerinin hacime bölünmesi ile elde edilmiştir. UCS testleri, NX karot (54,7 mm) örneklerinde, 2,5-3,0 arasındaki uzunluk/çap oranlarında ve 0,5 kN/s gerilim yükleme seviyesiyle gerçekleştirilmiştir. BTS deneyi, NX karot örneklerinde, 0,5-1,0 uzunluk/çap oranı ve 0,25 kN/s gerilim yükleme seviyesi ile yapılmıştır. SHH deneyi, L-9 tipi çekiç ile doğaltaş bloklarında 20 farklı noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. SSH deneyi ise C-2 tip ölçüm aletiyle, her bir bloktan en az 20 ayrı okuma alınarak yapılmıştır.

Mikro özelliklerin tayini için Knoop mikro sertlik (HK), Cerchar aşındırıcılık indeksi (CAI), doku katsayısı analizi (TC), ortalama tane boyutu (Sg) ve toplam gözeneklilik deneyleri (TP) uygulanmıştır. HK deneyi, EN 14205 (2004) standardına uygun olarak, her bir doğaltaş için ortalama 40 okuma alınarak gerçekleştirilmiştir. CAI deneyi, ASTM D7625-10 (2010) standardına göre yapılmıştır. TC değerleri ise Howarth ve Rowlands (1986) tarafından önerilen yöntemle her bir doğaltaş için ayrı ayrı belirlenmiştir. Sg değeri her bir doğaltaş örneği için hazırlanan ince kesitte polarizan mikroskop altında ölçülerek elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, TS EN 12407 (2007) standardına uygun şekilde kategorize edilmiştir. Son olarak, toplam gözeneklilik değerinin hesaplanabilmesi için helyum piknometresi kullanılarak, TS EN 1936 (2007) standardına göre gerçek yoğunluk ve görünür yoğunluk değerleriyle hesaplama yapılmıştır. Fiziksel, mekanik ve mineralojik-petrografik test sonuçları, açıklayıcı istatistiksel veri olarak Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Doğaltaşların Fiziksel Mekanik Mineralojik ve Petrografik Özelliklerinin Veri Aralıkları (Tumaç vd., 2015; Tumaç vd., 2019; Polat, 2024)

	ρ	UCS	BTS	SHH	SSH
Min.	2,14	11	3,57	39	26,6
Max.	2,87	293,3	13	73,6	66,3
Ort.	2,59	90,77	6,2	55,61	47,66
Std. Dev.	0,24	83,08	3,16	11,62	13,28
	HK	CAI	TC	Sg	TP
Min.	75,28	0,3	0,52	0,02	0,07
Max.	328,65	1,98	1,9	0,2	22,3
Ort.	173,86	1,28	1,29	0,08	7,93
Std. Dev.	70,41	0,54	0,58	0,06	7,34

ρ : yoğunluk (g/cm^3), UCS: Tek eksenli basınç dayanımı (MPa), BTS: Dolaylı çekme dayanımı (MPa), SHH: Schmidt çekici sertlik değeri (-), SSH: Shore Scleroscope sertlik değeri (-), HK: Knoop mikro sertlik (MPa), CAI: Cerchar aşındırıcılık indeksi (-), TC: Doku katsayısı (-), Sg: ortalama tane boyutu (mm), TP: toplam gözeneklilik (%).

Taşınabilir doğrusal kesme deneyleri

Taşınabilir doğrusal kesme deneyleri Balcı vd. (2016) tarafından geliştirilmiş deney aletinde gerçekleştirilmiştir. Deney prosedürleri kapsamında kama, konik ve disk kesmeler kullanılabilmekte ve $15 \times 15 \times 20 \text{ cm}^3$ boyutundaki kaya numunelerinde kesme deneyleri yürütülebilmektedir. Makine üzerindeki dinamometre sayesinde normal, kesme ve yanal kuvvetler ölçülebilmekte olup bu çalışma kapsamında basit kama keski (kesme açısı -5° , temizleme açısı 5° ve genişlik 12,7 mm) kullanılmıştır. Test cihazı 1000 Hz veri kayıt kapasitesine sahip olup kesme deneyleri 3 cm/s hız değerinde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, doğaltaşların yüzeyleri düz bir yapıya sahip olana kadar traşlanmış ve ardından dört farklı kesme derinliği (1,0 1,5 2,5 ve 3,5 mm) en az üç ayrı veri olacak şekilde kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve ortalama sonuçlar analiz kapsamında kullanılmıştır. Kesme testleri, yardımsız modda, ölçümlerin birbirleriyle etkileşime girmeyecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde normal (FN) ve kesme (FC) kuvvetleri ile kesme deneyleri sırasında ortaya çıkan pasa (Q) değerleri elde edilmiştir. Birim kayaç miktarının kazılabilirliğini gösteren laboratuvar spesifik enerji (SE) değeri, FC değerinin Q değerine oranından elde edilmiştir. Deney sonuçlarının açıklayıcı istatistiksel verileri ise Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Çalışma Kapsamında Yürütülen Kesme Deneyi Sonuçları (Tumaç vd., 2015; Tumaç vd., 2019; Polat, 2024)

	SE (1 mm)	SE (1,5 mm)	SE (2,5 mm)	SE (3,5 mm)	FN (1 mm)	FN (1,5 mm)
Min.	6,46	5,35	4,23	3,64	0,09	0,18
Max.	47,51	41,78	36,50	32,22	3,22	4,43
Ort.	23,10	17,94	15,25	12,70	1,08	1,71
Std. Dev.						
	FN (2,5 mm)	FN (3,5 mm)	FC (1 mm)	FC (1,5 mm)	FC (2,5 mm)	FC (3,5 mm)
Min.	0,78	1,27	0,14	0,26	0,84	1,48
Max.	6,39	8,53	1,03	1,78	3,31	5,44
Ort.	3,06	4,54	0,39	0,79	2,02	3,36
Std. Dev.	1,86	2,48	0,31	0,49	0,85	1,37

SE: spesifik enerji (kWh/m^3), FN: ortalama normal kuvvet (kN), FC: ortalama kesme kuvveti (kN).

ANALİZLER

Sedimanter kökenli doğaltaşlarda yürütülen deneyler bu bölümde basit regresyon yöntemi ile karşılaştırılmış ve her bir bağımsız değişken aynı zamanda kesme derinliğinin etkisi ile de analiz edilmiştir. İlk olarak Çizelge 3’te korelasyon matrisi değişkenler arasında lineer ilişkiyi gösteren şekilde verilmiş ve sonuçları en iyi olanlar ise dönüşümler uygulanarak ayrıca tartışılmıştır. Basit regresyon bir bağımlı değişkeni bir bağımsız değişken ile tahmin etmek için kullanılan bir yöntem olup kestirimlerin yapıldığı formülasyon eşitlik 1’de verilmiştir. Bu çalışmada eksponansiyel, logaritmik ve güç fonksiyonu dönüşümleri uygulanarak en yüksek belirlilik katsayısına sahip sonuçları veren analizler ilerleyen paragraflarda tartışılacaktır.

$$y = ax + b + e \quad (1)$$

y=bağımlı değişken,
a=doğrunun eğimi,
x=bağımsız değişken,
b=sabit terim,

e=hata terimi.

Spesifik enerji (SE) sonuçları ile fiziksel, mekanik ve mineralojik-petrografik değerler karşılaştırıldığında, en iyi sonuçların Shore Scleroscope sertliği (SSH) ve Schmidt çekici sertliği (SHH) değerlerinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Şekil 1 ve 2’de sunulan verilere göre, belirlilik katsayısı değerlerinin kesme derinliğinin azalmasıyla arttığı belirlenmiştir. En iyi sonuçlar, SSH için 1,0 mm kesme derinliğinde $R^2 = 0,95$ ve SHH için ise 1,0 mm kesme derinliğinde $R^2 = 0,87$ olarak elde edilmiştir. Her iki analizde de bağımlı ve bağımsız değişkenlerde dışa düşen verilere rastlanmamıştır.

Çizelge 3. Sedimanter Kökenli Doğaltaşların Korelasyon Matrisi

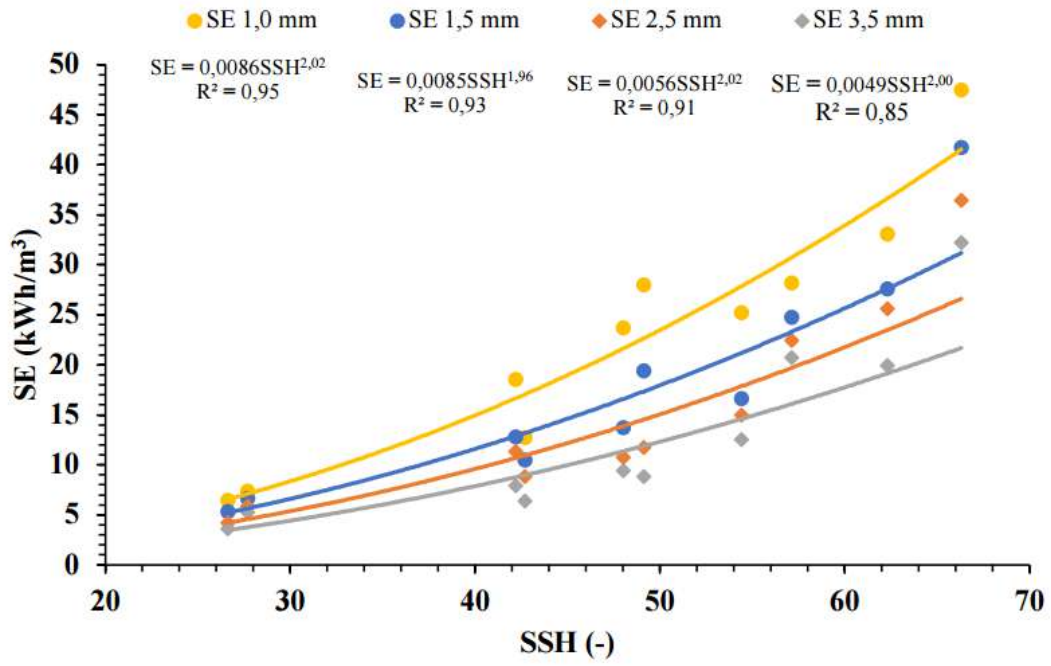
	ρ	UCS	BTS	HK	CAI	TC	Sg	SHH	SSH	TP	SE 1 mm	SE 1,5 mm	SE 2,5 mm	SE 3,5 mm	FN 1 mm	FN 1,5 mm	FN 2,5 mm	FN 3,5 mm	FC 1 mm	FC 1,5 mm	FC 2,5 mm	FC 3,5 mm
ρ	1																					
UCS	0,67	1																				
BTS	0,56	0,88	1																			
UCS/BTS	0,62	0,66	0,27																			
HK	0,72	0,87	0,81	1																		
CAI	0,93	0,44	0,33	0,6	1																	
TC	0,75	0,55	0,42	0,63	0,68	1																
Sg	-0,12	-0,5	-0,28	-0,24	0,04	-0,29	1															
SHH	0,73	0,67	0,46	0,59	0,56	0,59	-0,44	1														
SSH	0,81	0,63	0,56	0,63	0,65	0,68	-0,12	0,9	1													
TP	-0,99	-0,62	-0,53	-0,66	-0,91	-0,76	0,09	-0,74	-0,84	1												
SE 1 mm	0,69	0,7	0,59	0,65	0,54	0,57	-0,22	0,92	0,94	-0,7	1											
SE 1,5 mm	0,65	0,77	0,72	0,71	0,48	0,59	-0,21	0,82	0,91	-0,65	0,97	1										
SE 2,5 mm	0,62	0,75	0,75	0,69	0,42	0,55	-0,15	0,78	0,9	-0,64	0,93	0,98										
SE 3,5 mm	0,58	0,73	0,73	0,7	0,37	0,53	-0,09	0,74	0,87	-0,59	0,92	0,97	0,99	1								
FN 1 mm	0,6	0,77	0,76	0,74	0,43	0,6	-0,19	0,75	0,86	-0,6	0,92	0,99	0,98	0,98	1							
FN 1,5 mm	0,66	0,75	0,7	0,74	0,48	0,67	-0,23	0,82	0,92	-0,67	0,95	0,98	0,98	0,97	0,99	1						
FN 2,5 mm	0,7	0,71	0,57	0,69	0,53	0,74	-0,3	0,9	0,94	-0,72	0,95	0,95	0,92	0,91	0,92	0,97	1					
FN 3,5 mm	0,71	0,66	0,48	0,63	0,58	0,73	-0,32	0,93	0,94	-0,73	0,95	0,92	0,87	0,85	0,88	0,94	0,99	1				
FC 1 mm	0,49	0,57	0,69	0,46	0,29	0,52	-0,21	0,66	0,81	-0,54	0,8	0,86	0,89	0,85	0,88	0,86	0,8	0,76	1			

12. International Marble And Natural Stone Congress

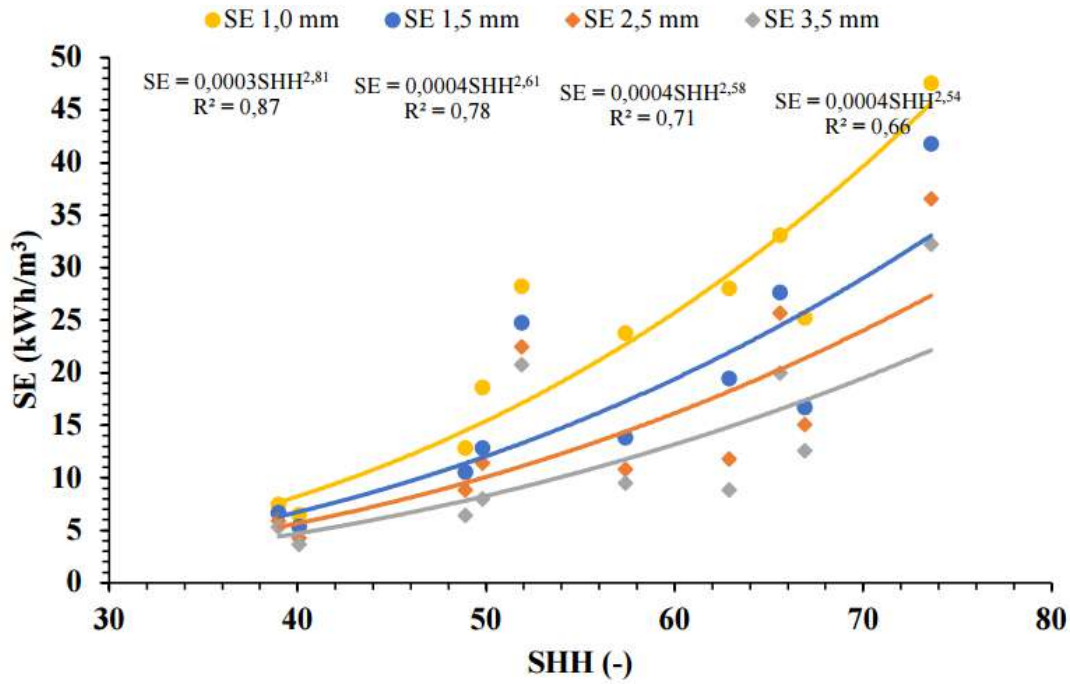
23-25 October 2025, Afyonkarahisar

FC 1,5 mm	0,56	0,53	0,6	0,43	0,36	0,61	-0,22	0,74	0,88	-0,62	0,83	0,86	0,88	0,84	0,86	0,87	0,85	0,83	0,98	1		
FC 2,5 mm	0,66	0,41	0,35	0,39	0,54	0,73	-0,17	0,82	0,92	-0,73	0,83	0,79	0,78	0,75	0,76	0,83	0,89	0,91	0,82	0,92	1	
FC 3,5 mm	0,58	0,25	0,24	0,26	0,5	0,65	-0,01	0,72	0,87	-0,65	0,78	0,73	0,72	0,69	0,7	0,76	0,81	0,84	0,79	0,89	0,98	1

P: yoğunluk (g/cm³), UCS: tek eksenli basınç dayanımı (MPa), BTS: Dolaylı Çekme Dayanımı (MPa), HK: Knoop mikro sertliği (MPa), CAI: Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (-), TC: doku katsayısı (-), Sg: ortalama tane boyutu (mm), SHH: Schmidt çekici sertlik değeri (-), SSH: Shore Scleroscope sertliği (-), TP: Toplam gözeneklilik (%), SE: spesifik enerji (kWh/m³), FN: normal kuvvet, FC: kesme kuvveti (kN).



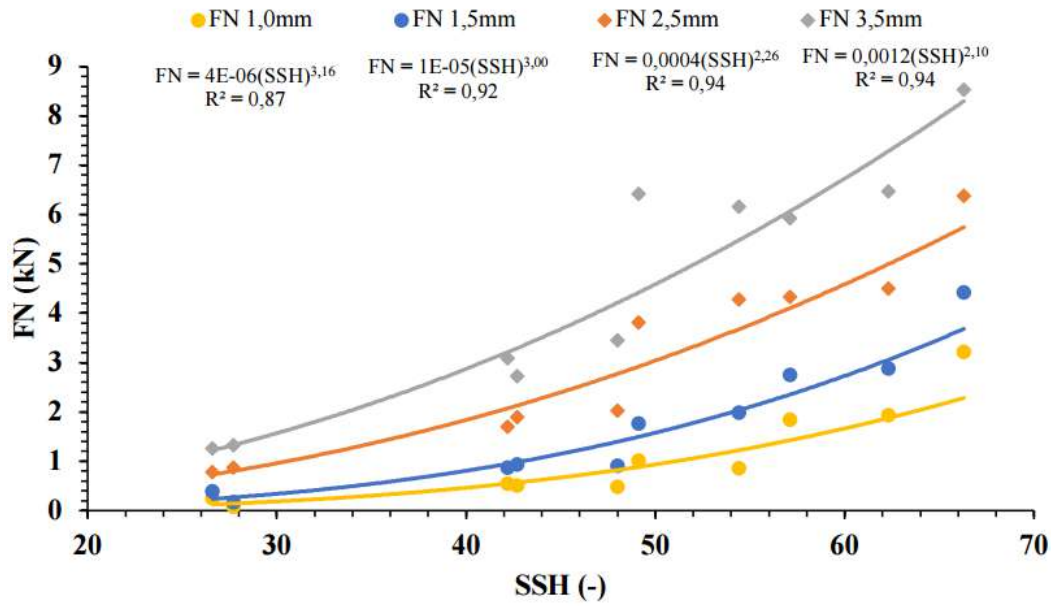
Şekil 1. Spesifik enerji ile Shore Scleroscope sertlik değeri arasındaki ilişki



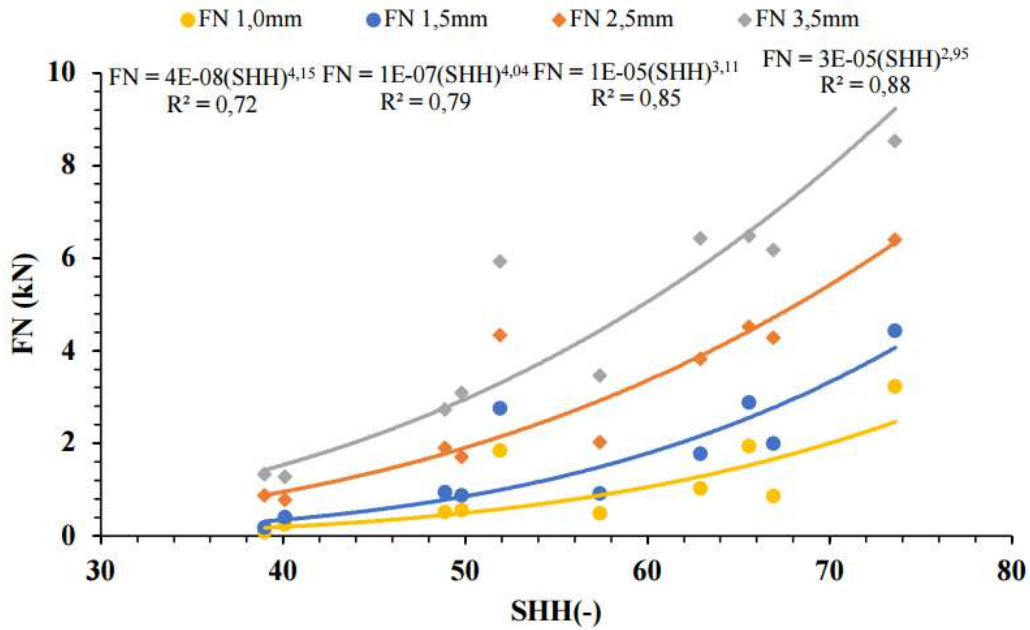
Şekil 2. Spesifik enerji ile Schmidt çekici sertlik değeri arasındaki ilişki

Normal kuvvet (FN) bağımlı değişkeni incelendiğinde ise en iyi sonuçlar SSH ve SHH bağımsız değişkenlerinde gözlemlendiği belirlenmiştir. Her iki analizde de en iyi sonuçlar, kesme derinliğinin artışıyla elde edilmiştir. SSH için en iyi sonuç, 3,5 mm kesme derinliğinde $R^2 = 0,94$ olarak, SHH için ise aynı kesme derinliğinde $R^2 = 0,88$ olarak gözlemlenmiştir. Her iki analizde de bağımlı

ve bağımsız değişkenlerde dışa düşen verilere rastlanmamıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 3 ve 4'te sunulmuştur.

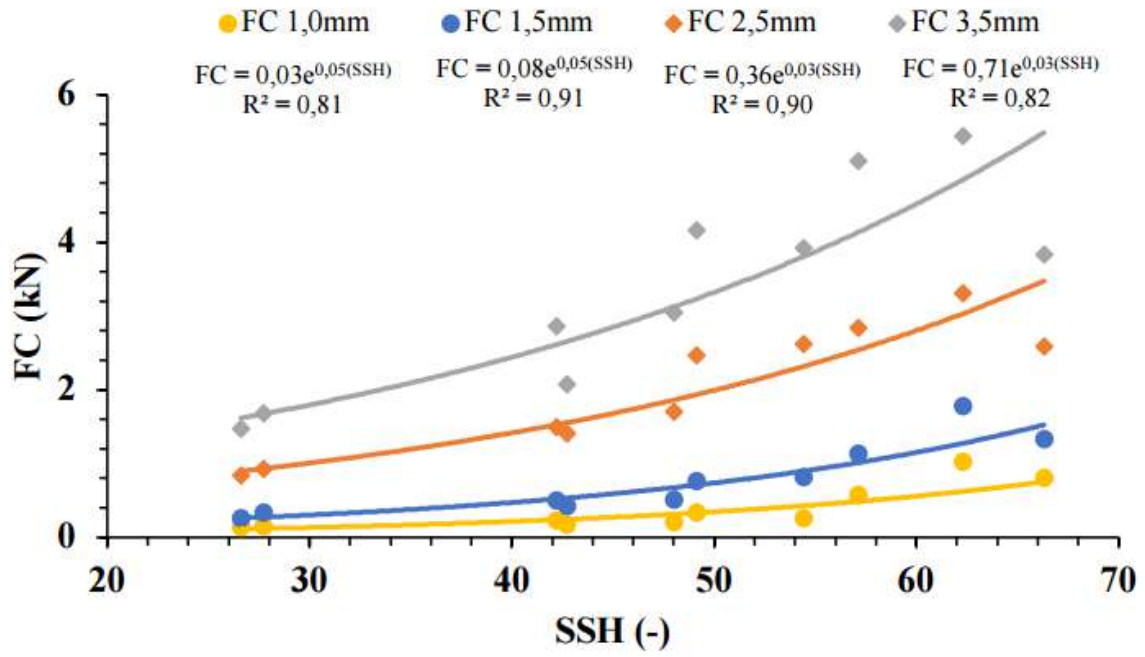


Şekil 3. Normal kuvvet ile Shore Scleroscope sertlik değeri arasındaki ilişki.

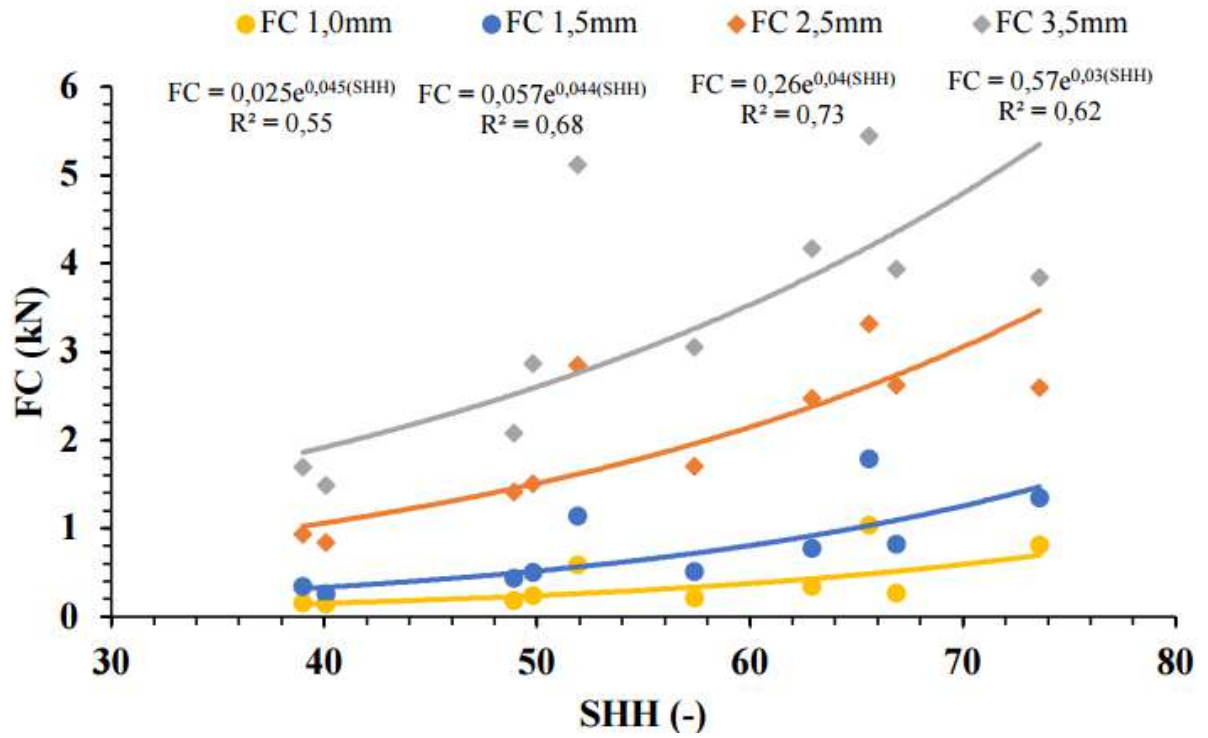


Şekil 4. Normal kuvvet ile Schmidt sertlik değeri arasındaki ilişki

Kesme kuvveti (FC) bağımlı değişkeninde ise en iyi sonuçlar yine SSH ve SHH değerlerinde elde edilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi SSH için en iyi belirlilik katsayısı 1,5 mm kesme derinliğinde 0,81 olarak, SHH için ise 2,5 mm kesme derinliğinde 0,73 olarak belirlenmiştir (Şekil 6). Her iki analizde de dışa düşen veriye rastlanmamıştır.



Şekil 5. Kesme kuvveti ile Shore Scleroscope sertlik değeri arasındaki ilişki



Şekil 6. Kesme kuvveti ile Schmidt sertlik değeri arasındaki ilişki

TARTIŞMA

Doğrusal kesme deneyleri, keskiye etki eden kuvvetlerin kestirimi için en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Kesme deneyleri sonucunda elde edilen spesifik enerji (SE), normal kuvvet (FN) ve kesme kuvveti (FC) verileri, makine performans tahmini/analizi ve optimizasyonu için kullanılabilir; bu veriler ayrıca avan proje sırasında makine tasarımı aşamasında da önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, deney çalışmalarının başarılı bir şekilde yürütülmesi için deneyimli personel gerekliliği ve arazi şartlarından alınan doğaltaş numunelerinin nakliye ile laboratuvar işlemleri, oldukça yoğun ve zorlu bir süreci beraberinde getirmektedir.

Yürütülen çalışma kapsamında doku katsayısı (TC) ile basit regresyon yöntemi ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 3'te verildiği gibi SE bağımlı değişkeni ile en yüksek belirlilik katsayısına sahip sonuç $R^2 = 0,35$ değeri ile 1,5 mm kesme derinliğinde elde edilmiştir. FN ve FC bağımlı değişkeni ile en yüksek R^2 değerleri sırasıyla 0,55 ve 0,53 değeri ile 2,5 mm kesme derinliğinde gözlemlenmiştir. Öztürk vd. (2004) tarafından doğaltaş olarak sınıflandırılmayan sekiz farklı sedimanter kökenli kayalar ile yürütülen çalışmada TC ile spesifik enerji, normal kuvvet ve kesme kuvveti ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Tumaç vd. (2018) tarafından üç oluşum şeklini içeren 18 farklı doğaltaş ile yürütülen çalışmada, SE bağımlı değişkeni ve TC bağımsız değişkeni kullanılarak yapılan analizlerde, farklı kesme derinliklerinde herhangi bir fark olmadığı belirtilmiştir ($d = 1,5$ mm, $R^2 = 0,85$; $d = 2,5$ mm, $R^2 = 0,84$; $d = 3,5$ mm, $R^2 = 0,84$). Ancak, aynı veri setiyle FC ($d = 1,0$ mm, $R^2 = 0,67$) ve FN ($d = 1,0$ mm, $R^2 = 0,70$) ile yapılan analizlerde, daha düşük kesme derinliklerinde daha yüksek belirlilik katsayıları elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler, Tumaç vd. (2018) sonuçlarıyla tutarsızlık göstermektedir.

Tumaç (2014) tarafından yürütülen altı farklı sedimanter ve metamorfik doğaltaş ile yapılan çalışmada, kesme deneyleri 1,0-2,0 ve 3,0 mm kesme derinliklerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, SSH ile SE arasındaki en iyi sonuç 1,0 mm kesme derinliğinde $R^2 = 0,80$ olarak elde edilmiştir. FC ile yapılan analizlerde ise yine 1,0 mm kesme derinliğinde 0,95 belirlilik katsayısı ile en iyi sonuç elde edilmiştir. FN ile yapılan analizlerde ise en iyi sonuç 3,0 mm kesme derinliğinde 0,72 belirlilik katsayısı ile gözlemlenmiştir. Sadece sedimanter doğaltaşlar ile yürütülen bu çalışma, Tumaç (2014) tarafından ortaya atılan bulgular arasında SE ve FN ile olan ilişkiyi desteklemekte olup FC ile yapılan analizde ise karşıt bir görüş ortaya koymaktadır.

SONUÇLAR

Doğaltaş üretiminde verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek için üretimde kullanılan makinelerin doğru seçimi ve verimli kullanımı kritik öneme sahiptir. Boncuk/keski aşınması, enerji tüketimi ve keskiye etki eden kuvvetler, makine tasarımı doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir ve bu faktörlerin göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, doğrusal kazı deneylerinin doğaltaşlar üzerinde nasıl uygulanabileceği ele alınmış ve bu araştırmanın, gelecekte makine seçimi ve tasarımı, performans tahmini ve boncuk tüketimi gibi konularda kullanılabilmesi amacıyla bir temel oluşturması hedeflenmiştir.

Spesifik enerji üzerine farklı fiziksel-mekanik ve mineralojik-petrografik özelliklerle yürütülen çalışmada azalan kesme derinliğinde daha iyi sonuçlar elde edilmesi, deney setinin tasarlanırken düşük kesme derinliklerinin ele alınması gerektiğini vurgulamış olup çalışmada sadece sedimanter kökenli doğaltaşlar kullanıldığı gözardı edilmemelidir. En iyi sonuçlar yüzey sertliği testlerinde elde edilse de veri setindeki mikro ve makro özelliklerden dolayı çekme dayanımı, Cerchar aşındırıcılık indeksi, Shore Scleroscope sertliği, Schmidt çekici sertlik değeri ve toplam gözeneklilik oranlarının da öne çıktığı gözlemlenmiş ve ileriki araştırmalarda daha ayrıntılı bir şekilde ele alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Keskiye etki eden kuvvetler ile yürütülen analizlerde, normal kuvvet (FN) analizlerinde yüzey sertliği bağımsız değişkenlerinin en iyi değerleri verdiği ve sonuçların artan kesme derinliği ile arttığı gözlemlenmiştir. Ancak diğer özelliklerle elde edilen sonuçların incelenmesi sonucu, bağımsız değişkene bağlı olarak sonuçların belirsiz olduğu ve farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Kesme kuvveti (FC) bağımlı değişkeninde ise elde edilen sonuçların, FN’de elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiği ve bu sonuçların çalışmanın ilerleyen analizlerle doğrulanması gerektiği düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçların alt ve üst limitleri, Çizelge 1 ve 2’de belirtildiği gibi verilmiştir. Sonuçların bu veri aralığında geçerli olduğu ve veri setinin dışındaki değerlerde farklı bir davranış sergileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Doğaltaş üretim makineleri, kesme işlemini sürtünme prensibiyle gerçekleştirir ve kesme derinlikleri mikron boyutlarında yer almaktadır. Bu nedenle, doğrusal kesme deneylerinin doğaltaşlar üzerinde bir laboratuvar simülasyonu olarak kullanımının kısıtlı olabileceği düşünülmektedir. İleride gerçekleştirilecek çalışmalarda, deneylerde kullanılacak kesme işleminin arazidekine benzer derinliklere indirilebilecek bir tasarım üzerinde yoğunlaşılması önemlidir. Bu, veri setinde mevcut boşlukları dolduracak değerlerin elde edilmesi ve metamorfik ile magmatik doğaltaşların da analize dahil edilmesi gerekliliğini beraberinde getirmektedir.

TEŞEKKÜR

Çalışma ilk yazarın doktora tezinin bir bölümü olarak yer almaktadır. Yazarlar, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen MAG-112M860 ve 117M975 ve İTÜ BAP biriminin desteklediği ITU-MGA-2020-42534 kodlu projelerine teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR

ASTM D7625-10. (2010). Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using CERCHAR method. American Society for Testing Materials.

Balci, C., Bilgin, N. (2007). Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44 (3), 468–476. doi:10.1016/j.ijrmms.2006.09.001.

Balcı, C., Bilgin, N., Çopur, H., Tumaç, D. (2016). Bazı kayaçların kesilebilirliği araştırılarak yeni bir taşınabilir lineer kazı deney setinin geliştirilmesi. TÜBİTAK Proje Raporu 112M859 İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü.

Copur, H. (2010). Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47 (1), 104–120. doi:10.1016/j.ijrmms.2009.09.006.

Copur, H., Balci, C., Tumaç, D., Bilgin, N. (2011). Field and laboratory studies on natural stones leading to empirical performance prediction of chain saw machines. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48 (2), 269–282. doi:10.1016/j.ijrmms.2010.11.011.

EN 14205. (2003). Natural stone test methods – determination of Knoop hardness. Brussels Belgium: European Standard.

Howarth, D.F., Rowlands, J. C. (1986). Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotechnical Testing Journal*, 9 (4), 169–179. doi:10.1520/GTJ10627J.

ISRM. (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: R. Ulusay, J. Hudson, eds. Suggested methods prepared by the ISRM commission on testing methods, compilation arranged by the ISRM Turkish National Group. Ankara, Turkey: Kozan Ofset, 628.

Ozturk, C. A., Nasuf, E., Bilgin, N. (2004). The assessment of rock cuttability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 7, 397–403.

Polat, C. (2024). Mikro sertliğin ve dokusal özelliklerin doğaltaş kazılabilirliğine ve elmas boncuklu tel kesme makinelerinin seçimine etkisinin araştırılması. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Tumac, D. (2014). Predicting the performance of chain saw machines based on shore scleroscope hardness. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 47 (2), 703–715. doi:10. 1007/s00603-013-04165

Tumac, D., Copur, H., Balci, C. (2015). Doğaltaşların Dokusal Özelliklerinin Kesilebilirliğe ve Kırılabilirliğe Etkisinin Araştırılması. TÜBİTAK Proje Raporu 112M860, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü.

Tumac, D., Copur, H., Balci, C., Er, S., Avunduk, E. (2018). Investigation into the effects of textural Properties on cuttability performance of a chisel tool. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 51 (4), 1227– 1248. doi:10.1007/s00603-017-1376-y.

Tumac, D., Copur, H., Balci, C., Avunduk, E., Er, S. (2019). Doğaltaşların Arazi ve Laboratuvarında Delinebilirliğine Etki Eden Mineralojik, Petrografik ve Dokusal Özelliklerinin Araştırılması. TÜBİTAK Proje Raporu 117M975. İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü.

Türk Standartlar Enstitüsü. (2007). Doğaltaşlar–Deney yöntemleri–Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini TS EN 1936.

Türk Standartlar Enstitüsü. (2019). Doğaltaşlar Deney yöntemleri Petrografik İnceleme TS EN 1240.

ÜÇKUYU KÖYÜ (BEKİLLİ, DENİZLİ) MERMERLERİNİN FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİ'NİN MİNERALOJİK-PETROGRAFİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ İLE BİRLİKTE DEĞERLENDİRİLMESİ

*EVALUATION OF THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF ÜÇKUYU VILLAGE
(BEKİLLİ, DENİZLİ) MARBLES TOGETHER WITH THEIR MINERALOGICAL-PETROGRAPHIC
AND CHEMICAL PROPERTIES.*

A. Kahya¹

¹*Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, asuman27@gmail.com*

ÖZ

Bu çalışma ile Bekilli İlçesinin (Denizli İli) Üçkuyu köyünde yer alan, HP Mermer Ltd. Şti. tarafından işletilen ve ticari adı Sea Pearl (Uşak Beyazı) olan mermer ocağından alınan numunelerin mineralojik-petrografik, fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Çalışma alanı Menderes Masfinin Paleozoyik-Erken Tersiyer yaşlı örtü kayalarına ait mermerlerde yer almaktadır. X-Işını Difraktometre (XRD) analiz sonuçlarına göre yapılan yarı kantitatif hesaplamalara göre çoğunlukla kalsit, çok az dolomit ve kuvars içerdiği belirlenmiştir. Mineralojik-petrografik incelemelere göre kayaçta granoblastik doku ile genellikle orta-küçük kristalli, özşekilsiz kalsit minerallerinin yaygın olduğu belirlenmiştir. Çalışma alanındaki mermerlerin fiziksel özelliklerinden olan birim hacim ağırlığı $2,734 \pm 0,001 \text{ gr/cm}^3$, atmosfer basıncında ağırlıkça su emme oranları $\%0,042 \pm 0,004$, doluluk oranı ise $\%98,41$ olarak belirlenmiştir. Bekilli mermerlerinde yapılan mekanik deneylerden, tek eksenli basınç dayanımı $103,3 \pm 9,3 \text{ MPa}$, eğilme dayanımı $15,4 \pm 0,5 \text{ MPa}$, böhme aşınma dayanım değerleri ise $9,82 \pm 0,49 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ 'dir. Mermer örneklerinin ana oksit element analiz sonuçlarının ortalama SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO değerleri sırasıyla $\%2,7$, $\%0,95$, $\%50,97$, $\%2,22$ dir. Bu değerlerden hesaplanan CaCO_3 değeri ise $\%90,98$ olarak belirlenmiştir. Sonuçlar TS EN 12057, TS EN 12058, TS EN 1468 ve TS EN 1469'a göre değerlendirildiğinde kaplama taşı ve doğal yapı taşı olarak kullanımı için gerekli fiziksel ve mekanik özellikleri sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mermer, Uşak beyazı, Fizikomekanik özellik, Yapı taşı, Bekilli, Üçkuyu

ABSTRACT

In this study determined the mineralogical-petrographic, physico-mechanical, and chemical properties of the samples taken from the marble quarry which located in Üçkuyu village of Bekilli District (Denizli Province) and operated by HP Marble Co. Ltd., and commercially named Sea Pearl (Uşak White). The study area is located in the marbles of the Paleozoic-Early Tertiary aged cover rocks of the Menderes Massif. Based on semi-quantitative calculations made from X-ray diffractometer (XRD) analysis results, it was determined that it contains mostly calcite, very little dolomite, and quartz. According to mineralogical petrographic studies, it was determined that granoblastic texture and generally medium-small crystalline, anhedral calcite minerals were common in the rock. From the physical properties of the samples, it was determined that the unit volume weight value was $2,734 \pm 0,001 \text{ g/cm}^3$, the water absorption rate by weight was $\%0,042 \pm 0,004$, and the filling rate value was $\%98,41$. From the mechanical tests performed on Bekilli marbles, the uniaxial compressive strength values are $103,3 \pm 9,3 \text{ MPa}$, bending strength is $15,4 \pm 0,5 \text{ MPa}$, Böhme abrasion resistance values are

9,82±0,49 cm³/50cm². The average SiO₂, Fe₂O₃, CaO, and MgO values of this marble samples' main oxide element analysis results are 2,7 %, 0,95%, 50,97%, and 0,22% respectively. The CaCO₃ value calculated from these values is 90,98%. The results have been determined that it provides the required physical and mechanical properties, including facing stone and natural building stone according to TS EN 12057, TS EN 12058, TS EN 1468, and TS EN 1469.

Keywords: Marble, Sea Pearl, Physico-mechanical properties, Building stone, Bekilli, Üçkuyu.

GİRİŞ

Türkiye, Alp-Himalaya kuşağı üzerinde yer alması nedeniyle, dünyanın en zengin doğaltaş rezervlerine sahip ülkelerinden biridir. Ülke genelinde farklı renk, desen, doku ve kalitede mermer çeşitleri bulunmakta olup mermer rezervlerinin büyük bir bölümü Afyonkarahisar, Balıkesir, Muğla, Eskişehir, Denizli, Elazığ, Tokat, Çanakkale, Konya, Bilecik ve Kırşehir illerinde yoğunlaşmıştır. Bu bölgelerde faaliyet gösteren çok sayıda küçük ve orta ölçekli işletme, doğaltaş ve mermer işleme alanında üretim yapmaktadır (Maden Mühendisleri Odası, Doğaltaş ve Mermer Raporu). Bu çalışmanın örnekleme alanı, Denizli ili Bekilli ilçesine bağlı Üçkuyu Köyü sınırlarında yer alan ve HP Mermer Ltd. Şti. tarafından işletilen mermer ocağıdır. Ocaktan çıkarılan mermerin ticari adı Sea Pearl (Uşak Beyazı) olarak bilinmektedir. Çalışma kapsamında, bu mermer ocağından alınan numunelerin mineralojik-petrografik, fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler TS EN standartları ile karşılaştırılarak, söz konusu mermerin kaplama taşı ve doğal yapı taşı olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Materyal ve Metot

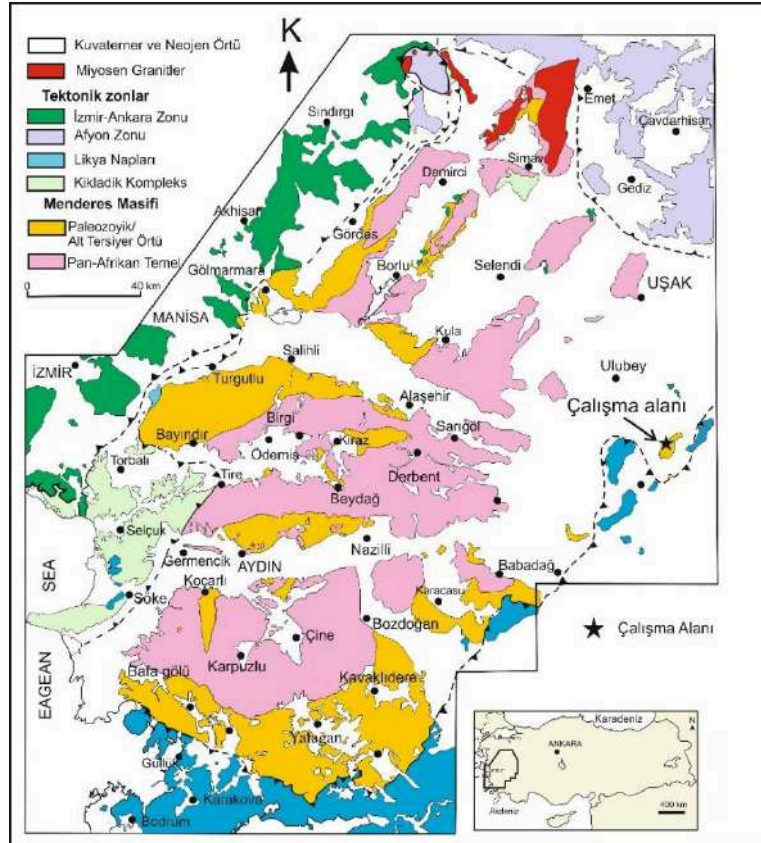
Üçkuyu köyü mermer ocağından mineralojik-petrografik ve jeokimyasal analizler için örnekler, açık ocak işletmesinden alınmıştır. Fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik testler, ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak Süleyman Demirel Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Doğaltaşlar Teknolojisi Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır. Mineralojik tanımlamalar, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı, Mineraloji ve Petrografi Araştırma Koordinatörlüğü bünyesinde bulunan Leica DM4P model polarizan mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Mermerlerin mineralojik bileşimini belirlemek amacıyla yapılan XRD analizleri ise aynı kurumun X-Işınları Laboratuvarı'nda, Bruker D8 Advanced cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, 40 kV jeneratör voltajı ve 40 mA akımda çalışan Cu anotlu difraktometre; gonyometre 2θ değerleri 0,04 s/step tarama hızında 4° ila 70° arasında değiştirilerek yapılmıştır. Toplam beş adet mermer örneğinin ana oksit içerikleri, MTA'nın Jeokimya Laboratuvarı'nda X-ışını floresans (XRF) yöntemiyle analiz yaptırılmış olup ateşte kayıp (Loss on Ignition-LOI) değeri, gravimetrik olarak 1050 °C de yapılmıştır.

Çalışma Alanının Jeolojisi

Çalışma alanı, Batı Anadolu'da yer alan ve Türkiye'nin en önemli tektonik birimlerinden biri olan Menderes Masifi içerisinde yer almaktadır. KD-GB (kuzeydoğu-güneybatı) doğrultusunda uzanan yaklaşık 200 x 300 km boyutlarındaki Menderes Masifi, bölgenin en büyük kabuksal segmentlerinden birini oluşturmaktadır. Bu kristalin kompleks, güneyde Likya napları, kuzey ve kuzeybatıda İzmir-Ankara Zonu ile Kikladik Kompleks'in Türkiye'deki uzantıları tarafından tektonik olarak üzerlenmiştir. Doğu kesimlerinde ise Neojen yaşlı tortul ve volkanik birimler ile örtülmektedir.

Menderes Masifi, iki ana kaya topluluğundan oluşmaktadır: (i) Pan-Afrikan yaşlı temel kayalar ve (ii) Paleozoyik-Erken Tersiyer yaşlı örtü serileri (Dora vd., 1995). Pan-Afrikan temel kayaları, Geç

Proterozoyik yaşı (Koralay vd., 2003) kırıntılı metasedimentlerden meydana gelmektedir. Örtü serileri ise kendi içinde Paleozoyik ve Mesozoyik-Alt Tersiyer yaşı kayalar olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Paleozoyik yaşı birimler çoğunlukla kuvarsit, fillit ve mermerlerden oluşurken (Konak vd., 1987), Mesozoyik-Alt Tersiyer yaşı birimler, metakonglomera arakatkılı şistlerle başlayıp, geçiş zonu içerisinde yer alan zımpara mercekli platform türü kalın metakarbonatlara dönüşmektedir. Bu karbonat birimler, pelajik mermerlerle örtülmekte ve istif, metaolistostromlar ile sonlanmaktadır (Dora vd., 1995; Konak vd., 1987). Çalışma alanı Menderes Masifinin Örtü serilerinden Paleozoik serilere ait mermerlerde yer almaktadır (Şekil 1).

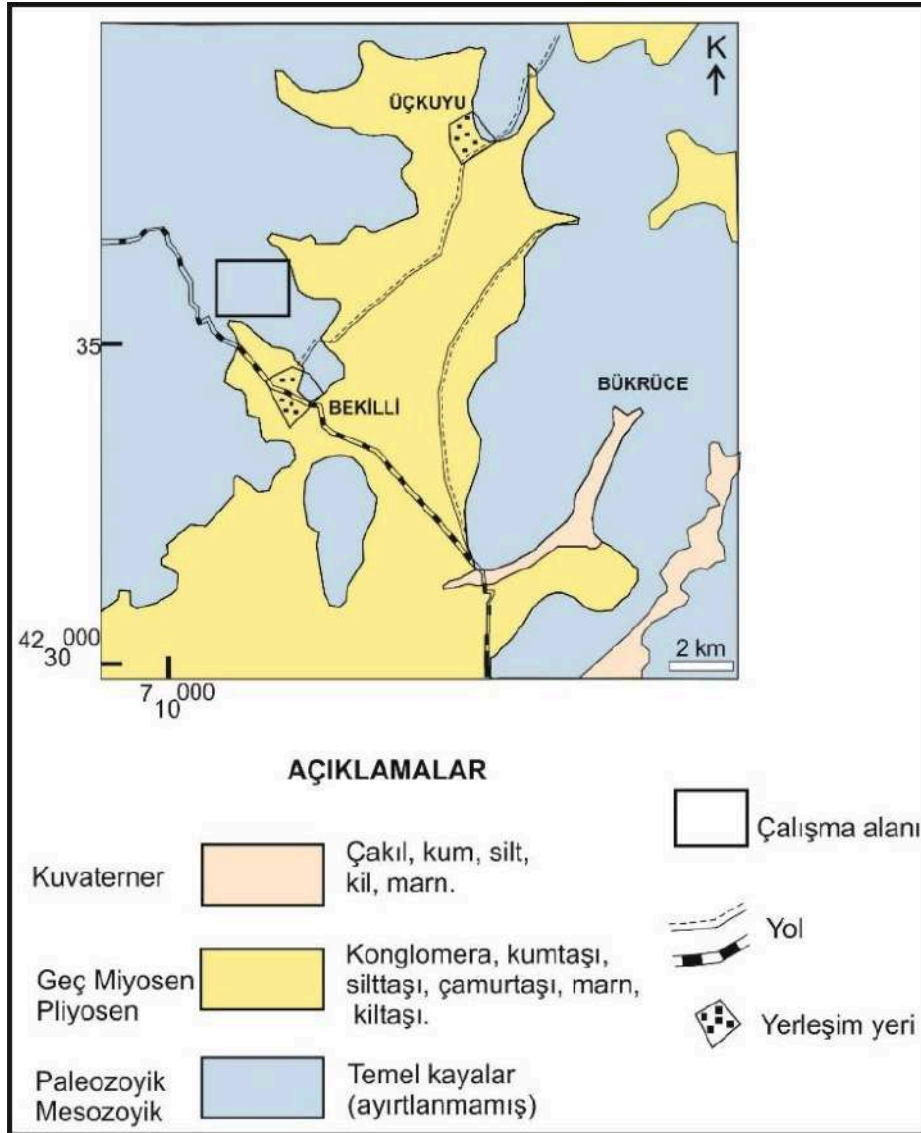


Şekil 1. Menderes Masif'inin basitleştirilmiş bölgesel jeoloji haritası (Candan ve Dora, 2001)

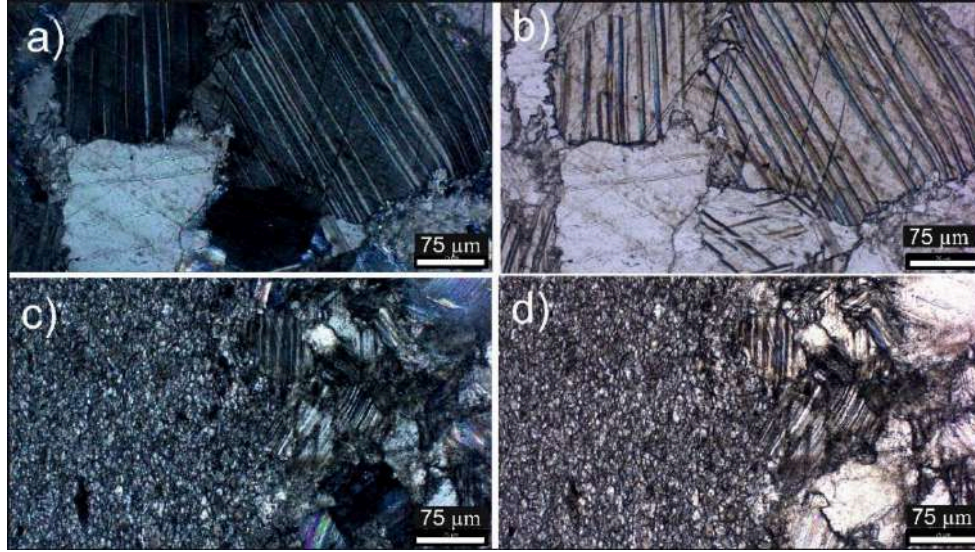
Çalışma alanı ve çevresinde Menderes masifinin sadece örtü metamorfikleri yer almaktadır ve bunların ayrıntılı özellikleri Öztürk (1981) ve Konak vd. (1986) tarafından yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Konak vd. (1986), Menderes masifinin örtü kayalarını Bekilli Grubu adı altında altı formasyona ayırarak incelemişlerdir. Bu formasyonlar alttan üste doğru, Ortaköy formasyonu, Paşapınar formasyonu, Karahallı formasyonu, Bükrüce formasyonu, Gömce formasyonu ve Şalvan Formasyonu'dur. Çalışma alanı bu formasyonlardan Paşapınar formasyonunda yer almaktadır ve bu formasyon çalışma alanında Bekilli ve civarında yüzeylenmektedir (1/25.000 ölçekli L22c2 paftası). Stratigrafik olarak altta yer alan Ortaköy Formasyonu ile geçişli bir ilişki sunan Paşapınar Formasyonu, üstte ise Karahanlı Formasyonu kapsamındaki çörtlü mermer, kalsit, kuvarsit ve kuvarşist ardalanması ile sınırlı mermerler Paşapınar formasyonu ile tanımlanmıştır. Formasyon içerisinde yer alan kuvarsit ve kuvarşistlerin, üst düzeylerde karbonatlı birimlere geçiş göstermesi, şelf ortamında gerçekleşen bir sedimantasyonu işaret etmektedir. Altta formasyonların yaşları dikkate alındığında, Paşapınar Formasyonu'nun da Permien yaşı olduğu düşünülmektedir (Konak, 1987; Boyraz, 2011).

Petrografi

Makroskobik olarak beyaz renkli (White, N9, Geological Rock-Color Chart (2009) ve ince tanelidir. Mineralojik-petrografik incelemelere göre kayaçta granoblastik doku ile genellikle orta-küçük kristalli, özşekilsiz kalsit minerallerinin yaygın olduğu fakat yer yer çok ince taneli kalsit kristallerinin olduğu seviyelerin de olduğu belirlenmiştir (Şekil 3). Yaptırılan XRD analiz sonuçlarına göre yapılan yarı kantitatif hesaplamalara göre örneğin çoğunlukla kalsit, çok az dolomit ve kuvars içeriği belirlenmiştir. Bu ince taneli seviyelerin çok az dolomit ve kuvars içerdiği ve makroskobik olarak da gri renkli gözlendiği belirlenmiştir. Masif bir özellik gösteren kayaç mermer olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası (MTA 1/100.00 ölçekli jeoloji haritası ve Boyraz, 2011'den alınmıştır)



Şekil 3. Çalışma alanındaki mermerlerin polarizan mikroskopla belirlenen görüntüleri ve kalsit minerallerinin görüntüsü, c) ve d) ince taneli kalsit ve çok az dolomit içeren seviye (a), c), II. Nikol, b) d) I. Nikol)

Çalışma Alanındaki Mermerlerin Fiziksel, Mekanik ve Jeokimyasal Özellikleri

Çizelge 1’de çalışma alanındaki mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine ait ortalama değerler verilmiştir. Fiziksel özellikler arasında birim hacim ağırlığı, gerçek yoğunluk, su emme oranı, görünür porozite ve P-dalga hızı parametreleri incelenmiştir. Mermerlerin birim hacim ağırlığı ortalama 2,73 g/cm³ olarak belirlenmiş olup literatürde mermerler için bu değerin yaklaşık 2,70 g/cm³ olduğu belirtilmektedir (Akçakoca vd., 2003). Doğaltaşların yapıların dış kaplamasında kullanılabilmesi için ağırlıkça su emme oranının düşük seviyelerde olması istenir. Kayaçlarda ağırlıkça su emme değerinin yüksek olması porozitenin fazla olduğunu, boşluk ve mikro çatlakların yüksek olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, su emme oranının düşük olması mekanik özelliklerden biri olan basınç dayanımının yüksek olmasını desteklemektedir (Akçakoca vd., 2003). Çalışma alanındaki mermerlerin ağırlıkça su emme değerleri ortalama %0,04’tür (Çizelge 1). Porozite değeri ne kadar büyükse mermerin ağırlıkça su emme değeri de yükselmektedir. Ayrıca kristal boyutu da gözeneklilik değerine etki etmekte olup iri kristalli mermerlerde porozitenin daha yüksek olduğu bilinmektedir (Öztank ve Bacakoğlu, 2001). Çizelge 1’de görüldüğü üzere, mermerlerin etkin ortalama (görünür) porozite değeri %0,11’dir. Bu değer, Moos ve Quervain (1948) tarafından doğaltaşların porozite değerlerine göre yapılan sınıflandırmaya göre, çalışma alanındaki mermerlerin “Çok Kompakt” kayaç sınıfına girdiğini göstermektedir. Ayrıca, çalışma alanındaki mermerlerin P-dalga hızı ortalaması 6513 km/sn olarak belirlenmiş olup Matula vd. (1979)’nın kayaçların P-dalga hızı değerlerine göre sınıflandırmasına göre “Çok Yüksek Hız” kategorisinde yer aldığı belirlenmiştir.

Çizelge 1. Çalışma alanındaki mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri ve kullanılan standartlar

Testler	Standartlar	Sonuç
Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	TS EN1936	2.734±0.001
Gerçek Yoğunluk (gr/cm ³)	TS EN1936	2.720±0.005
Su Emme (Ağırlıkça) (%)	TS EN13755	0.042±0.004
Görünür Porozite (%)	TS EN1936	0.114±0.001
P-Dalga Hız (m/sn)	TS EN14579	6513±99
Tek eksenli Basınç Dayanımı (kg/cm ²)	TS EN1926	1143.102
Eğilme Dayanımı (kg/cm ²)	TS EN12372	164.17

Böhme Aşınma Dayanımı (cm ³ /50 cm ²)	TS EN14157	9.82
Don Sonrası Basınç Dayanımı (Mpa)	TS EN12371	95.6±8.4
Don Sonrası Kütle kaybı (-) (%)	TS EN12371	0.017±0.002

Çizelge 1’de çalışma alanındaki mermerlerinin deneysel çalışmalarla elde edilen mekanik özelliklerine ait ortalama değerler verilmiştir. İncelenen mekanik parametreler arasında tek eksenli basınç dayanımı, eğilme dayanımı, Böhme aşınma dayanımı, don sonrası basınç dayanımı ve don sonrası kütle kaybı bulunmaktadır.

Doğaltaşların basınç mukavemeti, taşın kullanım amacına bağlı olarak (döşeme, zemin, merdiven basamağı vb.) değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada incelenen Bekilli mermerlerinin ortalama tek eksenli basınç dayanımı 1143 kg/cm² olarak belirlenmiştir. Deere ve Miller (1966)’ın doğaltaşların tek eksenli basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması göre bu değer, mermerlerin “Yüksek Dirençli” kayalar sınıfında yer aldığını göstermektedir. Doğaltaşlar çoğunlukla belirli ebat ve kalınlıklarda levhalar biçiminde kullanıldıklarından eğilme dayanımları önemlidir. Çalışma alanındaki mermerlerin eğilmeye karşı dayanımlarının ortalama değeri 164,17 kg/cm²’dir. Çalışma alanındaki mermerlerinin ortalama hacimce sürtünme ile aşınma dayanımı ortalama 9,82 cm³/50cm² olduğu belirlenmiştir. Mermerlerin dış mekanlarda, özellikle sıcaklık farklarının yüksek olduğu bölgelerde kullanımı durumunda donma direnci önemli bir kriterdir. Mermerlerin yapıların dış mekanlarında kullanılabilmesi için don etkisine dayanıklı olmaları istenilir. TS 10449 standardına göre mermerlerin don sonrası basınç dayanımı değeri 30 MPa’dan büyük olmalı ve yine TS 10449 standardına göre yapı ve kaplama taşı olarak kullanılacak mermerlerin, don kaybı değeri %1’den küçük olmalıdır. Çalışma alanındaki mermer örneklerinin don sonrası basınç dayanımı 95,6 MPa, donma kaybı ise %0,017 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar çalışma alanındaki örneklerin TS 10449 standartlarına göre uygun olduğunu, don etkisinin yoğun olduğu bölgelerde güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.

Çalışma alanından alınan mermer örneklerine ait ortalama ana oksit element analiz sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Analizler sonucunda mermerlerin ortalama SiO₂, Fe₂O₃, CaO ve MgO içerikleri sırasıyla %2,70, %0,95, %50,97 ve %2,22 olarak belirlenmiştir. Bu oksit değerlerine dayanarak hesaplanan ortalama kalsiyum karbonat (CaCO₃) oranı ise %90,98’dir. Mineral kimyası açısından değerlendirildiğinde, SiO₂ miktarının artışı kayaların sertliğini artırmakta; MgO içeriğindeki yükselme ise kırılabilirliği artıran bir etken olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, Fe₂O₃ oranının artması mermerin renginin koyulaşmasına neden olmaktadır (Arık, 2011).

Çizelge 2. Çalışma alanındaki mermerlerin kimyasal analiz sonuçlarının ortalama değeri (%)

Örnek	MgO(%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O(%)	K ₂ O(%)	SO ₃ (%)	LOI(%)
Mermer	2.22	0.957	2.748	0.951	0.058	0.063	0.02	42.11

TARTIŞMA

Bu çalışmada, Denizli ili Bekilli ilçesi Üçkuyu Köyü’nde yer alan mermerlerin jeolojik, mineralojik, petrografik, fiziko-mekanik ve jeokimyasal özellikleri incelenmiş; kaplama taşı ve doğal yapı taşı olarak kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir. Türk Standartları Enstitüsü tarafından yayımlanan TS 1910, TS 2513 ve TS 10449 standartlarına göre, mermerin yapılarda kullanılabilmesi için birim hacim kütlelerinin en az 2,55 g/cm³ olması gerekmektedir. Çalışma alanına ait mermer örneklerinin birim hacim kütleleri ortalama 2,73 g/cm³ olarak ölçülmüş ve bu değer ilgili standartlarla uyumlu bulunmuştur. Porozite açısından değerlendirildiğinde, TSE 1910’a göre kaliteli mermerlerin porozite değeri en fazla %2 olmalıdır. Çalışma alanındaki örneklerin ortalama porozite değeri %0,11 olup Moos ve Quervain (1948) sınıflamasına göre “Çok Kompakt” kayalar sınıfına girmektedir.

Mermerlerin elastik özelliklerini yansıtan P-dalga hızı ortalama 6,513 km/sn olarak belirlenmiş ve bu değer, Matula vd. (1979) sınıflamasına göre “Çok Yüksek Hız” kategorisinde yer almaktadır. Mekanik özellikler açısından, mermerlerin ortalama tek eksenli basınç dayanımı 1143 kg/cm² olarak ölçülmüş olup Deere ve Miller (1966) sınıflamasına göre “Yüksek Dirençli” kayaç sınıfına karşılık gelmektedir. Bu değerler, TS 1910 (>500 kg/cm²), TS 2513 (>500 kg/cm²) ve TS 10449 (duvar kaplama >300 kg/cm², yer döşemesi >500 kg/cm²) standartlarının gerekliliklerini sağlamaktadır. Eğilme dayanımı açısından, ortalama 164,17 kg/cm² olan değer, TS 1910 ve TS 2513 (>50 kg/cm²) ile TS 10449 (>60 kg/cm²) sınırlarının üzerinde olup mermerin levha şeklindeki uygulamalarda da güvenli kullanılabileceğini göstermektedir. Aşınma direnci değerlendirmesinde, ortalama Böhme aşınma dayanımı 9,82 cm³/50 cm² olarak ölçülmüş ve bu değer, TS 1910 (zemin <15), TS 2513 (zemin <15, yol parkesi <10, bordür <10) ile TS 10449 (zemin <15, duvar kaplama <25) sınırları ile uyum göstermektedir. Bu da söz konusu mermerlerin zemin kaplamaları, yol parkeleri ve duvar kaplamaları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilirliğini desteklemektedir. Donma dayanımı açısından, don sonrası basınç dayanımı 95,6 MPa, don sonrası kütle kaybı ise %0,017 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, TS 1910 ve TS 2513’e göre <%5, TS 10449’a göre ise <%1 olması gereken kütle kaybı ve ≥30 MPa olması gereken don sonrası basınç dayanımı koşullarını sağlamaktadır. Bu da mermerlerin don etkisinin görüldüğü bölgelerde güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, Denizli ili Bekilli ilçesi Üçkuyu Köyü’nde yer alan mermerlerin mineralojik, petrografik, fiziko-mekanik ve jeokimyasal özellikleri belirlenmiş ve yapı taşı olarak kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, incelenen mermerlerin TS 1910, TS 2513 ve TS 10449 standartlarında belirtilen kriterleri karşıladığını göstermektedir. Özellikle düşük porozite (%0,11), yüksek tek eksenli basınç dayanımı (1143 kg/cm²), eğilme dayanımı (164,17 kg/cm²), düşük aşınma miktarı (9,82 cm³/50 cm²) ve donma etkisine karşı yüksek direnç (%0,017 kütle kaybı) gibi özellikleri sayesinde bu mermerlerin hem iç hem de dış mekanlarda kaplama taşı ve doğal yapı taşı olarak kullanılmaya son derece uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında HP Mermer Ltd. Şti. ile MTA Genel Müdürlüğü, Mineraloji Petrografi Araştırma Koordinatörlüğü’ne, ayrıca İncekesit Laboratuvarı, XRD Analizi Laboratuvarı ve Maden Analizleri Teknoloji Dairesine teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

Akçakoca, H., Uysal, Ö., Topal, İ. (2003). Mermerlerin Kalite Kontrol Süreci Açısından Tekno-Mekanik Özelliklerinin Önemi. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (Mersem 2003) Bildiriler Kitabı, 18-19.

Arık, S. (2011). Finike (Antalya) Beydağları formasyonunun mermer olarak kullanılabilirliği ve ekonomik önemi (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 88, Türkiye.

Boyras, S. (2011). Denizli yöresi (Çal, Çivril, Baklan) neojen yaşlı eski toprakların (Paleosol) sedimentolojisi, Güneybatı Anadolu, Türkiye / Sedimentology of neogene paleosols in Denizli area (Çal, Çivril, Baklan), SW Anatolia, Turkey. 295.

Candan, O., Dora, O. Ö., Oberhänsli, R., Çetinkaplan, M., Partzsch, J. H., Warkus, F. C., RR, S. D. (2001). Pan-African high-pressure metamorphism in the Precambrian basement of the Menderes Massif, western Anatolia, Turkey. International Journal of Earth Sciences, 89(4), 793-811.

Deere, D. U., Miller, R. P. (1966). Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. Air Force Weapons Laboratory, Technical Report, AFWLTR-65-116. University of Illinois.

Dora, O. Ö., Candan, O., Dürr, S. T., Oberhaensli, R. (1995). New evidence concerning the geotectonic evolution of the Menderes Massif. International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Region, Abstracts, 13-14.

Konak, N., Akdeniz, N., Çakır, H. (1986). Çal-Çivril Karahallı Dolayının Jeolojisi. MTA Rapor No: 8945.

Konak, N., Akdeniz, N., Öztürk, E. M. (1987). Geology of the south of Menderes Massif, I.G.C.P. project no:5, Correlation of Variscan and pre-Variscan events of the Alpine Mediterranean mountain belt, field meeting. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, (107), 42-53.

Koralay, O. E., Dora, O. Ö., Candan, O., Chen, F., Satir, M. (2003). Menderes Masifindeki paragnayların ilksel çökelme yaşına tek zircon 207Pb/206Pb evaporasyon jeokronolojisi yöntemiyle yaklaşım. 56th Geological Congress of Turkey, Abstracts, 64-65.

Matula, M., Dearman, W. R., Golodkovskaja, G. A., Pahi, A., Radbruch-Hall, Dorothy H. (1979). Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: Rock and soil materials. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 19(1), 364-371.

Moos, A., Quervain, F. (1948). Technische Gesteinskunde. Verlag Birkhauser.

Öztank, N., Bacakoğlu, T. F. (2001). Mermer-Kireçtaşı ve Konglomeraların Yapılarda Kullanımını Denetleyen Parametreler. Türkiye III. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 123-131.

Öztürk, A. (1981). Homa-Akdağ (Denizli) Yöresinin Stratigrafisi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 24(1), 75-84.

TSE EN 1926. (2000). Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri: Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini (TS EN 1926), Türk Standartları Enstitüsü.

TSE EN 1936. (2010). Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri: Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini (TS EN 1936), Türk Standartları Enstitüsü.

TSE EN 12371. (2003). Doğaltaşlar-Deney metotları-Dona Dayanım Tayini (TS EN 12371), Türk Standartları Enstitüsü.

TSE EN 13161. (2009). Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri: Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımının Tayini (TS EN 13161), Türk Standartları Enstitüsü.

TSE EN 13755. (2014). Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri: Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini (TS EN 13755), Türk Standartları Enstitüsü.

TSE EN 14157. (2005). Doğaltaş-Aşınma Direncinin Tayini (TS EN 14157), Türk Standartları Enstitüsü.

TSE EN 14579. (2006). Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri: Ses Hızı İlerlemesinin Tayini (TS EN 14579), Türk Standartları Enstitüsü.

TSE (1997a). Kaplama Olarak Kullanılan Doğaltaşlar (TS 1910), Türk Standartları Enstitüsü.

TSE (1997b). Doğal Yapı Taşları (TS 2513), Türk Standartları Enstitüsü.

TSE (2004). Mermer-Kalsiyum Karbonat Esaslı-Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan Tadil 1 (TS 10449/T1), Türk Standartları Enstitüsü.

DOĞALTAŞ (MERMER) SEKTÖRÜ İÇİN YENİ BİR KAYNAK VE REZERV RAPORLAMA YÖNTEMİ

A NEW RESOURCE AND RESERVE REPORTING METHOD FOR DIMENSION STONE (MARBLE) SECTOR

Bahtiyar Ünver

Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

ÖZ

Türkiye, sahip olduğu doğaltaş rezervlerinin hacmi ve jeolojik çeşitliliği bakımından dünyanın önde gelen ülkelerinden biri olarak, madencilik sektöründe stratejik bir konuma sahiptir. Sektörün ekonomik büyüklüğünü ortaya koyan 2022 yılı verileri, bu konumu teyit eder niteliktedir. Nitekim, ülkenin 6,5 milyar ABD Doları tutarındaki toplam maden ihracatının %30'undan fazlasını teşkil eden doğaltaşlar, 2,1 milyar ABD Dolarlık ihracat hacmiyle metalik madenlerin hemen ardından gelerek ikinci sırada yer almaktadır. Bu ihracat portföyünün yaklaşık %60 gibi önemli bir kısmını ise katma değeri yüksek, işlenmiş mermer ve traverten ürünleri domine etmektedir. Bu veriler ışığında, sektörün küresel rekabet gücünün ve sürdürülebilirliğinin temini, başta mermer olmak üzere doğaltaş üretim süreçlerine yenilikçi teknolojilerin ve bilimsel yöntemlerin entegrasyonunu zorunlu kılmaktadır. Zira günümüzde yeraltı kaynaklarının rasyonel ve verimli yönetimi, evrensel bir ilke olarak kabul görmektedir. Bu doğrultuda, maden yataklarının aramadan üretimine uzanan tüm madencilik faaliyet zincirinde teknolojik uygulamaların rolü, giderek artan bir ivme kazanmaktadır. Bu teknolojiler arasında öne çıkanlardan biri, jeolojik ve maden varlıklarının üç boyutlu (3B) modellenmesidir. Bu yöntem, son yıllarda metalik ve endüstriyel hammadde madenciliğinde bir "altın standart" olarak kabul görmüştür. Benzer şekilde, mermer ve diğer doğaltaş ocaklarının planlanması, üretim verimliliğinin maksimize edilmesi ve kaynak kayıplarının en aza indirilmesi amacıyla, bu ileri modelleme teknolojisinin adaptasyonuna yönelik akademik ve endüstriyel araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Mermer ocağı işletmeciliğinde karşılaşılan en temel zorluklardan biri, blok verimliliği olarak da tanımlanan üretim randımanının düşüklüğüdür. Birim hacimdeki bir kayaç kütesinden elde edilebilen net ebatlanmış blok hacminin yüzdesi olarak ifade edilen bu verimliliğin optimize edilmesi, Türkiye'nin zengin mermer kaynaklarının ekonomik potansiyelini maksimize etmek ve en yüksek katma değeri yaratmak açısından kritik bir öneme sahiptir. Literatürdeki ve endüstriyel uygulamadaki önemli bir eksiklik, doğaltaş ve mermer sektörüne özgü, uluslararası kabul görmüş bir kaynak ve rezerv raporlama standardının bulunmamasıdır. Bu boşluğu doldurmak amacıyla, metalik madenler için geliştirilmiş olan JORC ve onun Türkiye'deki uyarlaması olan UMREK kodlarının prensipleriyle uyumlu, doğaltaş sektörüne özel yeni bir metodoloji geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yenilikçi yöntem, Türkiye mermer sektörünün önde gelen kuruluşlarından Alacakaya Firmasına ait altı farklı sahada başarıyla pilot olarak uygulanmış ve bu sahalar için uluslararası standartlara uygun Kaynak ve Rezerv raporları hazırlanmıştır.

Bu bildirinin kapsamı, geliştirilen bu özgün metodolojinin ana hatlarını ve pilot uygulama sahalarından elde edilen somut sonuçları sunmaktır. Nihai hedefimiz, önerilen bu yöntemin, küresel ölçekte doğaltaş işletmeciliği için bir standart teşkil etmesi ve Maden Kaynak ve Rezerv raporlamasında evrensel bir referans haline gelmesidir. Bu bildirinin bir kısmı İMCET2023'de sunulmuş olmasına rağmen mermer sektörü tarafından daha iyi incelenebilmesi açısından kaynak ve rezerv kestirimi kısımları eklenerek MERSEM2025'e sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Doğaltaş, Mermer, JORC, UMREK, Kaynak ve Rezerv raporlama

ABSTRACT

Marble industry, which is in a good condition in terms of quantity and product range, has a very important place in the Turkish mining industry. According to the mineral export data of 2022, natural stone comes after metal mines with a share of over 30% with 2,1 billion USD in a total of 6,5 billion USD for the whole industry. Approximately 60% of natural stone exports consisted of processed marble and travertine. Therefore, it is important to use new technologies and methods for the development of production in natural stone industry, especially marble. In today's world, efficient use of underground resources has a strategic importance. For this purpose, information technologies are commonly used in all processes from resource exploration to mine production. 3-D modeling of mining assets is one of these technologies and has been widely used in metallic and non-metallic mines in recent years. In a similar way, in marble industry, research is carried out to use this technology in production. The operational efficiency in marble quarries (defined as the percentage of the total volume of sized blocks obtained from a rock mass of one hundred units volume) is quite low. It is very important to produce the marble resources of our country by means of the highest added value with maximum productivity. There is no any internationally recognized standard code for resource and reserve reporting in natural stone and marble industry. Therefore a method is developed for international usage and applied at 6 different marble quarries of a company which is one of the leading companies in Turkish marble industry. In this paper, the results of the study conducted for efficient marble production are presented. The developed method in this study is expected to establish a standard for Resource and Reserve reporting in natural stone industry.

Keywords: Dimension stone, Marble, JORC, UMREK, Resource and reserve reporting

GİRİŞ

Mermer ocaklarında blok üretiminin verimliliğini ve ekonomikliğini tayin eden en kritik jeolojik parametre, kaya kütlesi içerisindeki süreksizliklerin (kırık, çatlak, eklem vb.) sayısı, yönelimi ve karakteristik özellikleridir. Bir doğaltaşın ticari değer kazanabilmesi, şüphesiz, pazarlanabilir estetik nitelikler olan özgün doku ve desen özelliklerine sahip olmasına bağlıdır. Her ne kadar yüksek ticari değere sahip materyallerden, küçük boyutlu parçaların birleştirilmesiyle katma değer yaratılması mümkün olsa da, sektörün temel ekonomik dinamiği; estetik ve kalite nitelikleri ne denli üstün olursa olsun, kayacın ocaktan belirli standart boyutlarda, hasarsız veya minimum hasarla bloklar halinde çıkarılıp işleme tesislerine sevk edilebilmesine dayanmaktadır. Bu temel gereklilik, bir doğaltaş sahasının işletme potansiyelini değerlendirirken süreksizlik analizini, projenin en kritik aşaması haline getirmektedir. Zira bu jeo-yapısal analizler, henüz üretim başlamadan sahadan elde edilebilecek potansiyel blok boyut ve hacimlerinin güvenilir bir şekilde öngörülmesini sağlar. Dolayısıyla, mevcut süreksizlik ağının geometrisine göre optimize edilmiş ve bu sayede maksimum verim ve kalitede blok elde edilmesini hedefleyen rasyonel kesim planlarının oluşturulmasına olanak tanır.

Mevcut literatür incelendiğinde, doğaltaş sahalarının jeolojik ve ekonomik potansiyelini değerlendirmeye yönelik çeşitli çalışmaların varlığı görülmektedir. Örneğin, Cosi (2015), doğaltaş kalitesini nicel olarak tanımlamak amacıyla sondaj verilerine dayalı bir metodoloji önermiş; bu metodolojiyi renk, doku, tane boyutu, kusurlu zonların varlığı ve bu parametrelerin hacimsel dağılımı olmak üzere beş temel parametre üzerine inşa etmiştir. Benzer şekilde, Yarahmadi et al. (2018) tarafından yürütülen bir başka çalışma ise, bir mermer sahasındaki süreksizlik ağını modelleyerek, üretim bloklarının boyutlarını optimize etme ve bu yolla işletme verimliliğini artırma konusuna odaklanmıştır. Ancak, literatürdeki bu ve benzeri değerli çalışmaların, genellikle problemin spesifik bir yönüne (kalite tanımlaması, üretim optimizasyonu vb.) odaklandığı ve hiçbirinin, uluslararası standartlarla uyumlu, tam ölçekli bir mermer Kaynak ve Rezerv raporlaması için bütüncül bir metodoloji sunmadığı tespit edilmiştir. Literatürdeki bu bariz boşluktan hareketle mevcut çalışma, doğaltaş

ocaklarının jeolojik-mühendislik özelliklerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi, blok verimliliği ve kalitesinin öngörülmesi ve en önemlisi, uluslararası kabul görececek bir Maden Kaynak ve Rezerv raporlama standardının temelini oluşturacak kapsamlı bir metodoloji geliştirmek amaçlanmıştır.

Uluslararası diğer kodlardan farklı olarak Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonunca yayımlanmış Ulusal Maden Kaynak ve Maden Rezerv Raporlama Kodunda (UMREK-2023) verilen “Ek 7-Doğal (Boyutlandırılabilir) Taşlar, Sanatsal ve Dekoratif Taşların Arama Sonuçları, Maden Kaynak ve Maden Rezervlerinin Raporlanması” bölümünde Doğaltaş Kaynak ve Rezerv kestirimleri için dikkate alınması gereken faktörler tanımlanmıştır. Bu bölümün hazırlanmasında Prof.Dr. T. Onargan’ın özel katkısı kayda değerdir. Bir mermer sahasındaki kaynak miktarının; ayrıntılı ölçüm, analizler ve değerlendirme çalışmaları neticesinde belirlenebileceği belirtilmektedir. Ancak sahada yapılacak ölçüm, analiz ve değerlendirmelerin neler olacağı konusunda açıklayıcı bilgi verilmemektedir. Bununla birlikte mermer kaynağı belirlendikten sonra hangi dönüştürücü faktörlerin kullanılarak mermer rezervinin ortaya koyulacağı açıklanmaktadır. UMREK (2023)’te verilen bu kısım aşağıdaki gibidir:

“Doğaltaşın kalitesi, süreksizlikler tarafından ayrılan blokların boyutları ve blokların tesiste kesilerek satılabilir ürün haline getirilebilme potansiyeli dikkate alınarak sahadaki mermer potansiyeli belirlenebilir. Bu potansiyel üzerinde yapılacak olan ayrıntılı ölçüm, analiz ve değerlendirme çalışmaları neticesinde mermer kaynağı ortaya koyulabilir. UMREK (2023) tarafından mermer kaynağından mermer rezervinin tespitine yönelik olarak yapılacak olan ayrıntılı çalışmada aşağıda belirtilen faktörlerin ortaya konulması istenmektedir:

1. SAF (Süreksizlik Açıklığı Faktörü, %): Hedef kayadaki eklem, boşluk ve mağaraların açılmasıyla oluşan açıklıklar/boşluklar nedeniyle var olmayan hedef kayanın hacimsel yüzdesi. Bu açıklıklar direkt karstlaşma ile gelişmez.
2. KF (Karstlaşma Faktörü, %): Eriyebilen kayalarda karstik boşlukların tahmini hacim yüzdesi (saha incelemeleri, karotlu sondaj loglarından ve gerektiğinde jeofizik yöntemler ile üretilecek).
3. ME (Mineral Etki Faktörü, %): Taşın işlenmesini olumsuz etkileyen minerallerin dağılımı.
4. AF (Ayrışma Faktörü, %): Ayrışmış kaya hacim yüzdesi (saha incelemeleri, karotlu sondaj logları ve gerektiğinde jeofizik yöntemler ile üretilecek).
5. MF (Madencilik Faktörü, %): Doğaltaş üretim planlamasına bağlı üretilemeyecek hacim yüzdesi (ocak şekline bağlı nihai şev tasarımı sonucu üretilmeden bırakılacak ve ekonomik olarak üretilemeyecek kaynak miktarının hacimsel oranı).
6. KAF (Kalite Faktörü, %): Üretimi hedeflenen doğaltaşın pazardaki talep edilen kalite (renk, taşın kullanımını olumsuz etkileyen minerallerin varlığı ve dağılımı, desen, kristal tane boyutu, doku, kusurlar vb. ile bunların sahadaki dağılımı) dışı üretimi hedef dışı bırakılabilecek hacimsel yüzde (belirlenebilmesi durumunda sahadaki kalite dağılımı, jeolojik harita ve kesitler ve/veya üç boyutlu kaynak modeli üzerinde verilmelidir).
7. EF (Eklem Faktörü, %): Üretimi planlanan doğaltaş rezervine ait hacimsel eklem takımı sayısı (Jv) ve buna bağlı hesaplanacak üretilebilir ticari blok hacmi (Vb) ve blok kazanım oranına bağlı olarak üretilemeyecek rezervin hacimsel oranı.”

Blok boyutlarının hesaplanmasına yönelik olarak farklı disiplinlerden araştırmacılar çeşitli deneysel çalışmalar yürütmüştür. Lato vd. (2007), LiDAR teknolojisi kullanılarak oluşturulan sayısal arazi modeli üzerinde, kaya yüzeylerinden elde edilen veriler aracılığıyla hacim dağılımlarının hesaplanmasına odaklanmıştır. Kluckner vd. (2015), kısa eklemelerin bulunduğu bir jeolojik yapıda eşit hacimli kaya bloklarının hesaplanmasına yönelik yöntemler geliştirmiştir. Barla (2019), bir tünel ortamında yer alan kama biçimli kaya bloklarının modellenmesi amacıyla lazer tarama ve fotogrametri tekniklerinden yararlanmıştır. Son olarak Kong et al. (2021), üç boyutlu nokta bulutu modeli üzerinden eklemli kaya çıkıntılarının ayrık çatlak ağı kullanılarak karakterizasyonunu gerçekleştirmiştir.

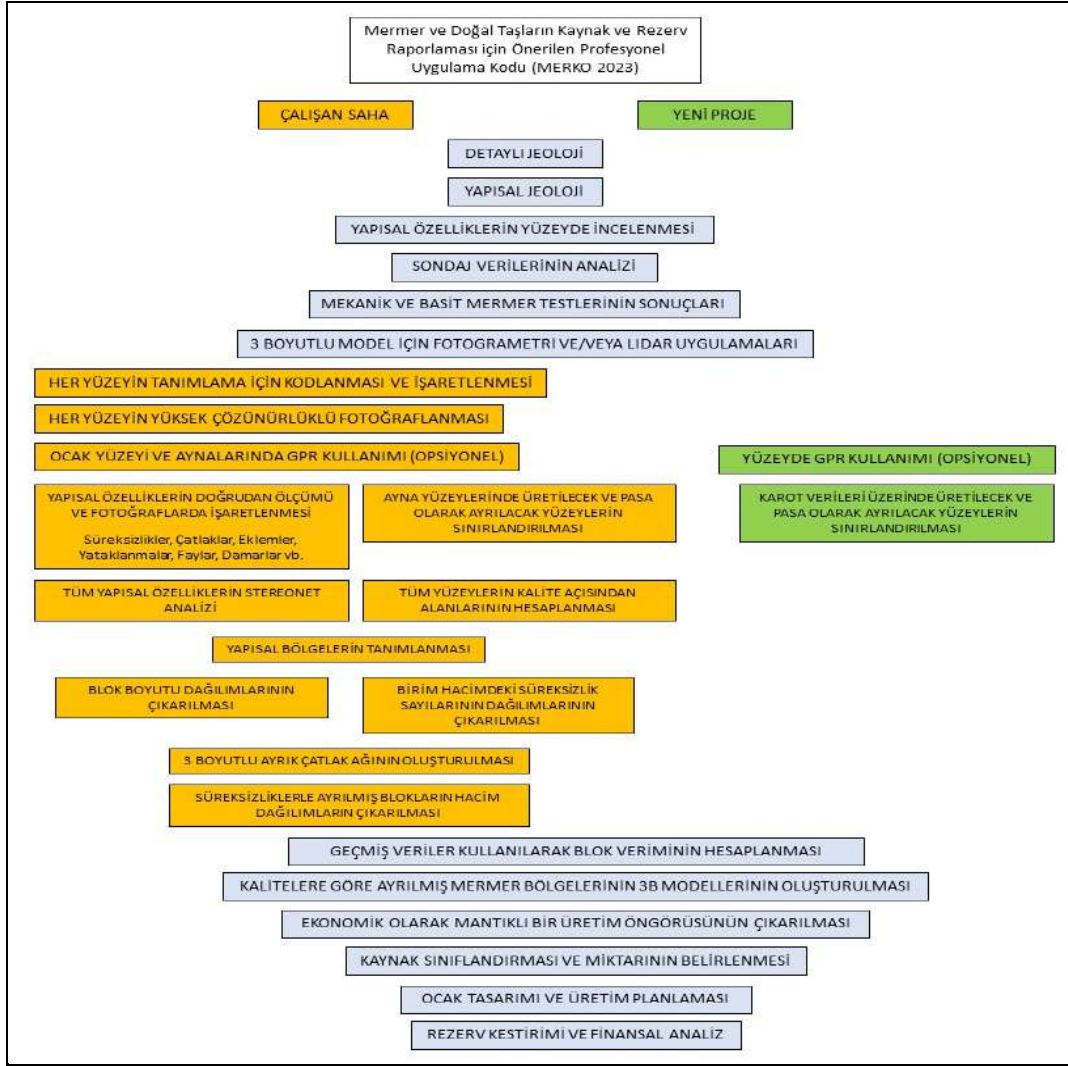
Mermer sahalarının kaynak ve rezerv tespiti açısından bu kavramları bütüncül biçimde ele alan standart bir çalışmaya uluslararası literatürde rastlanmamaktadır. Bu nedenle, hem Türkiye'nin doğaltaş kaynaklarının bilimsel ve ekonomik açıdan etkin biçimde değerlendirilmesi hem de uluslararası düzeyde örnek teşkil edecek bir metodolojik kılavuzun oluşturulması amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

YÖNTEM

Mermer ve doğaltaş ocaklarının kaynak ve rezerv raporlamasına yönelik olarak önerilen Profesyonel Uygulama Kuralları, kısaca Mermer Kodu (MERKO), mermer ve doğaltaş endüstrisinde güvenilir, tekrarlanabilir ve bilimsel temellere dayalı sonuçlar elde edilmesini amaçlayan bir prosedür ve yöntemler bütünüdür. Bu kod, sektörel uygulamalarda standardizasyonu sağlamak ve teknik doğruluğu artırmak üzere tasarlanmıştır.

Önerilen kodun temel adımlarını özetleyen bir akış şeması Şekil 1'de sunulmuştur. Geliştirilen sistem, hâlihazırda işletilmekte olan ocaklara doğrudan uygulanabilir nitelikte olmakla birlikte, henüz üretime geçmemiş yeni proje sahalarına da uyarlanabilir esneklikte yapılandırılmıştır. Akış şemasının sol tarafında yer alan adımlar, sistemin mevcut ve aktif ocaklara entegrasyonunu göstermektedir. Buna karşılık, henüz işletmeye açılmamış, bakir nitelikteki proje sahaları için akış şemasının sağ tarafında yer alan adımlar izlenmelidir.

İlk adım, sahanın ve çevrenin ayrıntılı jeolojisinin ve yapısal jeolojisinin uygun bir şekilde araştırılmasını içermektedir. Şartlar elverdiği oranda, sondaj karotlarının incelenerek yapısal özelliklerin belirlenmesine ilişkin ayrıntılı bir araştırma yapılmalıdır. Doğrudan yüzeyden, kazı aynalarından ve karotlardan elde edilen numuneler, öncelikle taşın doku, renk vb. açısından pazarlama potansiyelini, ikinci olarak da mukavemet, sertlik, aşındırıcılık, bozunma ve bozulmaya karşı direnç vb. fiziksel özelliklerini belirlemek için testlere tabi tutulmalıdır. Daha sonra fotogrametri veya LiDAR teknolojileri kullanılarak topografyanın sayısal arazi modeli elde edilmelidir. Genel yapıyı anlamak adına sahanın 3 boyutlu fotoğrafı sayısal arazi modeli üzerine yerleştirilerek görsel bir değerlendirme yapılmalıdır. Gözlemlenen tüm yapısal özellikler ve süreksizlikler model yüzeyi üzerine işaretlenmelidir. Böylece topografyaya uygun tüm özelliklerin 3B modeli elde edilmiş olacaktır. Yüzeyde gözlemlenen özelliklerin modeli, blok üretimi için mermer sınırlarının 3B modellemesi için bir şablon olarak kullanılacaktır. Yeni veya mevcut bir proje için çalışılırken, yeraltı yapısının değerlendirilmesi için sondaj verileriyle birlikte yer radarı (GPR) kullanılması da önerilmektedir. Süreksizlik özelliklerinin GPR verileriyle başarılı bir şekilde belirlenmesi mümkündür. Ayrıca GPR uygulamaları ile pasa bölgeleri ile birlikte çeşitli kalitedeki mermer bölgelerinin sınırları da belirlenebilmektedir. Blok veriminin belirlenmesi için benzer ocaklardan elde edilen blok verimlilik değerlerini kullanmak doğru olacaktır. Eğer sahada hesaplanan blok verimi ekonomik bir potansiyel ortaya koyuyorsa sahadaki kaynak miktarının belirlenmesi işlemine geçilebilir. Kaynak, blokların geometrisini ve hacim dağılımını etkileyen özelliklerin mekansal değişimi dikkate alınarak Ölçülmüş, Belirlenmiş ve Mümkün olarak kategorize edilmelidir. Güvenilir bir üretim planlamasının yapılması için muhtemel ocak sahasına ilişkin verilerin yeterli olduğuna karar verildikten sonra, süreksizlikler ve tüm çatlaklar dikkate alınarak üretim aşamalarının 3 boyutlu planları oluşturulur.



Şekil 1. Mermer ve Doğaltaş Kaynak ve Rezerv Raporlaması için önerilen yöntemin akış şeması

SAHADA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Siyah İnci mermer sahası, çalışmanın gerçekleştirildiği sırada aktif olarak faaliyet gösteren bir doğaltaş ocağı olup alanda kuzeye doğru eğimli, değişken tabaka kalınlığına sahip koyu gri-siyahtan açık griye değişen renk tonlarında killi kireçtaşları mevcuttur. Sahada üretilebilecek blok miktarını belirlemeye yönelik yapılan çalışmalar aşağıda sıralanmaktadır:

1. Sahada bulunan tüm süreksizliklere-kırıklar, çatlaklar, fay zonları ve tabakalanma düzlemleri-ilişkin eğim yönü ve eğim açısı ölçümleri gerçekleştirilmiş; bu veriler stereografik projeksiyon yöntemiyle analiz edilerek süreksizliklerin mekânsal dağılımı değerlendirilmiştir.
2. Kazı aynalarında gözlemlenen tüm süreksizliklerin süreklilik özellikleri ve eklem aralıkları ölçülmüş; elde edilen veriler doğrultusunda blok boyutu (V_b) ve birim hacimdeki eklem yoğunluğu (J_v) analizleri yapılmıştır. Bu parametrelerin istatistiksel dağılımları grafiksel olarak sunulmuş ve sahadaki blok üretim potansiyelinin değerlendirilmesine katkı sağlanmıştır.

3. Aynalarda gözlemlenen litolojik ve yapısal özellikler dikkate alınarak, üretilecek ürün kalitesine yönelik sınırlar belirlenmiştir. Bu kapsamda, farklı ürün türlerine uygun blok alınabilecek alanlar ile pasa olarak değerlendirilecek bölgeler ayrıştırılmış; her bir kategoriye ait yüzdelik oranlar hesaplanarak üretim planlamasına temel oluşturacak veriler elde edilmiştir.
4. Kırık ve çatlaklara ait eğim yönü ve eğim açısı verileri üç boyutlu sayısal model üzerinde analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda blok boyutu (V_b) dağılım grafiği oluşturulmuş; böylece sahadaki süreksizliklerin blok geometrisine etkisi görsel ve nicel olarak ortaya konmuştur.

Ocakta hâlen aktif üretim faaliyetleri devam etmekte olduğundan hem kazı aynalarında hem de üretim basamaklarının yüzeylerinde kırık-çatlak sistemleri, fay zonları, tabakalanma düzlemleri ve kalsit dolgulara ilişkin eğim yönü ve eğim açısı ölçümleri oldukça ayrıntılı biçimde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, cep telefonlarına entegre edilen özel bir uygulama aracılığıyla hızlı, güvenilir ve etkin bir şekilde yapılmıştır. Söz konusu uygulama, telefonun ölçüm alınacak yüzeye yerleştirilmesiyle, jeolog pusulası işlevi görerek tek dokunuşla eğim ve eğim yönü verilerinin kaydedilmesini sağlamaktadır. Uygulama ayrıca, ölçüm yapılan yüzeyin fotoğraflanmasına ve farklı türdeki süreksizliklerin uygulama arayüzünde tanımlanmasına olanak tanımaktadır. Ölçüm sürecinden önce, uygulamanın geleneksel jeolog pusulası ile kalibrasyonu sağlanmış; böylece veri güvenilirliği artırılmıştır. Bu yöntemle, yaklaşık 10 üretim basamağına ait kazı aynalarında gözlemlenen tüm yapısal unsurlar için toplamda 1889 adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Literatürde mermer sahalarında yapılmış benzer ölçüm çalışmalarında bildirilen veri sayılarının, bu çalışmada elde edilen ölçüm miktarıyla karşılaştırıldığında oldukça sınırlı kaldığı ifade edilebilir.

Blok ve Ürün Kalitesi Analizi

Kazı aynalarının yüzeyleri sahada yerinde incelenerek süreksizliklerin yoğunluğu ve dağılımı değerlendirilmiş; bu doğrultuda yüzeylerin hangi bölgelerinden blok üretiminin mümkün olabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, üretimi muhtemel bloklardan hangi kalite düzeyinde ürün gruplarının elde edilebileceği analiz edilmiştir. Bu değerlendirme sürecinde, sahayı yakından tanıyan ve ocakta ürün elde edilmesi konusunda saha tecrübesine sahip mühendislerin görüş ve algıları sistematik biçimde derlenerek karar sürecine entegre edilmiştir.

Süreksizliklerin konum ve karakteristiklerine bağlı olarak, blok üretimine uygun alanlar ile pasa olarak değerlendirilecek bölgeler ayrıştırılmıştır. Blok üretimine uygun görülen alanlardan elde edilecek ürünlerin kalite ve özellikleri ayrıca analiz edilmiştir. Bu kapsamda yapılan sınıflandırmalar ve kullanılan kodlar Çizelge 1’de sunulmaktadır. Renk ve doku özelliklerine göre, saha genelinde beş farklı ticari ürün grubunun üretilebildiği belirlenmiştir.

Çizelge 1. Ürün grubu ve kalite sınıfları ve kısaltmaları

Ürün grubu ve kalitesi	Pasa
BP1	W-BP1
BP2	W-BP2

MD

W-MD

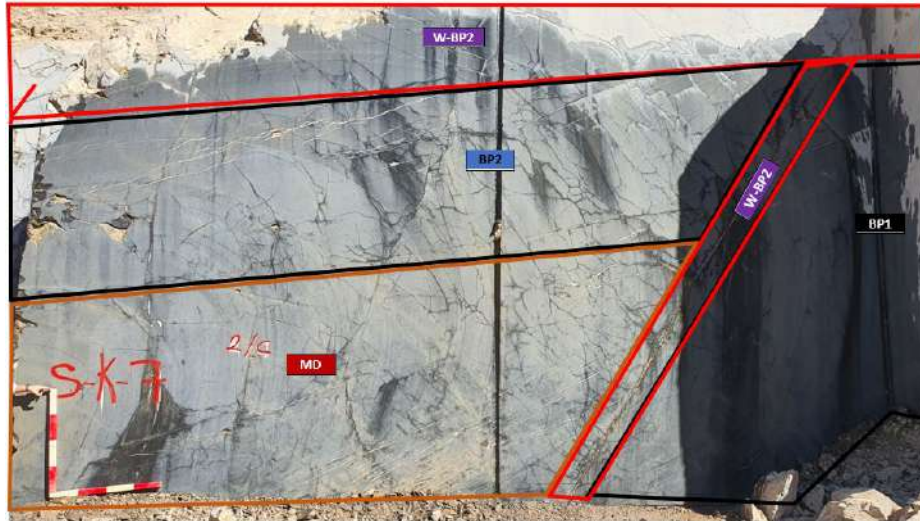
BJ

W-BJ

DG

W-DG

Öncelikle, ocaktaki tüm üretim basamakları ve kazı aynaları, sprey boyalar kullanılarak sistematik biçimde kodlanmıştır. Bu kodlama işlemi, sahadaki farklı ürün potansiyellerinin ve pasa bölgelerinin görsel olarak ayrıştırılmasını kolaylaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Kodlanmış yüzeylerin yüksek çözünürlüklü ve referans ölçekli fotoğrafları alınmış; böylece görsel verilerin sayısal analizlere uygun hale getirilmesi sağlanmıştır. Şekil 2’de, örnek bir üretim aynasında gerçekleştirilen sınıflandırma görsel olarak sunulmaktadır. İlgili şekilde, BP1, BP2, MD gibi blok üretimine uygun alanlar ile pasa olarak değerlendirilecek bölgelerin sınırları açık biçimde gösterilmiştir.



Şekil 2. Aynanın blok verme potansiyeli ve mermer ürün kalitesi

Fotoğraf çekim sürecinde kullanılan 1 metrelik ölçek çubukları sayesinde, kazı aynalarının her bir bölgesine ait yüzey alanları hassas biçimde hesaplanabilmektedir. Bu amaç doğrultusunda, elde edilen görüntüler ölçekli biçimde üç boyutlu grafik tasarım ortamına aktarılmış ve alan hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bir yüzey alanında hangi ürün grubunun ne oranda bulunduğu dair bilginin, ocak sahasının üretim potansiyelinin ve operasyonel performansının belirlenmesinde kritik öneme sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Homojen Yapısal Bölgeler ve Mermer Kalitesinin Ayna Yüzey Verilerinden Değerlendirilmesi

Yapılan saha çalışmaları sonucunda, ocağın farklı kesimlerinde benzer jeolojik ve yapısal özellikler sergileyen bölgelerin varlığı tespit edilmiştir. Bu bölgelerin sınırları detaylı biçimde tanımlanarak, ocak genelinde hangi alanlardan hangi kalite düzeyinde ve ne miktarda blok üretiminin mümkün olabileceği belirlenmeye çalışılmıştır. Sınıflandırma çalışmaları neticesinde, ocak sahasında dört farklı yapısal bölgenin (A, B, C ve D) bulunduğu ortaya konmuştur. Yapısal bölgelerin tanımlanmasının ardından, her bir bölge için ayrı ayrı ürün miktarı ve kalite analizleri gerçekleştirilmiştir. Başka bir ifadeyle, sınırları

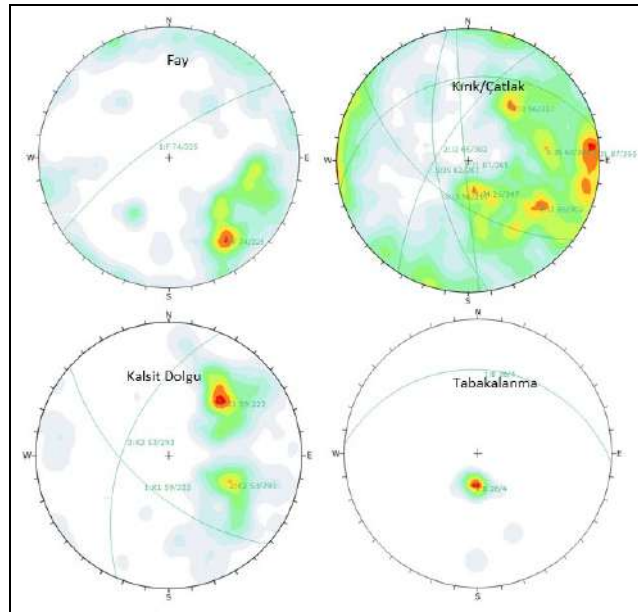
belirlenmiş yapısal bölgeler içerisinde yer alan kazı aynalarından elde edilen ölçüm verileri bir araya getirilmiş; bu veriler üzerinden yapılan analizler, ilgili bölgenin karakteristik özelliklerini yansıtan sonuçlar üretmiştir. Böylece, her yapısal bölgeye özgü blok üretim potansiyeli ve ürün kalitesi güvenilir biçimde değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, kazı aynalarının blok üretim kapasitesi ve ürün kalitesi açısından incelenmesi neticesinde, ocak sahası içerisindeki yapısal bölgeler bilimsel temellere dayalı olarak belirlenmiş ve bu bölgelerin özellikleri açık biçimde ortaya konmuştur. Bu yaklaşım sayesinde, süreksizlik analizlerinin ilgili yapısal bölgeler özelinde değerlendirilmesinin uygun olacağı yönünde karar verilmiştir.

Yapısal Özelliklerin Ölçülmesi ve Analizi

Sahada gerçekleştirilen yerinde ölçümler kapsamında; tabakalanma düzlemleri, kırık-çatlak ve eklem niteliğindeki süreksizlikler, kalsit dolgu hatları ve fay düzlemlerine ait eğim ve eğim yönü değerleri ayrı ayrı kaydedilmiş ve bu veriler üzerinden detaylı yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu ölçümler, süreksizlik türlerinin mekânsal dağılımını ve yapısal karakteristiklerini ortaya koymak amacıyla sistematik ve disiplinli bir yaklaşımla yürütülmüştür.

Her kazı aynasında eğim ve eğim yönü ölçümleri, iki farklı araştırmacı tarafından bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin temel amacı, farklı gözlemciler arasında ölçüm tutarlılığını değerlendirmek ve aynı zamanda veri setinin genişletilmesi yoluyla istatistiksel güvenilirliği artırmaktır. Karşılaştırmalı analizler sonucunda, ölçümler arasındaki farkların kabul edilebilir düzeyde olduğu ortaya konmuştur. Bu kapsamlı saha çalışması neticesinde; 15 adet tabakalanma, 1177 adet kırık-çatlak, 142 adet fay ve 555 adet kalsit dolgu ölçümünden oluşan kapsamlı bir veri tabanı oluşturulmuştur. Buna ek olarak, sahadaki kazı aynalarının konumlarının doğrulanması amacıyla her bir ayna yüzeyinin doğrultu ve eğim değerleri de ölçülmüştür. Elde edilen tüm veriler, dört farklı yapısal bölgeye göre ve süreksizlik türlerine göre ayrıştırılmıştır. Bu analizler sonucunda, her yapısal bölgeye özgü süreksizlik yapısı açık ve güvenilir biçimde ortaya konmuştur. Farklı bölgelere ait detaylı sonuçlar yer kısıtı nedeniyle bu bildiri kapsamında sunulamamaktadır. Şekil 3'te, sahada gerçekleştirilen tüm ölçümlere ait stereografik projeksiyon analizine ilişkin grafiksel veriler gösterilmektedir.



Şekil 3. Sahada yapılan ölçümlerin tamamının birlikte stereografik projeksiyon analizi

Stereografik projeksiyon analizleri sonucunda, sahada belirgin biçimde beş farklı kırık/çatlak sisteminin varlığı tespit edilmiştir. Bu sistemlerin tamamının farklı eğim açılarında geliştiği, ancak ortak olarak K-G doğrultusunun batı yönüne eğilim gösterdiği anlaşılmaktadır. Kırık/çatlak sistemlerinin gelişimi, sahadaki fay zonları ve tabakalanma düzlemleri ile yapısal olarak kontrol edilmektedir. Kırıkların oluşumunda, büyük ölçüde doğrultu bileşenli atım karakteristiği sergileyen fayların etkili olduğu gözlenmiştir. Bu fayların gelişimini takiben meydana gelen çatlaklara, kırık/çatlak sistemleriyle yapısal uyum gösteren iki farklı doğrultu ve eğim kombinasyonunda (53/293 ve 59/222) kalsit mineralleri yerleşerek dolgu oluşturmuştur. Bu dolgu hatları, süreksizliklerin karakterizasyonunda önemli bir gösterge olarak değerlendirilmiştir.

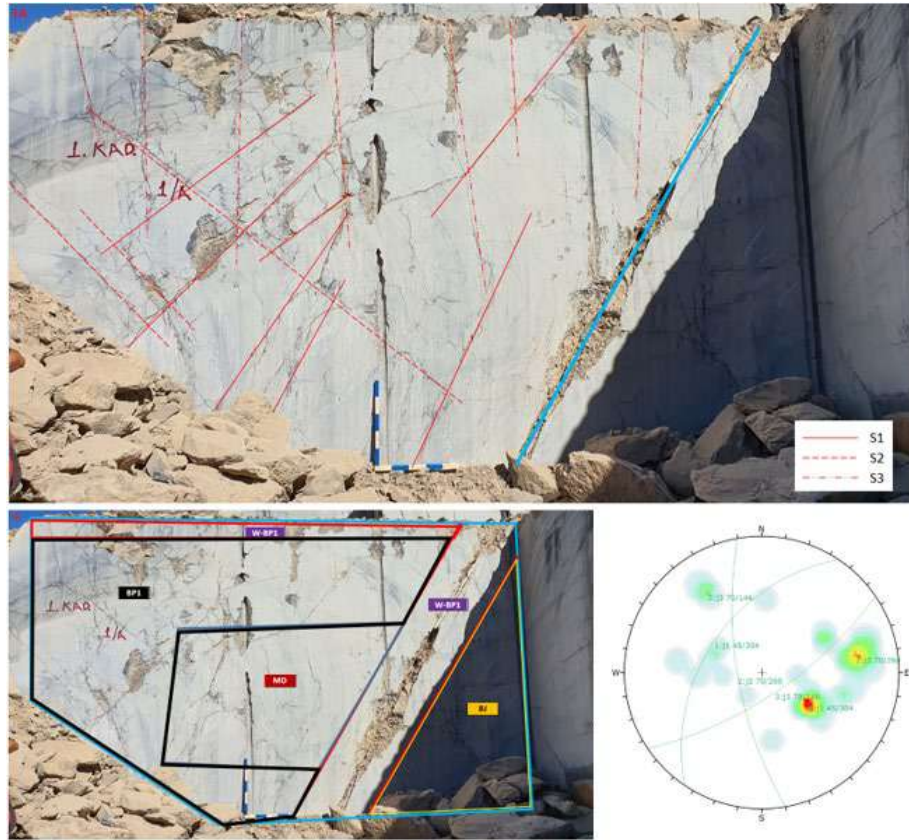
Genel olarak değerlendirildiğinde, sahada gözlemlenen tabakalanma düzlemleri, fay sistemleri, kırık/çatlak yapıları ve kalsit dolgu oluşumları arasında yapısal bir uyumun bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu uyum, süreksizliklerin gelişim sürecine ilişkin jeodinamik bir bütünlük olduğunu göstermekte ve sahadaki blok üretim potansiyelinin değerlendirilmesinde önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Kırık/Çatlak Ölçümlerinden Blok Boyut Dağılımı ve Birim Hacme Düşen Çatlak Sayısının Analizi

Kazı aynalarına ait fotoğraflar üzerine, kırık/çatlak yapıları ile fay düzlemleri detaylı biçimde işaretlenmiştir. Şekil 4'te, örnek bir ayna fotoğrafı üzerinde işaretlenmiş kırık/çatlak sistemleri ile fay düzlemi görsel olarak sunulmaktadır. Aynı ayna üzerinde gerçekleştirilen kalite değerlendirmesi, blok verimi alan analizi ve kırık/çatlak yapılarına ait stereografik projeksiyon görüntüsü de şekil kapsamında yer almaktadır. Kırık/çatlak setleri, yapısal etkinlik sırasına göre sınıflandırılmış ve S1, S2, S3 vb. biçiminde adlandırılmıştır.

Fotoğraf çekimi sırasında kullanılan referans ölçek çubukları sayesinde, her bir kırık/çatlak düzlemi arasındaki dik mesafeler yüksek hassasiyetle ölçülerek veri tabanına kaydedilmiştir. Bu ölçümler, süreksizliklerin mekânsal dağılımının belirlenmesi ve blok geometrisinin değerlendirilmesi açısından temel öneme sahiptir. Her bir kazı aynasında gerçekleştirilen ölçümler doğrultusunda, süreksizlik setlerine ait aralık değerleri ayna bazında tanımlanmıştır.

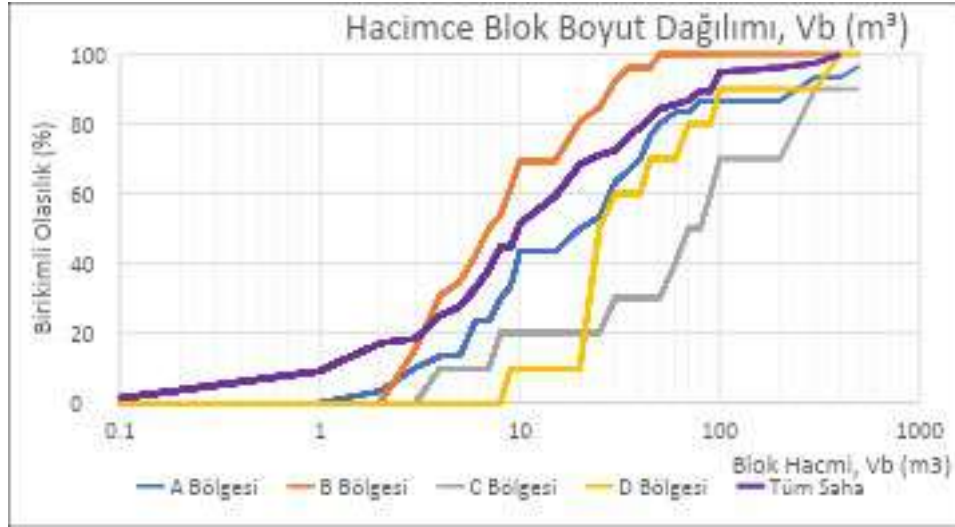
Bu veriler kullanılarak, Palmström (2001) tarafından önerilen yöntem doğrultusunda, her bir ayna için blok hacmi (V_b , m^3) ve birim hacimdeki çatlak yoğunluğu (J_v , çatlak sayısı/ m^3) hesaplanmıştır. Böylece, süreksizliklerin blok verimi üzerindeki etkisi nicel olarak ortaya konmuş ve üretim planlamasına yönelik teknik değerlendirmeler için sağlam bir temel oluşturulmuştur.



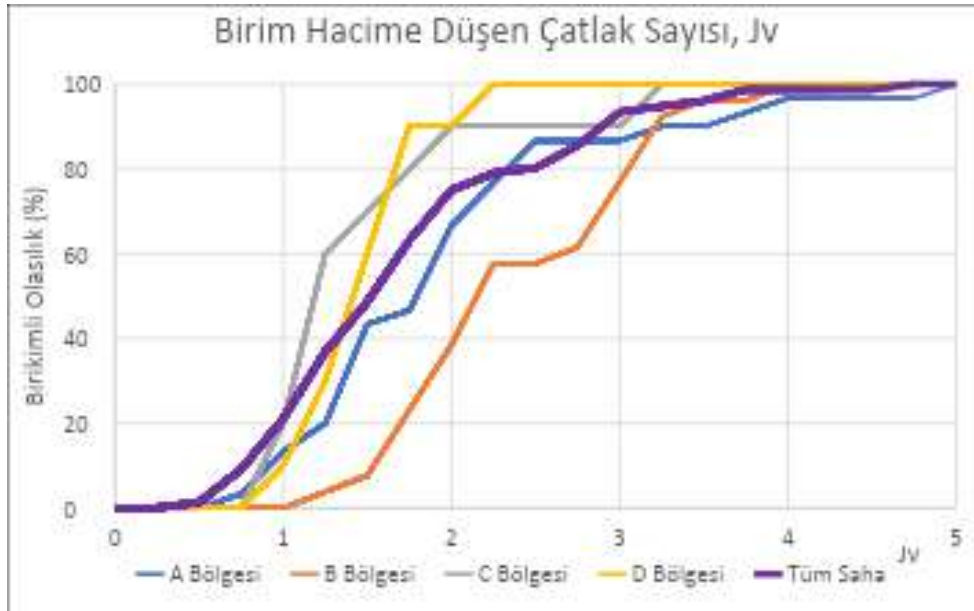
Şekil 4. Örnek bir ayna üzerinde kırık/çatlak hatlarının işaretlenmesi, aynı aynaya ait kalite/blok alanları ve kırık/çatlak yapısının stereografik gösterimi

Saha dört farklı yapısal bölgeye ayrıldığından, bu bölgelerden toplanan tüm veriler ayrı ayrı sınıflandırılmış ve bölge bazında detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, A, B, C ve D bölgeleri ile tüm saha genelinden elde edilen veriler doğrultusunda, beş farklı blok hacmi (V_b) ve çatlak yoğunluğu (J_v) dağılım grafiği hazırlanmıştır. Dört yapısal bölgeye ait V_b dağılımları Şekil 5'te, J_v dağılımları ise Şekil 6'da sunulmaktadır. Şekillerde kalın mor çizgi ile gösterilen dağılımın daha küçük blok boyutları içermesi, bu verilerin dört tanımlı yapısal bölge dışında kalan ve özellikle ocağın üst kesimlerinde, yüzeye yakın kırıklı alanlardan elde edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, Şekil 5'te 10 m^3 hacimli bloklar dikkate alındığında, D Bölgesi'nde blokların yalnızca %10'u bu hacmin altında kalmakta; %90'ı ise daha büyük hacimlere sahiptir. Benzer şekilde, B Bölgesi'nde toplam blokların %70'i 10 m^3 'ten küçük hacme sahipken, %30'u bu değerin üzerindedir. Blok boyutlarının büyüklüğü ile blok verimi arasında doğrudan ve güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Daha büyük hacimli bloklar, üretim sürecinde daha yüksek verimlilik sağlamakta; aynı zamanda ekonomik açıdan daha değerli ürünlerin elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, blok hacmi (V_b) ve çatlak yoğunluğu (J_v) dağılımlarının bölgesel farklılıkları, mermer ocağı planlamasında dikkate alınması gereken temel parametreler arasında yer almaktadır.

Blok boyutları ile birim hacim başına düşen kırık/çatlak sayısı arasında belirgin bir ters orantı söz konusudur. Bir blok içerisinde kırık ve çatlak sayısı arttıkça, bloğun geometrik bütünlüğü bozulmakta; bu da daha küçük boyutlu blokların elde edilmesine neden olmaktadır. Şekil 6'da sunulan J_v dağılım grafiği incelendiğinde, bir metreküp başına düşen kırık/çatlak sayısı yaklaşık 2'nin üzerine çıktığında, blok veriminin belirgin biçimde azaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5. Dört farklı bölge ve tüm ocak için Vb blok hacim dağılım grafiği



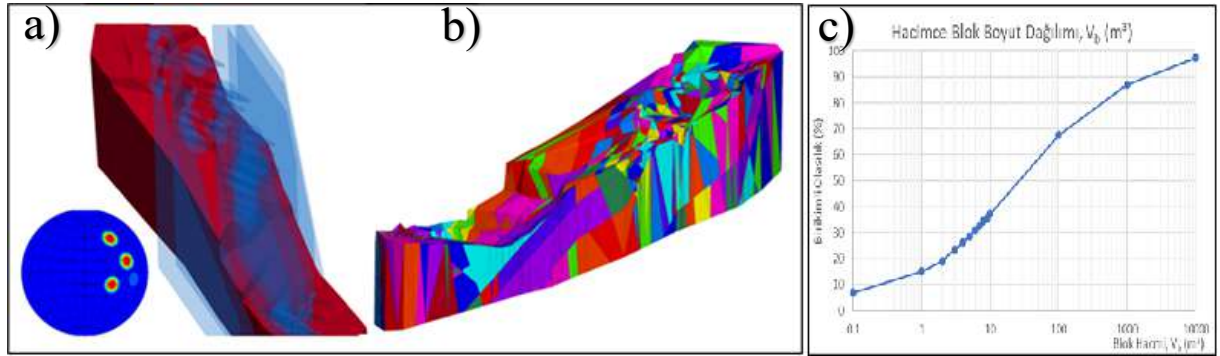
Şekil 6. Dört farklı bölge ve tüm ocak için Jv m³ başına düşen kırık/çatlak sayısı dağılım grafiği

Bu durum, süreksizlik yoğunluğunun üretim verimliliği üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koymakta ve saha değerlendirmelerinde kritik bir gösterge işlevi görmektedir. V_b dağılımı açısından en yüksek blok boyutlarına sahip olan B Bölgesinde, J_v değerlerinin diğer bölgelere kıyasla daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, süreksizlik yoğunluğunun blok verimi üzerindeki etkisini doğrudan ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, birim hacimdeki kırık/çatlak sayısı (J_v) ile blok hacmi (V_b) arasındaki ilişki, mermer ocaklarında blok veriminin hesaplanmasında son derece yararlı ve güvenilir bir gösterge olarak değerlendirilmektedir.

3B Kırık-Çatlak Modelleme ve Blok Hacim Dağılımının Belirlenmesi

Sahanın A bölgesine ait hacimsel blok boyut dağılımının doğrulanması amacıyla, bölgedeki ana çatlak mekanizmaları ve fay verileri bilgisayar ortamında analiz edilerek, bu tür yapısal modellemelerde

yaygın olarak kullanılan bir yazılıma aktarılmıştır. İlgili yazılım aracılığıyla bir Ayırık Çatlak Ağı (Discrete Fracture Network – DFN) oluşturulmuş ve bu ağ, A bölgesinin üç boyutlu sayısal modeli üzerine entegre edilmiştir (Şekil 7.a ve Şekil 7.b). Modelleme sürecinde, DFN yapısı kullanılarak bölgedeki bloklar ayrıştırılmış; ardından her bir blokun hacmi hesaplanarak hacimsel blok boyut dağılımı elde edilmiştir. Bu yöntemle hesaplanan dağılım verileri Şekil 7.c’de sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, daha önce sahada yapılan ölçümler ve hesaplamalarla yüksek düzeyde benzerlik göstermiş; böylece kullanılan yöntemin blok boyutlarının kestiriminde somut ve güvenilir bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 7.a Oluşturulan çatlak ağının görünümü, 7.b 3B Modelin DFN ile bloklara ayrılması, 7.c hacimce blok boyut dağılımı

Maden Kaynak Kestirimi

Sahadaki Maden Kaynak kestirim çalışması temel olarak;

1. 15 adet sondaj kuyusundan elde edilen verilere,
2. Üretim aynaları üzerinde yapılan kırık, çatlak ve kalite ölçümlerine,
3. Pırkanat (Drone) ile üretilen sayısal arazi modeline,

dayanmaktadır. Sondaj kuyularından elde edilen veriler litoloji, mermer türü ve kalite tanımlamaları, blok alma verimleri, fiziksel ve mekanik test sonuçları ve kırık, çatlak ölçümlerini içermektedir.

Modelleme yaklaşımı, mermer türüne ilişkin zonların 3B modellenmesine dayanmaktadır. Bu amaçla izlenen yöntem, sondajlardan geçen çok sayıda kesit alıp bu kesitlerde zonun tavan ve taban yüzeylerini modellemek ve son aşamada bu yüzeyleri birleştirmektir. Kalite sınıflarının 3B modellenmesi amacıyla bir çalışma yapılmış ancak jeolojik süreklilik sağlanamadığı için bu yaklaşım terkedilmiştir. Modelleme çalışması:

1. Jeolojik sürekliliğin sağlanabilmesi için iki mermer zonu arasında kalan ve kalınlığı 8 metreyi geçmeyen pasa türündeki zonların modele dahil edilmesi,
2. İzole olmuş mermer kütlelerinin (örneğin KSI03 sondajında BJ mermeri) modele dahil edilmemesi,
3. Değişkenlik göstermekle birlikte bir sondajın en yüksek dış kestirim uzaklığının 50 metre alınması,
4. Mevcut koşullar altında üretimi mümkün görünen zonların modele dahil edilmesi yaklaşım ve varsayımlarını içermektedir. Veri sayısı ve mermer zonlarının geometrik yapısı dikkate alındığında bu varsayımların makul olduğu düşünülmektedir.

Şekil 8 modellenen mermer zonlarının plan ve kesit görüntülerini, Çizelge 2 ise zonlar için kullanılan kısaltma kodlarını göstermektedir.

Çizelge 2. Modellemede dikkate alınan zonlar ve kısaltılmış kodları

Mermer Zonu	Kısaltma Kodu
Black Pearl 1. Kalite	BP1-A/B*
Black Pearl 2. Kalite	BP2
Siyah Kahveli (Midnight)	MD-A/B*
Güvercin Grisi (Dove Grey)	DG

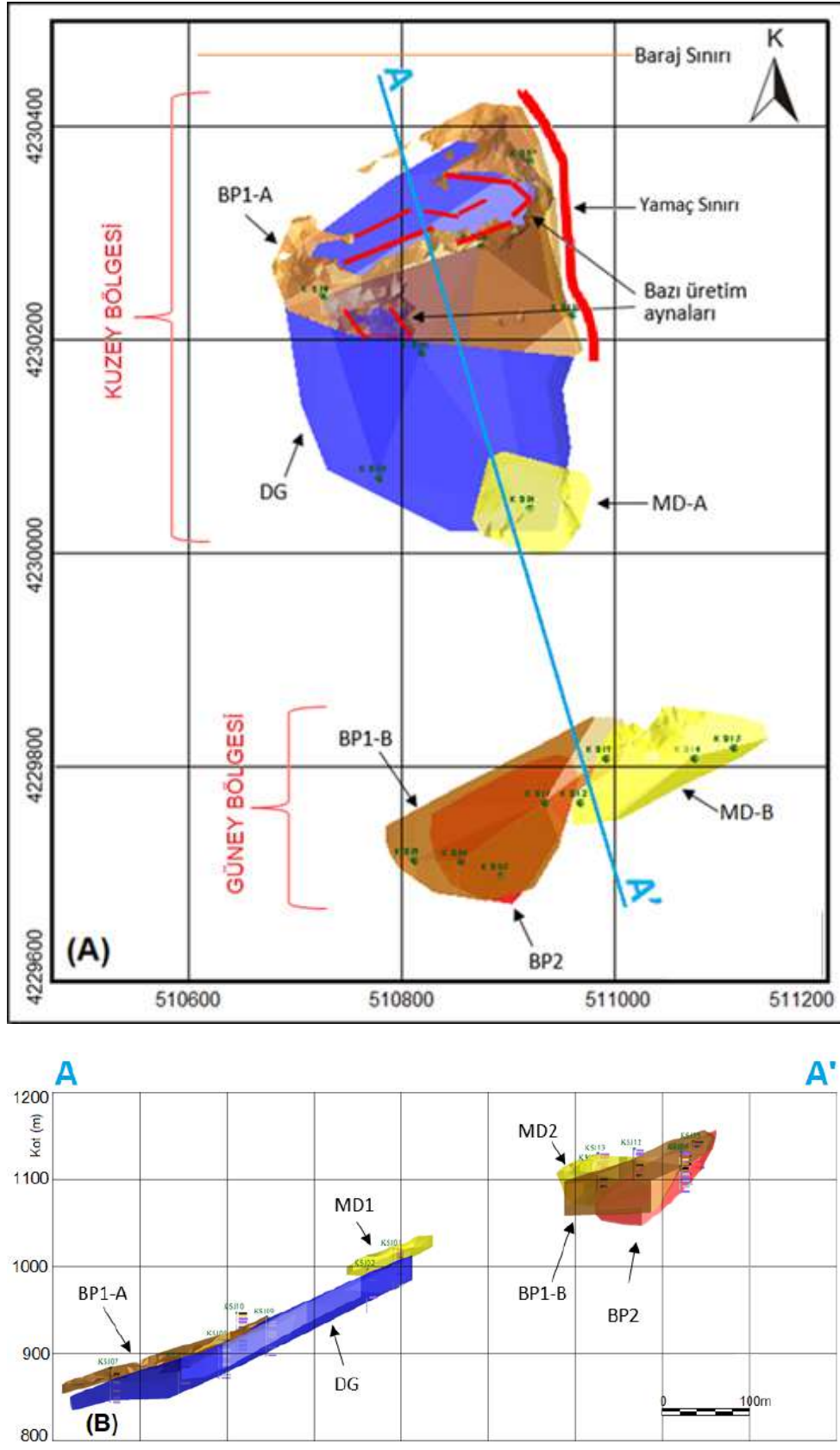
*A ve B harfleri bölgeler için kullanılmıştır. A kuzey bölgesini, B güney bölgesini ifade etmektedir.

Modellenen Mermer Zonlarının Tanımlaması

Şekil 8'den görüleceği üzere, sahada süreklilik arz eden 2 adet bölge mevcuttur: Henüz üretimin yapılmadığı bakir Güney bölgesi ve mevcut ocağı da içine alan Kuzey bölgesi. Güney bölgesi, BP1, BP2 ve MD zonlarını içermekte, Kuzey bölgesi ise DG, BP1 ve MD zonlarından oluşmaktadır.

Sahadaki en büyük mermer zonu Kuzey bölgesindeki DG zonudur. DG zonu, kuzey güney yönünde yaklaşık 350 m, doğu batı yönünde ise 250 m boyutunda olup 16-25 m arasında değişen kalınlığa sahiptir. Bu zon, güneyden kuzeye doğru 25 derecelik bir açı ile dalmaktadır. Şekil 8'den görüldüğü gibi DG ve bunun hemen üstündeki BP1-A zonunun doğu bölümleri ani yamaç yükselmesi nedeniyle sınırlandırılmıştır. BP1-A zonu düzensiz bir geometriye sahiptir. Bunun nedeni mevcut ocak alanı içinde bulunduğundan üretim yapılan kısımların modelden çıkarılmış olmasıdır. BP1 ve MD zonları DG gibi aynı dalım açısına sahiptir. MD zonu nispeten küçük olup yanal olarak 100 m x 100 m boyutlarına ve 12 m ortalama kalınlığa sahiptir.

Güney bölgesi mermer zonları kuzeydekilere göre nispeten küçük boyutlu olup düzensiz bir geometriye sahiptir. BP2 zonu, BP1 zonunun altında ve MD-B zonu ise bunların doğu kontağında yer almaktadır. MD-B zonunun kalınlığı yaklaşık 25-30 m olup BP1 ve BP2 zonlarının toplam kalınlığına yakındır.



Şekil 8. Modellenen mermer zonlarının plan (A) ve kesit (B) görünüşleri

Çizelge 3, mermer zonlarına ilişkin hacim ve tonajları göstermektedir. Hacimden tonaja geçerken akreditasyona sahip ve yoğunluk tayini sırasında nispeten daha doğru sonuçlar veren gaz piknometresi yöntemini esas alması nedeniyle Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü bünyesindeki Maden Analizleri ve Teknolojisi (MAT) Dairesi Başkanlığı laboratuvarlarında ölçülen yoğunluk değerlerinin ortalaması ($2,69 \text{ t/m}^3$) kullanılmıştır. Buna göre kuzey ve güney bölgede toplam 3.335.000 m^3 hacme ve 8.971.000 ton ağırlığa sahip mermer zonları bulunmaktadır.

Modellenen bu zonlar, büyük ölçüde pasa olarak nitelenecek malzeme içermemekte ancak kırık-çatlak yapısına sahip ve belirli ölçüde kusur ve arıza barındıran mermer kütlelerine karşılık gelmektedir. Bu zonlar, (1) yapısal özelliklerin ölçülmesi ve analizi ile ortalama boyutta blok verme kapasitesinin, (2) bu kapasite içinde renk, desen ve kalite homojenliğinin incelenmesi ile satılabilir blok potansiyelinin ortaya konabileceği zonlardır.

Çizelge 3. Mermer zonlarının hacim ve tonajları

Zon	Hacim (Bin m^3)	Tonaj (Bin Ton)
BP1-A	240	645,6
BP1-B	450	1210,5
DG	2150	5783,5
MD-A	90	242,0
MD-B	255	686,0
BP2	150	403,5
Toplam	3335	8.971,0

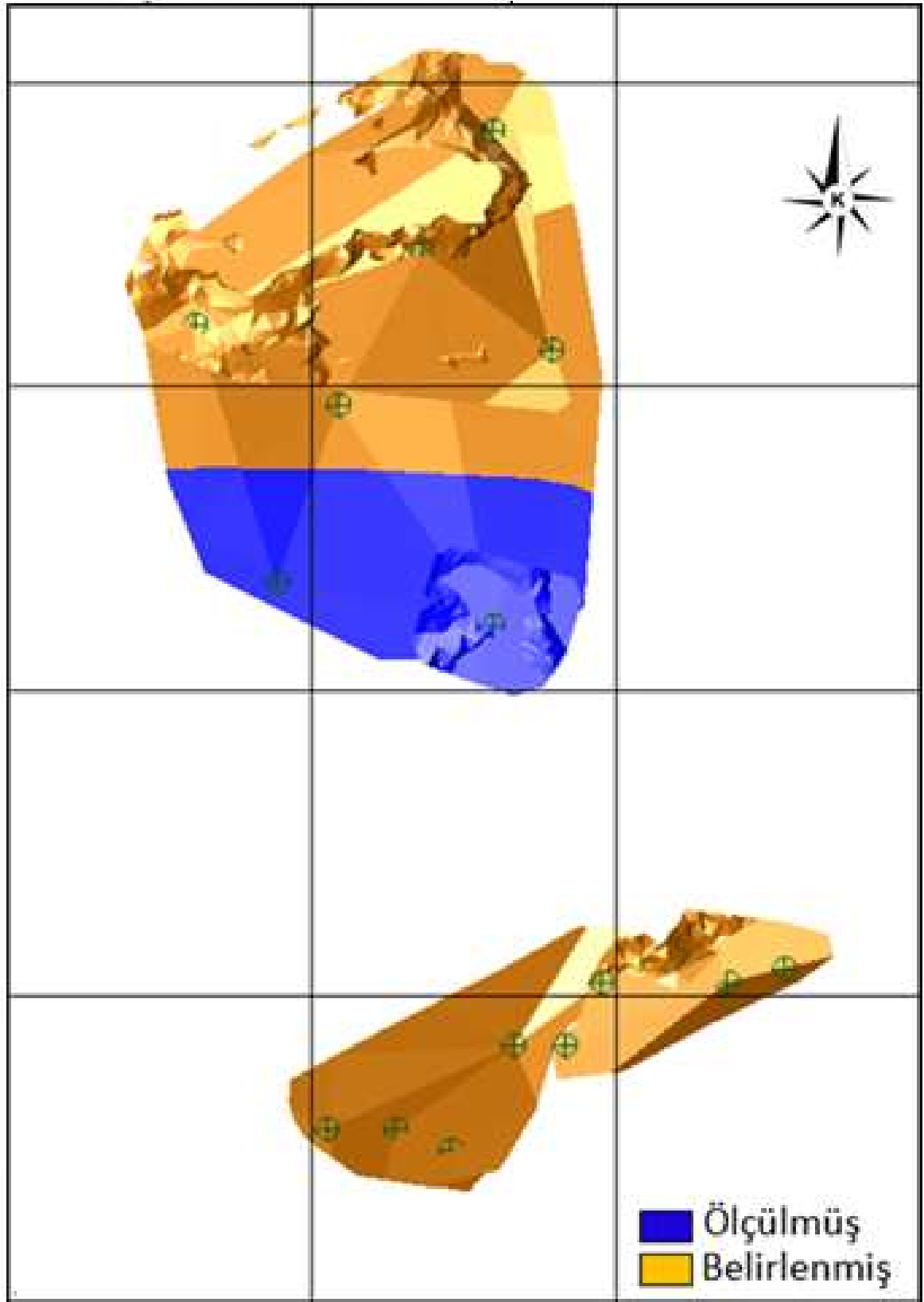
Maden Kaynak Kestirimi ve Sınıflaması

Sahada gözlenen yapısal süreksizlikler ve mermerin yapısında gözlenen arıza ve kusurlardan dolayı Çizelge 3'te verilen miktarların tümünün blok olarak üretilmesi mümkün değildir. Sahada satılabilir blok elde edilebilmesi için süreksizliklerle sınırlanmış mermer kütlesi hacminin en az 10 m^3 olması gerektiği kabul edilebilir. Sahada analiz edilen blok hacim dağılımları (V_b) bu boyuttaki blokların modellenen zon içindeki oranının %50 olduğunu göstermektedir (Şekil 5). Diğer bir ifadeyle, mermer zonu içerisinde bulunan ve blok elde edilmesi mümkün olmayacak şekilde süreksizlikler ile sınırlanmış 10 m^3 'den daha küçük mermer kütlesi, tüm zonun yarısına karşılık gelmektedir. Süreksizliklerle sınırlandırılmış mermer kütleleri geometrik şekil itibarıyla oldukça düzensiz bir yapıdadır. Bu orana ek olarak kalite heterojenliğinden dolayı %20 blok reddi öngörülmekte ve dolayısıyla Çizelge 3'te mermer zonları için verilen hacim ve tonajların %30'unun Maden Kaynağına dönüşebileceğini kestirmektedir.

Maden Kaynak sınıflaması amacıyla dikkate alınan kriterler aşağıda verilmektedir:

1. Üretim aynasına yakınlık,
2. Sondajlar arası mesafe

Buna göre sahadaki aynalara yakın olan ve 50 m yakınında sondaj bulunan mermer zonları Ölçülmüş Kategori'de, sondajlar arası mesafenin 100 m olduğu kısımlar ise Belirlenmiş Kategori'de sınıflandırılmıştır. Saha Potansiyel Kategori'de bir Kaynak içermemektedir. Şekil 9, sahada kestirilen Maden Kaynak sınıflarını göstermektedir.



Şekil 9. Sahanın Kaynak sınıflaması dağılımının plan üzerinde görünümü

Sahaya ait Maden Kaynak kestirimi Çizelge 4'te açıklanmıştır. Mermer zonlarından çıkan ürünler farklı şekilde fiyatlanacağından toplam tonajlar verilmemiştir.

Çizelge 4. Sahanın Kaynak miktarları

Maden Kaynak Sınıfı	Zon [#]	Hacim (Bin m ³)	Tonaj* (Bin ton)
Belirlenmiş	DG	172,5	464,0
	MD-A	27,0	72,6
Ölçülmüş	BP1-A	72,0	193,7
	BP1-B	135,0	363,1
	DG	472,5	1271,0
	MD-B	76,5	205,8
	BP2	45,0	121,0

*Tonaj hesaplamasında yoğunluk 2,69 t/m³ olarak alınmıştır.

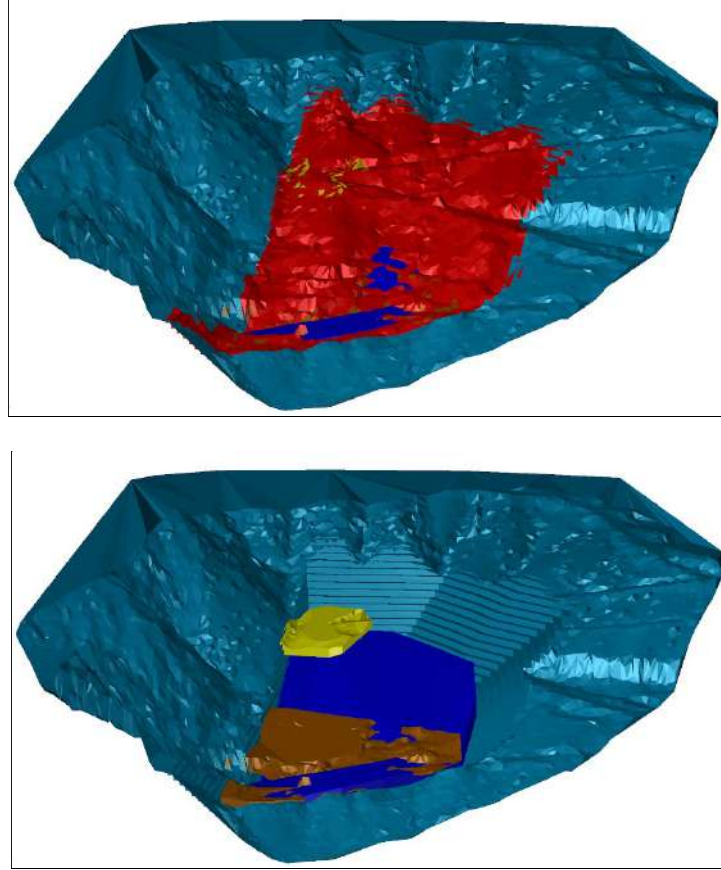
[#] A harfi kuzey bölgesini, B harfi ise güney bölgesini ifade etmektedir.

Ocak Tasarımı ve Rezerv Miktarının Kestirilmesi

Ocak tasarımının görselleştirilebilmesi ve kazı miktarlarının belirlenebilmesi için bölgenin topografyasının sayısallaştırılması ve ocak parametrelerinin doğru bir şekilde yardımcı yazılımlara aktarılması gerekmektedir. Sadeleştirilen topografya üzerinde ocak tasarımının hesaplanabilmesi için Şekil 8'de gösterilen 3B jeolojik katı modelin en altında bulunan DG formasyonunun çevresi sayısallaştırılarak bir ocak tabanı oluşturulmuştur. Ocak taban çizgisi oluşturulduktan sonra, yasal olarak izin verilen sınırlar içerisinde işletmede faaliyet gösterilen basamak boyutlarıyla uyumlu olacak şekilde basamak tasarımları oluşturulmuştur. Tasarımda kullanılan parametreler Çizelge 5'te sunulmaktadır. Ocağın doğusunda bulunan dağ yamacının altında kalıp üretilmeyecek durumdaki malzeme kazılacak miktardan düşülmüştür (Şekil 10).

Çizelge 5. Tasarımda kullanılan basamak parametreleri

Basamak yüksekliği: 7 m	Basamak açısı: 90°
Basamak genişliği: 9 m	Genel şev açısı: 37°

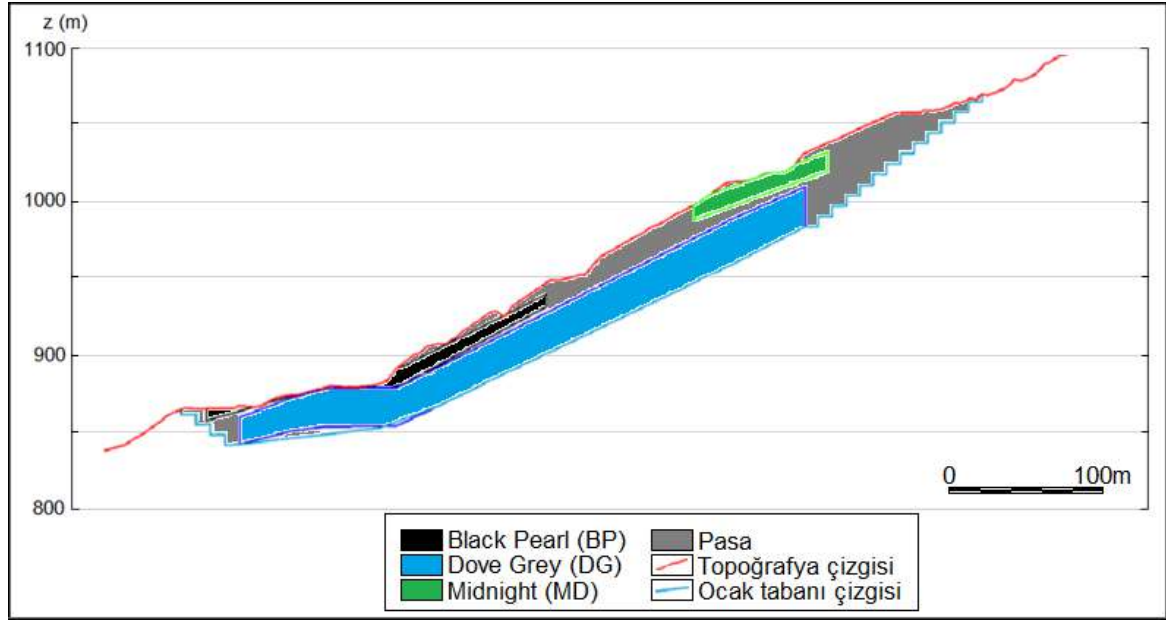


Şekil 10. Topografya üzerine kazılacak olan bölüm (üstte) ve basamaklarla birlikte 3B jeolojik modelin izometrik görüntüsü (altta)

Tasarımı yapılan ocağın mermer formasyonlarını bütünüyle içine aldığı onaylamak amacıyla alınan kesitler, tasarımın başarılı olduğunu göstermektedir (Şekil 11).

Tasarım tamamlandıktan sonra mermer bloklarının üretilmeye hazır hale getirilmesi için kazılması gereken toplam malzeme miktarı (dekapaj) hesaplanmıştır. Şekil 11’de mavi çizgi ile gösterilen ocak tabanı ile kırmızı çizgi ile gösterilen topografya arasında kalan malzemenin tamamının hacmi modelden 3,95 milyon m³ olarak bulunmuştur. Kaynağın jeolojik modellenmesi bölümünde bu bölge içerisinde kalan BP, MD ve DG formasyonlarının toplam hacmi 2,48 milyon m³ olarak hesaplandığı için üretilecek formasyonların üstünde ve etrafında kalan pasa malzemesinin hacmi yaklaşık 1,47 milyon m³’tür.

Şekil 9’da görüldüğü üzere mevcut ocağın da içinde olduğu kuzey bölgesinin yaklaşık 150 m güneyinde yapılan sondajlar ile benzer mermer formasyonlarının kestirimi de yapılmıştır. Kestirimin yapılabilmesi için bu alanlarda yeterli miktarda sondaj, dolayısıyla bilgi mevcuttur. Ancak, bu iki bölge arasında kalan alanın yapısıyla ilgili gerekli düzeyde bilgi olmadığı ve bu nedenle kestirimi yapılamadığı için ocak planlamasının bu aşamada, Şekil 12’de görüldüğü gibi, sadece kuzey bölümü için yapılması uygun bulunmuştur. Aradaki alanla ilgili bilgi eksikliğinin ileride yapılacak sondajlar ile tamamlanması sonrasında ocak planı güncellenecektir.



Şekil 11. Tasarımda yer alan formasyonların örnek bir kesit üzerinde görüntüsü

Maden Rezerv Kestirimi

Bu çalışmada maden kaynak ve rezerv kestirimleri UMREK (2018)'de verilen tanımlamaya uygun olarak yapılmıştır.

UMREK (2018)'e göre “Ölçülmüş Maden Kaynakları; ya “Görünür Maden Rezerv”ine ya da “Muhtemel Maden Rezerv” ine dönüştürülebilir. Maden Kaynağının, Maden Rezervine dönüşümünde, dikkate alınan Dönüştürücü Faktörlerin bazılarında veya tümünde belirsizlikler olması durumunda, Yetkin Kişi, bir Ölçülmüş Maden Kaynağını, Muhtemel Maden Rezervine dönüştürebilir. Bu ilişki, Şekil 12'de kesik çizgili okla gösterilmiştir. Kesik çizgili okun eğilimi, dikey bir bileşen içeriyorsa da bu, jeolojik bilgi veya güven düzeyinde bir düşüş anlamına gelmez. Böyle bir durumda bu dönüştürücü faktörlerin her birinin eksiksiz bir şekilde açıklanması gerekmektedir.”



Şekil 12. Arama sonuçları, Maden Kaynak ve Maden Rezervi arasındaki genel ilişki (UMREK 2018)

UMREK (2018)'de tanımlanan değiştirici faktörlerin tamamı dikkate alınarak rezerv miktarı kestirilmiştir. Bu çalışmanın Giriş bölümünde belirtilen dönüştürücü faktörlerin tamamı ayrıntılı bir şekilde belirlenerek sonuçları analiz edilmiştir.

Sahada üretilebilecek blok miktarını belirlemeye yönelik yapılan çalışmalar aşağıda sıralanmaktadır:

1. Tüm süreksizliklere (kırık-çatlak, fay, tabakalanma) ve kalsit dolgulara ait eğim yönü/eğim ölçümleri ve stereografik analizinin yapılması,
2. Aynalarda gözlenen tüm süreksizliklere ait devamlılık ve eklem aralığı ölçümlerinin yapılması sonucunda Blok Boyut (V_b) ve metreküpte bulunan eklem sayısı (J_v) analizlerinin yapılması ve dağılımlarının çizilmesi,
3. Aynalarda kalite dağılımına yönelik sınırların belirlenmesi, farklı ürünlerden blok alınabilecek kısım ve pasaya ait yüzdelerin belirlenmesi,
4. Kırık-çatlaklara ait eğim yönü/eğim değerlerinin 3B model üzerinde analiz edilmesi ve Blok Boyut (V_b) dağılım grafiğinin çizilmesi.

EAF Eklem-Fissür Açıklığı Faktörü ve EF Eklem Faktörü sahada birlikte değerlendirilmiştir. Ocakta halen üretim yapılmakta olduğundan hem aynalarda hem de basamak yüzeylerinde oldukça ayrıntılı bir kırık-çatlak, fay, tabakalanma ve kalsit dolgu eğim yönü/eğim ölçümleri yapılmıştır.

Sahada "KF Karstik Faktörü" üretilmeye uygun olmayan kırık-çatlaklı yapı içerisinde değerlendirilmiştir. Ocakta bulunan aynalarda çok küçük 2 tane karstik boşluk oluşumu gözlenmekle birlikte karotlu olarak yapılan araştırma sondajlarında böyle bir yapıyla karşılaşılmamıştır.

Eklem Faktörü (EF), Eklem-Fissür Açıklığı Faktörü (EAF), Ayrışma Faktörü (AF), Madencilik Faktörü (MF) ve Kalite Faktörü (KF) değerlerinin tamamı birbirleri ile ilişkilidir. Bu faktörler olabildiğince ayrı ayrı olmak üzere belirlenmiş ve sonuç olarak mermer kaynağından ekonomik değere sahip blok elde edilmesine etki eden tüm faktörler birlikte değerlendirilmiştir. Bu hedef doğrultusunda Eklem ve Eklem Açıklığı Faktörleri aynalarda yapılan eğim yönü/eğim ölçümlerinden belirlenmiştir. Kireçtaşı tabakaları bölgede milyonlarca yıllık bir süreç içerisinde gelişen tektonizma neticesinde kırılanmıştır. Oluşan bu kırıkların içi su ile taşınarak yerleşen kalsit ile doldurulmuştur. Oluşan kalsit dolgular kayanın blok yapısını büyük ölçüde tekrar sağlamıştır. Daha sonra meydana gelen tektonik hareketler sonrasında, ikincil kırık çatlak yapıları meydana gelerek blok verimine negatif yönde etki eden bir yapı oluşturmuştur. Sahada kısmen kalsit dolgu ile dolu kırıklar da bulunmaktadır. Bu kırıkların yüzeyleri arasında genellikle boşluk bulunmamaktadır. Kırıklar tam anlamıyla kapalıdır. Bu tür kırıkların blok verimine büyük ölçüde etkisi olmadığı görölmektedir. Blokların üzerine kesime gitmeden önce epoksi uygulaması ve ahşap desteklerin yapıştırılması sayesinde, kesim sırasında parçalanmalar büyük ölçüde önlenmektedir. Sonuç olarak aynalarda gözlenen kırık-çatlakların tamamının blok verimi açısından engel teşkil etmediği net bir şekilde görölmüştür.

Ayrışma, Madencilik ve Kalite Faktörlerini belirlemek amacıyla ayna yüzeyleri ürün kalitesi de dikkate alınarak blok verebilme açısından analiz edilmiştir. Ölçekli olarak çekilen fotoğraflar üzerinde blok alınmasına uygun olan ve olmayan kısımlar tüm alanı kapsayacak şekilde işlenmiştir. Daha sonra, ilgili tüm alanlar dijital olarak ölçölmüştür. Bu sayede farklı kalitelerdeki ürünün elde edilmesini belirlemeye yönelik bir analiz yapılarak her kalite için alan tüm alanın yüzdesi cinsinden hesaplanmıştır.

Kırık-çatlak ve kalite analizleri verilerinin birlikte kullanılması sonucunda sahada 4 farklı yapısal bölgenin bulunduğu gösterilmiştir. Analizler hem yapısal bölgeler bazında hem de tüm sahayı içerecek şekilde yapılmıştır.

Aynalarda yapılan kırık-çatlak ölçümleri doğrudan 3B model üzerine konularak 3DEC yazılımı ortamında blok boyut dağılımları belirlenmiştir.

Blok boyut (V_b) dağılımları incelendiğinde eklem ölçümlerinde elde edilen grafikten 10 m^3 üzerinde blok bulunma oranı yaklaşık %50 olarak belirlenmiştir. 3B modellemede ise bu değer %60 civarındadır. Ancak kaya içerisinde süreksizliklerle sınırlandırılan blok şekillerinin oldukça düzensiz olduğu dikkate alınmalıdır. İnce uzun köşelerden ve genel anlamda en/boy oranı uygun olmayan bloklardan kesilerek satılabilir blok ürün elde edilmesi mümkün değildir. Ayrıca bu blokların devrilmesi ve kesilmesi sırasında da önemli düzeyde kayıpların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Blok devrilmesi sırasında ne kadar kayıp olduğu belirlenememiştir. Bu konuda bir çalışma yaparak veri toplanması ve blok devrilmesi sırasında meydana gelen kayıpların hesaplanması önerilmektedir.

Ocakta geçmiş yıllarda yapılmış olan üretim faaliyetleri sırasında ne kadar toplam kazı yapıldığı ve bunun karşılığında ne kadar blok ürün elde edildiği bilgileri yıllar bazında derlenmiştir. Gerçekleşen blok üretim miktarının toplam kazı miktarına oranı hesaplandığında kazının hacmen ortalama %2,81'i miktarında blok elde edilmiştir. Kazı miktarına mermer kütlesine ek olarak mermer niteliğinde olmayan bozunmuş örtü malzemesinin miktarı da dahildir.

Yapılan model ve ocak üretim planı çerçevesinde üretilecek olan toplam mermer kütlesi ve bu mermeri üretmek için yapılması gereken örtü kazı miktarları da hesaplanmıştır. Buna göre topoğrafya bilgilerinin var olduğu sahanın kuzey bölgesinde (Şekil 8) yapılacak kazı ve elde edilecek blok miktarları aşağıda verilmektedir:

1. Üretime uygun mermer formasyonu hacmi (A)	: 2,48 milyon m^3
2. Örtü malzemesi hacmi (B)	: 1,47 milyon m^3
3. Toplam kazı hacmi ($C=A+B$)	: 3,85 milyon m^3
4. Elde edilecek blok hacmi ($D=C*2,81/100$)	: 108.000 m^3
5. Elde edilecek blok tonajı ($E=D*2,69$)	: 290.500 ton
6. Blok verimi (Mermer formasyonu hacmine göre) ($F=D/A*100$)	: %4,35

Güney bölgesinin (Şekil 8) toplam hacminin hesaplanması için gerekli olan topoğrafya sayısal bilgilerinin mevcut olmaması nedeniyle sadece katı modelden elde edilen üretime uygun mermer formasyonu miktarı üzerinden hesaplama yapılmıştır. Bu hesaplamada yakın konumda olması ve üretim için benzer ocak geometrisinin oluşacağı yaklaşımı ile blok verimi %4,35 olarak kabul edilmiştir. Buna göre güney bölgesinden çıkacak mermer miktarı için yapılan hesaplama şu şekildedir:

1. Üretime uygun mermer formasyonu hacmi (G)	: 855.000 m^3
2. Elde edilecek blok hacmi ($H=G*4,35/100$)	: 37.000 m^3
3. Elde edilecek blok tonajı ($I=H*2,69$)	: 99.500 ton

Bu çalışmanın tamamında dikkate alınan veriler ve yukarıda yapılan hesaplamalar ışığında sahada muhtemel kategorisinde toplam 145.000 m^3 (=390.000 ton) satılabilir blok üretmek mümkün görülmektedir. Çizelge 4'te verildiği üzere yapılan model çalışması sonucunda bulunan sınıflandırılmış toplam kaynak miktarı $1.000.500 \text{ m}^3$ (=2.691.300 ton) olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla kestirilen kaynak miktarı üzerinden hesaplandığında;

Blok verimi (%) = $(145.000/1.000.500)*100 = \%14,49$ olmaktadır. Geçmiş yıllardaki blok verimleri ve ocağın mevcut durumu (üretim basamaklarının üzerleri açılmış) değerlendirildiğinde, sahanın şu anki rezervini belirlemek için kaynak miktarı (2.691,300 ton) üzerinden %15'lik blok verimiyle kestirimde bulunmak doğru olacaktır. Sonuç olarak kestirilmiş olan kaynak miktarı üzerinden rezervin belirlenmesi uygundur. Buna göre yapılan hesaplama sonucunda mermer kaliteleri için kestirilen rezerv miktarları Çizelge 6'da verilmiştir. Yapılan hesaplama sonucunda 400,000 tonun üzerinde blok mermer üretilmesi beklenmektedir.

Çizelge 6. Sahanın Muhtemel Rezervi

Zon	Kaynak miktarı (Bin Ton)	Rezerv miktarı (Ton)	Oran (%)
BP1	556,83	83,520	20,7
BP2	121,05	18,160	4,5
DG	1.735,05	260,260	64,5
MD	278,42	41,760	10,3
Toplam	2.692,35	403,700	100,0

Bu miktarın büyük bir bölümü yaklaşık %65 ile Dove Grey kalitesi oluşturmaktadır. Bunu yaklaşık %21 oran ile birinci kalite Black Pearl ve %10 oran ile Midnight kaliteleri izlemektedir. Yaklaşık %5 oran ile ikinci kalite Black Pearl sahada en az bulunan mermer kalitesidir. Kestirilen bu rezerv Şekil 10'de verilen UMREK (2018) koduna göre MUHTEMEL sınıfındadır.

Bölgede hali hazırda devam etmekte olan üretim faaliyetler sonucu ocağın genişlemesi ile BP1-A, DG ve MD-A blokları belirlenen ocak parametreleri ile üretilebilecek durumdadır. Güneyde yer alan BP1-B, BP2 ve MD-B bloklarının nasıl bir ocak yapısı ile işletilmesinin daha güvenli ve verimli olacağı konusunun, iki bölge arasında eksik olan bilgilerin yapılacak ilave sondajlarla belirlenmesi sonrasında yeniden değerlendirilmesi önerilmektedir.

Burada verilen rezerv miktarının saha ve işletme koşulları ile uyumlu olduğunu düşünülmektedir. UMREK (2018) uyarınca sadece ocakta yapılan kazı ve açılan sondaj verilerinden “üretilmeye uygun mermer varlığı olduğu” kanıtlanan kısımlar dikkate alınmıştır. Saha çalışmaları ve incelemeler sırasında ocak çevresinde burada belirlenenden daha fazla potansiyel olduğu kanaati oluşmuştur. Açık işletme olarak üretilmeye uygun potansiyele ek olarak, mevcut ocağın doğu tarafında, yeraltı işletmeciliği ile üretilmeye uygun önemli potansiyelin de var olduğu düşünülmektedir. Bu potansiyelin araştırılarak işletmecilik bakımından ayrıntıların ortaya koyulması önerilmektedir.

Sonuç olarak, halen işletilmekte olan mevcut ocağın devamı şeklinde ocak tasarımı yapılan kuzey bölgesi ile tasarıma dahil edilmeyen güney bölgesinde blok üretimine uygun muhtemel sınıfta 403.700 ton Maden Rezervi bulunmaktadır. Şirketin bu ocaktan yıllık 3600 m³ (Yaklaşık 9800 ton) üretim hedefine göre işletme ömrü 41 (=403,700/9800) yıl olacaktır.

Finansal Analiz

Sahadan yapılan kaynak ve rezerv kestirimlerinin ardından şirketin önceki yıllarda yaptığı faaliyetler de dikkate alınarak ayrıntılı bir finansal analiz çalışması yapılmıştır. Tüm ilk yatırım (CAPEX) ve işletme maliyeti (OPEX) kalemleri kullanılarak ekonomik analizler yapıldıktan sonra projenin finansal analizi yapılmıştır. Ancak finansal analiz sonuçları firmaya ait özel ticari bilgiler olduğu için burada verilmemektedir.

SONUÇLAR

Yukarıda detaylı biçimde açıklanan ölçüm ve analiz süreçlerinden elde edilen veriler kullanılarak, mermer yatağının üç boyutlu katı modeli oluşturulmuştur. Bu model üzerinde renk, doku ve benzeri kalite kriterleri uygulanarak, farklı kalite düzeylerinde üretilebilecek mermer hacimleri belirlenmiştir. Elde edilen hacimsel veriler doğrultusunda, sahaya ait kaynak miktarları hesaplanmış; bu miktarlar, veri

güvenilirliği dereceleri dikkate alınarak Ölçülmüş, Belirlenmiş ve Mümkün kaynak kategorileri altında sınıflandırılmıştır.

Devamında, ocakta gerçekleştirilmesi planlanan üretim süreci üç boyutlu olarak modellenmiş ve üretim senaryoları oluşturulmuştur. Kaynaktan rezerve geçişte kullanılan en kritik dönüştürücü faktör, ocağın benzer jeolojik özelliklere sahip bölgelerinden geçmiş dönemlerde elde edilen blok ve boyutlandırılmış mermer üretim miktarlarına ait gerçekleşme oranları olmuştur. Bu oranlar, rezerv kestiriminde temel alınarak sahadan elde edilecek blok miktarı ve boyutlandırılmış ürün maliyeti üzerinden fizibilite analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmaya ait uygulamaların yalnızca bir bölümü burada sunulmuş olup sayfa sınırlamaları nedeniyle bazı teknik ayrıntılar metin dışında bırakılmıştır. Bununla birlikte, oldukça kapsamlı bir araştırma yürütülerek, doğaltaş ve mermer kaynak-rezerv sınıflamasında doğrudan uygulanabilir nitelikte bütüncül bir yöntem geliştirilmiştir. Söz konusu yöntemin öncelikle Türkiye'deki önemli mermer sahalarında kullanılması, ülke kaynaklarının sürdürülebilir ve etkin biçimde değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Barla, G. (2019). Novel investigation methods of rock slopes and tunnels in view of realistic modelling in engineering applications, ISRM Specialised Conference / Međunarodna konferencija 8. Savjetovanje Hrvatskog geotehničkog društva Omiš – Split, Croatia.

Cosi, M. (2010). The dimension stone sector: new perspectives on the global market and on the reporting of international mining standards. Journal of the European Federation of Geologists; 39, 24-30.

İMİB. (2023). 2022 yılı Türkiye geneli aylık bazda ürün gruplarına göre maden ihracat verileri. <https://www.imib.org.tr/tr/raporlar/ihracat-istatistikleri>.

Kluckner, A., Söllner, P., Schubert, W., Pötsch, M. (2015) Estimation of the in situ block size in jointed rock masses using three-dimensional block simulations and discontinuity measurements, 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics-Innovations in Applied and Theoretical Rock Mechanics, Montreal, Canada.

Kong, D., Wu, F., Saroglou, C., Sha, P., Li, B. (2021). In-Situ Block Characterization of Jointed Rock Exposures Based on a 3D Point Cloud Model. Remote Sens., 13, 2540.

Lato, M., Hutchinson, M., Diederichs, K., Kalenchuk, K. (2007). Evaluating block shape and block volume distributions of rock faces using LiDAR and 3DEC, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9.

Palmstrom, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 20, 362-377.

Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Taherian, S., and Sousa, L.M.O. (2018). Discontinuity modelling and rock block geometry identification to optimize production in dimension stone quarries. Engineering Geology, 232, 22-33.

UMREK. (2023). Ulusal Maden Kaynak ve Maden Rezerv Raporlama Kodu, Ankara

MERMER OCAKLARINDA ELMAS TEL KESME VE PATLATMALI ÖRTÜ KAZI YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF DIAMOND WIRE CUTTING AND BLASTING METHODS FOR OVERBURDEN EXCAVATION IN MARBLE QUARRIES

S. Cevheroğlu Çıra^{1*}, Z. Cevizci², Ö. Akkoyun¹

¹Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

²Maden Mühendisi

*Sorumlu yazar: sumeyra@dicle.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, bir mermer ocağında örtü kazı işlemlerinde kullanılan elmas tel kesme ve patlayıcı madde kullanımının maliyet ve zamana etki eden tüm parametreleri incelenmiştir. Mermer üretim sürecinde, üzeri kırıklı yapılarla kaplı ve üretim amacıyla kullanılamayacak nitelikteki üst basamakların ve örtü tabakalarının kaldırılması amacıyla patlatma yöntemi önerilmiş; bu yöntemin uygulama adımları ayrıntılı olarak sunulmuştur. Adıyaman havzasında, örtü kazısının artan yüksekliği ve elmas tel kesme yönteminin ekonomik etkinliğini yitirmesi nedeniyle, 2019 yılından itibaren patlatmalı kazıya geçilmiş ve 2024 yılı itibarıyla havzadaki tüm aktif mermer işletmelerinde bu yöntem uygulanmaya başlanmıştır. Çalışma kapsamında, 3326,4 m³'lük örtü kazısı hem elmas tel kesme hem de delme-patlatma yöntemiyle yapılarak iki yöntem karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, delme-patlatma yöntemi toplam maliyeti %33,4 oranında azaltarak 141.103 TL'den 93.859 TL'ye düşürmüş, aynı zamanda işlem süresini de %64,19 oranında azaltarak 354,3 saatten 127,05 saate indirmiştir. Ayrıca, patlatma sonrası oluşan pasa malzemenin agrega olarak değerlendirilmesi yöntemin ekonomik avantajlarını artırmaktadır. Bu bulgular, doğaltaş ocaklarında örtü kazısı gerektiren alanlarda patlayıcı kullanımının hem ekonomik hem de operasyonel açıdan güçlü bir alternatif olduğunu göstermektedir. Sunulan veriler, benzer jeolojik ve işletme koşullarına sahip diğer mermer ocakları için de uygulanabilir bir referans oluşturma potansiyeli taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mermer ocakçılığı, Örtü kazı, Delme-Patlatma, Elmas tel kesme, Maliyet ve zaman analizi

ABSTRACT

In this study, all parameters affecting the cost and time of using explosives in overburden removal operations in a marble quarry were evaluated. In the marble production process, the use of blasting has been proposed for the removal of upper benches and overburden layers that are covered with fractured structures and are unsuitable for production purposes; the implementation steps of this method have been presented in detail. Due to the increasing height of the overburden in the Adıyaman basin, and the decreasing economic efficiency of the diamond wire cutting method, a shift to blasting excavation has been initiated since 2019. As of 2024, this method is employed in all active marble quarries in the region. Within the scope of this study, a total of 3326.4 m³ of overburden was excavated using both diamond wire cutting and drilling-blasting methods, and the two approaches were comparatively evaluated. According to the analysis results, the drilling-blasting method reduced the total cost by 33.4%, from 141,103 TL to 93,859 TL, while also reducing the processing time by 64.19%, from 354.3 hours to

127.05 hours. Furthermore, the evaluation of the blasted waste material as aggregate enhances the economic advantages of this method. These findings demonstrate that the use of explosives in overburden removal operations in natural stone quarries is a viable alternative from both economic and operational perspectives. The presented data have the potential to serve as a reference for other marble quarries with similar geological and operational conditions.

Keywords: Marble quarrying, Overburden removal, Drilling and blasting, Diamond wire cutting, Cost and time analysis

GİRİŞ

Adıyaman, doğaltaş rezervi açısından Türkiye'nin önde gelen şehirlerinden biridir. Çalışmaya konu olan mermer ocağı Adıyaman iline 20 km mesafede olan, Kömür Beldesi, Kaşköy mevkinde yer almaktadır (Şekil 1). Söz konusu mermer ocağında Eosen yaşlı dolomitik kireçtaşlarının Dark Emprador ve Light Emprador ticari adları ile satışı gerçekleştirilmektedir (Şekil 2). Tamamen kristalen karbonat minerallerinden (dolomit, az miktarda kalsit) oluşan Emprador mermeri soluk sarımsı kahverengi, masif ve ince tanelidir. Mermerler birbirine paralel olmayan doğrultu atımlı faylar arasında kalıp, rotasyonel bir hareket kazandıklarından irili ufaklı parçacıklar halinde tektonik bir yapı kazanmış ve bu parçacıklar kalsit çimentoyla birbirine bağlanmıştır. Tane boyunca birbirini kesen düzensiz, karbonat dolgulu damarlı yapı gözlenmiştir. Kayaç “kalsitik dolomit” olarak adlandırılmaktadır (Cevheroğlu, 2014).



Şekil 1. Emprador ocağının genel görünümü



Şekil 2. Light Emprador (a) ve Dark Emprador (b)

BÖLGEDEKİ MERMER OCAKÇILIĞININ GELİŞİMİ

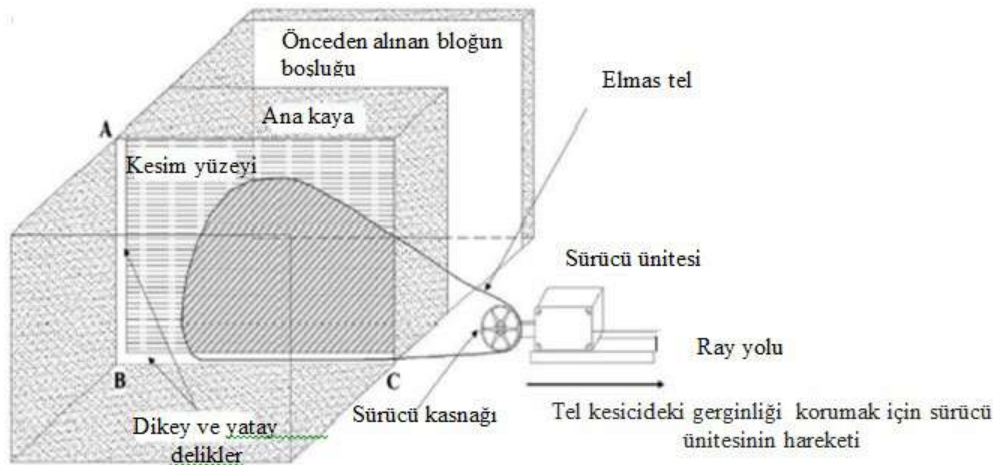
Adıyaman havzasında 2000’li yıllarda üretim denemesine başlanmış olup 2010 yılında yatırımlar artmış, altı mermer ocağı ve üç mermer fabrikası kurulan bölge Emprador havzası olarak adlandırılmıştır. 2012 yılında ise bölgede mermer ocağı sayısı 12’ye yükselmiştir. Üretime başlanan ilk yıllarda ocak verimleri yüksek olan bölgede blok satışları yapılırken, ocak verimi düşükçe dolgu ve güçlendirme yöntemleri uygulanarak ebatlı üretim yapılmaya başlanmıştır (Kalkan, 2019).

Üretime devam edilen alanlarda, yıllar içinde kaldırılması gereken örtü kazı yüksekliğinin 45-50 metreye ulaşması, bu kısmın geleneksel elmaslı tel kesme yöntemiyle alınmasını ekonomik açıdan güçleştirmiştir. Bu nedenle, örtü kazısının daha düşük maliyetle gerçekleştirilebilmesi amacıyla patlatmalı kazı yöntemine geçilmesine karar verilmiştir. Ayrıca 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli meydana gelen depremin ardından inşaat sektöründe agregaya olan talebin artması, patlatma sonucu ortaya çıkan pasa malzemenin agrega olarak değerlendirilmesini mümkün kılarak işletmeye ek bir ekonomik avantaj sağlamıştır.

Patlatma uygulamasına geçildikten sonra 3326,4 m³’lük örtü kazısı hem elmas tel kesme hem de delme-patlatma yöntemiyle yapılarak iki yöntemi maliyet ve işlem süresi açısından karşılaştırmak üzere yapılan analiz takip eden bölümlerde sunulmuştur.

ELMASLI TEL KESME YÖNTEMİ KULLANILARAK YAPILAN ÖRTÜ KAZI İŞLEMİ

Elmaslı tel kesme yönteminde, elmaslı boncukların sıralandığı bir telin, kesim yapılacak mermer yüzeyinin etrafında sonsuz bir halka oluşturacak şekilde bir tahrik ünitesinden aldığı güçle belirli bir hızda döndürülerek uygulanan gerilme ile taşınma prensibi ile kesim yapılmaktadır (Dilmaç ve Görgülü, 2019) (Şekil 3).



Şekil 3. Elmas tel kesme makinasının çalışma prensibi (Rajpurohit vd, 2024)

Çalışmanın yapıldığı ocakta düşey delik açısı 90°, boyu 7 metredir. Yatay deliklerin uzunluğu ise sırasıyla 19,8 ve 24 metredir. Toplamda 14 adet düşey delik ile 19,8 metrelik kenarda 4; 24 metrelik kenarda 10 adet delik delinerek mermerin 6 m*1,8 m*7 m boyutlarında kesilmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde devrilmeye hazır 44 adet dikdörtgen prizma oluşturulmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Elmas tel ile kesilerek devrilmeye hazırlanan tepelemeler

DELME- PATLATMA YÖNTEMİ KULLANILARAK YAPILAN ÖRTÜ KAZI İŞLEMİ

Mermer ocaklarında uygulanan patlatma işleminin amacı, diğer madencilik faaliyetlerinden farklılık göstermektedir. Bu yöntemde amaç, verimliliği yüksek olan üretim bölgesini üzerindeki örtü tabakasından ayırırken, altta kalan sağlam üretim bloklarına zarar vermeden örtü kazısını gerçekleştirmektir (Bhandari and Rathore, 2001; Kulaksız ve Özçelik, 2005; Rathore and Bhandari, 2006; Aydın, 2023). Bu nedenle, patlatma tasarımı kontrollü patlatma prensiplerine göre yapılmalıdır, aksi halde yapılacak en küçük bir hata üretim bloğunda geri dönüşü olmayan hasarlara yol açabilir.

Bu hedef doğrultusunda, delik geometrisi, sıkılama boyu, patlayıcı tipi ve ateşleme düzeni gibi patlatma parametrelerinin dikkatle seçilmesi ve uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada, 7 m basamak yüksekliği için 90° delik eğimiyle, “şleşbeş” düzeninde yerleştirilen ve aralarında 3 metre mesafe bırakılan 89 mm çaplı toplam 40 adet patlatma deliği açılmıştır (Çizelge 1). Patlatmanın kontrollü gerçekleşmesi için her delikte 2 m topuk bırakılmış, 5 m delik boyu için 2,5 m sıkılama uygulanmıştır. Her bir delik için yaklaşık 12,5 kg ANFO kullanılmıştır. Patlatma öncesi ve sonrası ocağın görünümü Şekil 5’te sunulmaktadır.

Çizelge 1. Patlatma parametreleri

Patlatma Parametreleri	
Delik eğimi	Dik
Delik düzeni	Şleşbeş

Basamak yüksekliği (m)	7
Delik çapı (mm)	89
Delikler arası mesafe (m)	3
Delik boyu (m)	5
Sıkılama boyu (m)	2,5
Delik sayısı (adet)	40
Boşaltılan alan (m ³)	3326,4

DELME-PATLATMA VE ELMAS TEL KESME İŞLEMİ İLE YAPILAN ÖRTÜ KAZI İŞLEMİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Toplam 3326,4 m³'lük alanın boşaltılması için delme patlatma ve elmas tel kesme yöntemleri kullanılarak yapılan çalışma, süre ve maliyet açısından karşılaştırılmış ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.



a) Patlatma öncesi



b) Patlatma sonrası

Şekil 5. Patlatma öncesi ve patlama sonrası ocak görünümü

SÜRE AÇISINDAN DEĞERLENDİRME

Elmas tel kesme yöntemi için 7 metre uzunluğunda açılan merkez delik her iki yönde açılan 19,8 ve 24 m'lik yatay delikler ile kesiştirilmektedir. Toplamda açılan 14 adet düşey delik ile 19,8 metrelik kenarda 4; 24 metrelik kenarda 10 adet delik delinerek mermerin 6 m*1.8 m*7 m boyutlarda 4 adet parsel kesim, 11 adette doğrama kesimi yapılmaktadır. Bu şekilde devrilmeye hazır 44 adet dikdörtgen prizma oluşturulmaktadır. Bu işlemlerin yapılması için gereken süreler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Elmas tel kesme yöntemi için gereken süre

Yapılan iş	Ölçü	Adet	Birim zaman	Zaman(h)
Düşey delik	7 m	14	6 (m/h)	16,3
Parsel delikler	19,8 m	4	6 (m/h)	13,2
Doğrama delikleri	24 m	10	6 (m/h)	40
Alt kesim	24*19,8 m ²	1	12 (m ² /h)	39,6
Parsel kesim	19,87 m ²	4	12 (m ² /h)	46,2
Doğrama kesim	247 m ²	11	12 (m ² /h)	154
Devirmeler	61,87 m ³	44	0,014 m ³ /h	45
Toplam zaman				354,3

Delme-patlatma yöntemi için ise 7 metrelik basamak yüksekliği oluşturmak üzere delinen merkez delik ile 19,8 m ve 24 m delinen iki yan kesim deliğiyle merkezde delinen düşey delik birleştirilerek alt kesme yapılır (Şekil 6). Burada amaç patlatma yapılacak örtü kısmını daha sonra üretimi yapılacak ana kayaya zarar vermeden ayırmaktır. Alt kesim, 1. ve 2. merkez kesim işlemleri sonrasında 2 m topuk bırakılarak, 2,5 m sıkılama yapılarak 5 m derinlikte 40 adet patlatma deliği delinir. Bu işlemler için gereken süreler Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 6. Alt kesim için delinen düşey ve yatay delikler

Çizelge 3. Delme-patlatma yöntemi için gereken süre

Yapılan iş	Ölçü	Adet	Birim zaman	Zaman(h)
Düşey delik	7 m	1	6 (m/h)	1,3
Patlatma delikleri	5 m	40	6 (m/h)	33,3
1.Yan kesim deliği	19,8 m	1	6 (m/h)	3,3
2.Yan kesim deliği	24 m	1	6 (m/h)	4
Alt kesim	2419,8 m ²	1	12 (m ² /h)	39,6
1.Merkez kesim	247 m ²	1	12 (m ² /h)	14
2.Merkez kesim	19,87 m ²	1	12 (m ² /h)	11,55
Boşaltma				20
Toplam zaman				127,05

MALİYET AÇISINDAN DEĞERLENDİRME

Delme-patlatma yönteminde 2 adet ekskavatör, 2 adet kaya kamyonu, elmaslı tel kesme yönteminde ise 3 adet ekskavatör, 1 adet loader, 2 adet kaya kamyonu ile çalışılmıştır. İş makinelerinin ortalama yakıt tüketimi 19 lt/saat, yakıtın litre fiyatı 39 TL olarak hesaplanmış, kullanılan yöntemlere göre toplam yakıt maliyeti Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Yakıt maliyeti

Kullanılan yöntem	Toplam çalışma süresi (h)	Tüketilen toplam yakıt miktarı (lt)	Toplam maliyet (TL)
Elmas tel kesme	45	855	33345

Elektrik sarfıyatı hesaplanırken elektrik birim fiyatı 5 kW/TL, birim elektrik tüketimi ise 7 kw/h olarak alınmıştır. Elmas tel kesme yönteminde Çizelge 2’de verilen toplam süreden devirme işlemi için geçen süre çıkarılarak 309,3 saat, delme-patlatma yöntemi için ise Çizelge 3’te verilen toplam süreden boşaltma için geçen süre çıkarılarak 107,05 saat üzerinden değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5. Elektrik tüketim maliyeti

Kullanılan yöntem	Toplam çalışma süresi (h)	Tüketilen toplam elektrik (kw)	Toplam maliyet(TL)
Elmas tel kesme	309,3	2226,96	11134,8

Delme-patlatma yönteminde 781,8 m²’lik alan kesilerek 39090 lt su tüketilirken, elmas tel kesme yönteminde 2878 m²’lik alan kesilmiş ve 143900 lt su tüketilmiştir. Birim su tüketimi 50 lt/ m², birim su maliyeti 0,035 (TL/lt) olarak alınmış ve toplam su maliyeti bu verilere göre hesaplanarak Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. Su maliyeti

Yöntem	Toplam kesilen alan (m ²)	Toplam su tüketimi (lt)	Toplam maliyet (TL)
Delme-patlatma	781,8	39090	1368,15
Elmas tel kesme	2878	143900	5036,5

Patlatma işlemi için 1 adet elektrikli kapsül, 40 adet nonel kapsül, 500 kg ANFO, 20 kg dinamit, 20 m zil teli kullanılmış ve toplam patlatma maliyeti 43794,16 TL olarak hesaplanmıştır (Çizelge 7). Delme patlatma ve elmaslı tel kesme işlemleri için gereken işçilik birim fiyatı 170 TL ve elmas tel birim fiyatı ise 468 TL olarak hesaplanmış sonuçlar Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 7. Patlatma için kullanılan patlayıcı madde miktarları ve maliyeti

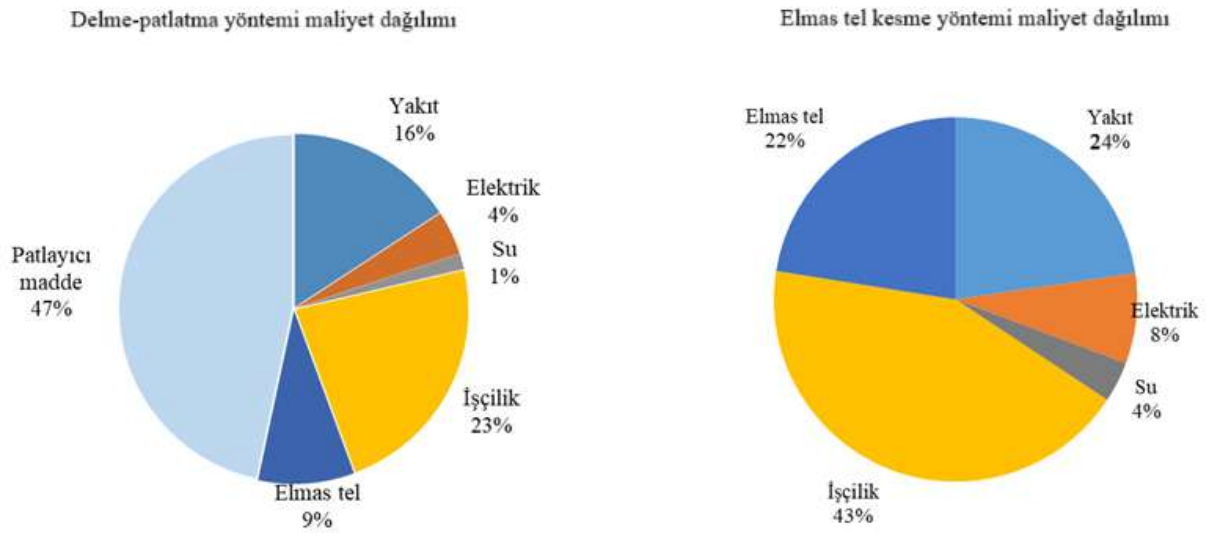
Kullanılan malzeme	Miktar	Birim fiyat (TL)	Toplam fiyat (TL)
Elektrikli kapsül	1	41,16	41,16
Nonel kapsül	40 adet	165	6600
ANFO	500 kg	50,35	25175

Dinamit	20 kg	93,50	1870
Zil teli	20 m	5,4	108
Patlatma hizmeti			10000

Çizelge 8. İşçilik ve elmas tel maliyeti

Yöntem	İşçilik			Elmas tel
	Toplam süre (h)	Maliyet(TL)	Uzunluk(m)	Maliyet(TL)
Delme-patlatma	127,05	21598,5	18	8424
Elmas tel kesme	354,3	60231	67	31356

Yapılan çalışmadan elde edilen maliyet verileri birlikte değerlendirildiğinde delme patlatma yönteminde maliyetin en büyük kısmını patlatma giderleri (%47) oluştururken ikinci en büyük maliyet kaleminin ise %23 ile işçilik giderleri olduğu görülmektedir. Yakıt gideri toplam maliyetin %16'sını, elmas tel %9'unu ve elektrik ise %4'ünü oluşturmaktadır. En düşük maliyet ise %1 ile su giderlerine aittir. Elmas tel kesme yönteminde ise maliyetin en büyük kısmını işçilik giderleri (%43) oluştururken yakıt %24, elmas tel %22, elektrik %8, su ise %4 'ünü oluşturmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Delme patlatma ve elmas tel kesme yöntemleri maliyet dağılımı

SONUÇ

Bu çalışma, mermer ocakçılığında kullanılan iki farklı örtü kazı yönteminin zaman ve maliyet açısından karşılaştırmalı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Elde edilen bulgular, üretimi yapılmayacak kısımlarını dekapajı için patlatmalı kazı yönteminin önemli avantajlar sağladığını göstermektedir.

3326,4 m³ alanın boşaltılması için elmas tel kesme yöntemi ile toplam maliyet 141.103,3 TL iken, delme-patlatma yöntemi ile bu maliyetin 93.858,61 TL'ye düştüğü belirlenmiştir. Birim maliyet açısından değerlendirildiğinde, elmas tel kesme yönteminde birim maliyet 42,42 TL/m³ iken, delme-patlatma yönteminde %33,4 azalarak 28,22 TL/m³'e gerilemiştir.

Süre açısından incelendiğinde ise patlatmalı kazı yöntemi daha avantajlı bulunmuştur. Elmas tel kesme yöntemi ile kazı 354,3 saatte tamamlanırken, delme-patlatma yöntemi ile bu süre 127,05 saate düşmüştür. Birim kazı süresi de elmas tel kesme yönteminde 0,1065 saat/m³ (6,39 dakika/m³) iken, delme-patlatma yönteminde % 64,19 azalarak 0,0382 saat/m³ (2,29 dakika/m³) olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma, patlayıcı madde kullanımının doğaltaş ocaklarında örtü kazı işlemlerinde maliyet ve zaman açısından önemli avantajlar sağladığını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, sektördeki uygulamaların geliştirilmesine katkıda bulunacak ve daha verimli kazı yöntemlerinin benimsenmesine yol açacaktır. Gelecekteki çalışmalarda, farklı kayaç tipleri ve operasyonel koşullar altında bu yöntemlerin performansının karşılaştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Aydın, D. (2023). Bir mermer ocağında örtü tabakası kazı yönteminin zaman ve maliyet açısından değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 14(4), 707–712. <https://doi.org/10.24012/dumf.1353342>

Bhandari, S., Rathore, S. S. (2001). Extraction of marble blocks by control blasting techniques- A case study. Proc. Of the 10th Int. Sym. On Mine Planning and Equipment Selection (s. 295–302). New Delhi.

Cevheroğlu, Ç. S. (2014). The investigation of the effects of operational variables of polishing machine and material properties of marble on surface quality and optimization. PhD Thesis, Çukurova University, Adana, Turkey.

Dilmaç, M. K., Görgülü, K. (2019). Elmaslı tel ile mermer üretiminde basamak geometrisinin kesme performansı üzerine etkileri. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (17), 663–675.

Kalkan, S. (2019). Adıyaman yöresindeki emprador tipi mermerlerin oluşumu ve özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kulaksız, S., Özçelik, Y. (2005). Doğaltaş (mermer) blok kesim/üretim teknolojileri. S. Kulaksız (Ed.), Doğaltaş (mermer) maden işletmeciliği ve işleme teknolojileri. s. 285–423, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını.

Rajpurohit, S. S., Fissaha, Y., Sinha, R. K., et al. (2024). Effect of rock properties on wear and cutting performance of multi blade circular saw with iron based multi-layer diamond segments. Scientific Reports, 14, 4590. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54625-5>

Rathore, S. S., Bhandari, S. (2006). Study on controlled blasting techniques in dimensional stone quarrying. IE(I) Journal–MN, 86, 46–49.

BAZI TÜRK DOĞALTAŞ OCAKLARINDA ZİNCİRLİ KOLLU KESİCİ MAKİNALARIN VERİMLİLİK ANALİZİ

ARMED CHAIN SAW MACHINE PERFORMANCE ANALYSIS OF SOME TURKISH NATURAL STONE

S. Kulaksız¹, F. Bayram^{2*}, E. Özkan²

¹ Emekli Öğretim Üyesi

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

*Sorumlu Yazar: bayramfatih@aku.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, Türkiye'deki doğaltaş ocaklarında kullanılan zincirli kollu kesme makinelerinin (ZKKM) kesim performansı incelenmiştir. Veriler, standart üretim koşullarında ocak mühendisleriyle iş birliği içinde toplanmış olup makineler normal çalışma parametreleriyle çalıştırılmıştır. Çalışmada, ocak isimleri, üretici firmalar ve makine markaları ticari hassasiyetler nedeniyle kodlanmıştır. Araştırmada, Belçika mavisi kireçtaşı (200 MPa basınç dayanımlı) üzerinde XF marka ZKKM'nin saatlik 13,5 m² kesim hızı referans alınmıştır. Türkiye'de yaygın olarak işlenen bej mermerler (90-140 MPa), Limra kireçtaşı (44-49 MPa) ve travertenler (40-45 MPa) için kesim performansları karşılaştırılmıştır. Türkiye'deki doğaltaş ocaklarında ZKKM'lerin kesim verimliliği Belçika mavisine göre genel olarak düşük bulunmuştur. Performans farklılıklarında kesici uç dizilimi ve türünün etkili olduğu gözlemlenmiştir. İşletmelerin, kendi ocak koşullarında detaylı değerlendirme yaparak verimlilik artırıcı önlemler almaları önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Zincirli kollu kesici makine, kesici uçların tipi ve dizilimi, kesim oranları verimlilik analizi

ABSTRACT

In this study, the cutting performance of chain arm cutting machines (CACM) used in natural stone quarries in Turkey was investigated. Data were collected in cooperation with quarry engineers under standard production conditions, and the machines were operated with their normal working parameters. In the study, quarry names, producer companies, and machine brands were coded due to commercial sensitivities. In the research, the hourly cutting speed of 13,5 m² of the XF brand CACM on Belgian blue limestone (with a compressive strength of 200 MPa) was taken as a reference. Cutting performances for beige marbles (90-140 MPa), Limra limestone (44-49 MPa), and travertines (40-45 MPa), which are commonly processed in Turkey, were compared. The cutting efficiency of CACMs in natural stone quarries in Turkey was generally found to be lower compared to Belgian blue limestone. It was observed that the cutting pick arrangement and type were effective in performance differences. It is recommended that enterprises take productivity-enhancing measures by making detailed evaluations in their own quarry conditions.

Keywords: Armed Chain Saw Machine, type and arrangement of cutting tips, cutting rates efficiency analysis

GİRİŞ

Zincirli kollu kesme makinesi (ZKKM), doğaltaş ocaklarında blok üretiminin verimliliğini ve etkinliğini artırarak önemli bir dönüşüm yaratmıştır. Bu makineler, bir zincire bağlı kesici uç oluşan sürekli bir döngü kullanarak doğaltaşın ocaktan çıkarılmasında güçlü bir kesme yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır (Sarışık ve Sarışık, 2012). Zincirli kollu kesme makinesinin avantajı, özellikle değişken jeolojik koşullarda, elmas tel kesme gibi geleneksel yöntemlere kıyasla farklı malzemeleri daha verimli olarak kesebilmektedir. Zincirli kesme makinelerinin ocakçılıkta kullanılmaya başlanmasından bu yana üretim oranlarında belirgin iyileşmeler gözlemlenmiş olup bu durum hem operasyonel maliyetleri hem de kesme performansını etkilemiştir.

Doğaltaşların oluşum süreçleri, mineralojik-petrografik bileşenleri ve fiziko-mekanik özellikleri üzerinde değişiklik yapma olanağımız bulunmamaktadır. Bu parametreler sabit olmakla birlikte, oluşum ortamına bağlı olarak alansal değişimler ve belirsizliklerle karşılaşılması mümkündür. Dolayısıyla, aynı özellikteki kayalarda dahi kesim performansı aynı şekilde gerçekleşmeyebilir.

Zincirli kollu kesme makinesi Kaya kesme verimliliğinin analizinde, hem kayaların fiziksel-mekanik özellikleri hem de zincirli kesme makinalarının teknik parametreleri belirleyici rol oynamaktadır (Koç, 2019; Karaabat, 2022). Kayaların basınç ve çekme dayanımı, sertlik değerleri ve aşınma direnci gibi özellikler kesme performansını doğrudan etkileyen başlıca faktörler arasındadır. Ayrıca kullanılan kesme makinasının motor gücü, kol uzunluğu, ilerleme hızı ve zincir dönüş hızı gibi teknik özellikleri de verimlilik üzerinde kritik etkiye sahiptir. Ayrıca kesme uçlarının malzeme yapısı, geometrik şekilleri, keski dizilimi ve uç sayısı gibi parametreler de kesme işleminin performansını belirleyen diğer önemli değişkenlerdir (Çopur vd., 2006; Çopur, 2010; Dagrain, 2011; Dagrain vd., 2012). Bu çalışmada, zincirli kollu kesme makinesi kesme makinalarının farklı koşullar altındaki performanslarının kesme hızlarına göre karşılaştırılması amaçlanmıştır.

ZİNCİRLİ KOLLU KESME MAKİNELERİNİN KESİM PERFORMANSI VERİLERİ

Bu çalışmada kullanılan veriler, doğaltaş ocaklarında görev yapan ocak mühendisleri ile iş birliği içerisinde standart üretim koşullarında toplanmıştır. Veri toplama sürecinde zincirli kesme makinelerinin (ZKKM) çalışma parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmamış, makineler normal işletme koşullarında çalıştırılmıştır. Şekil 1’de zincirli kollu kesme makinesi gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında; ocak isimleri, üretici firmalar ve kullanılan ZKK markaları, ticari hassasiyetler ve tarafsızlık ilkesi gözetilerek harf ve sembollerle kodlanmıştır. Toplanan veriler; doğaltaş türü , ZKKM markası, makine kol uzunluğu, saatlik kesim hızı parametreleridir.



Şekil 1. Zincirli kollu kesme makinesi (<https://www.demmak.com/urunlerimiz/demmak-kollu-zincirli-kesici-makinasi-dzk-3400/>)

VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Verimlilik analizlerinde birçok parametrenin rol oynadığı daha önce belirtilmiştir. Doğaltaşlara ilişkin parametreler değiştirilemez niteliktedir. Kesici makinelerin parametreleri ise sınırlı yarı-değişken özellik göstermektedir.

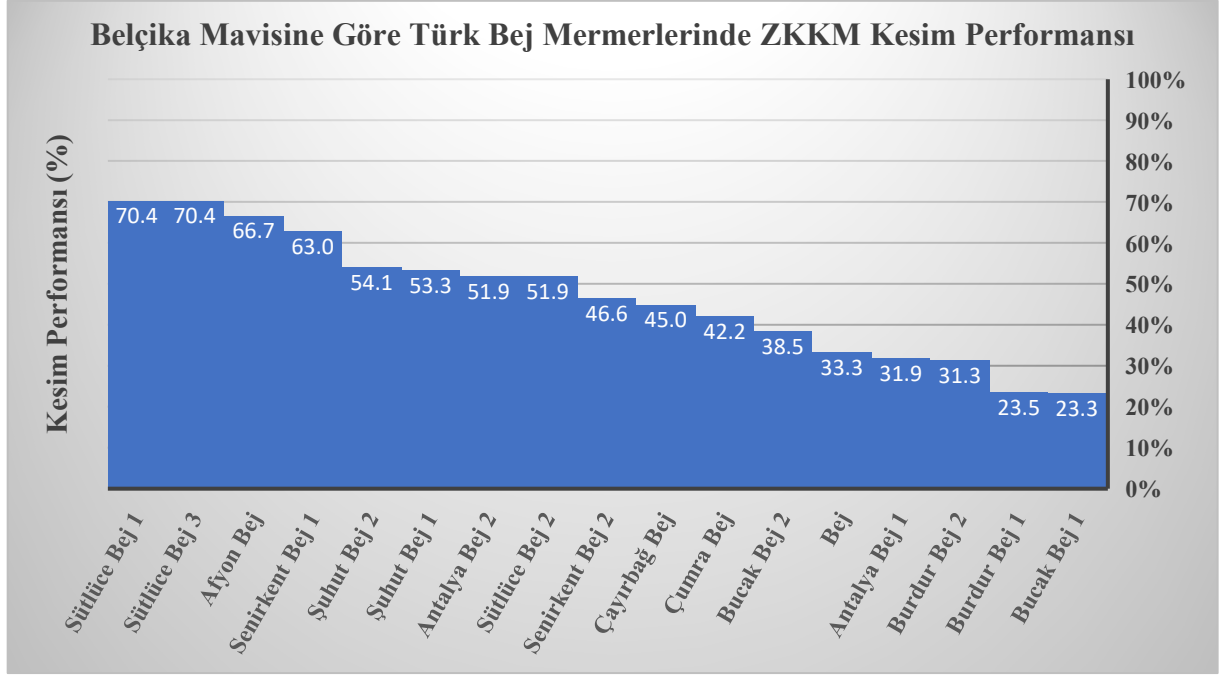
Bu araştırma çalışmasında, aynı veya benzer teknik özelliklere sahip bir makinenin performansı, Belçika mavisi olarak adlandırılan kireçtaşı üzerinde XF marka makinenin saatlik kesim oranı referans alınarak değerlendirilmiştir (Çizelge 1). Taşın tek eksenli basınç dayanımı 200 MPa olup kesim hızı 13,5 m²/s olarak ölçülmüştür (Marmomacchine, 2011).

Çizelge 1. Bazı Türk Doğaltaşlarında ZKKM Kesme Özellikleri ve Belçika Mavisi Kireçtaşına Göre Performansları

Kullanıldığı Ocak	Markası	Kol Uzunluğu (m)	Kesim Hızı (m ² /sa)	Kesici Uç Dizilimi	% Performans
Traverten 1	XE	6,2	4,45	A	33,0
Traverten 2	XF	3,4	11,82	B	87,6
Burdur Bej 1	XF	7,2	3,17	A	23,5
Burdur Bej 2	XF	7,4	4,23	A	31,3
Limra 1	XF	7,4	7,65	C	56,7
Limra 2	XF	3,4	5,42	C	40,1
Limra 3	XF	3	12,30	D	91,1

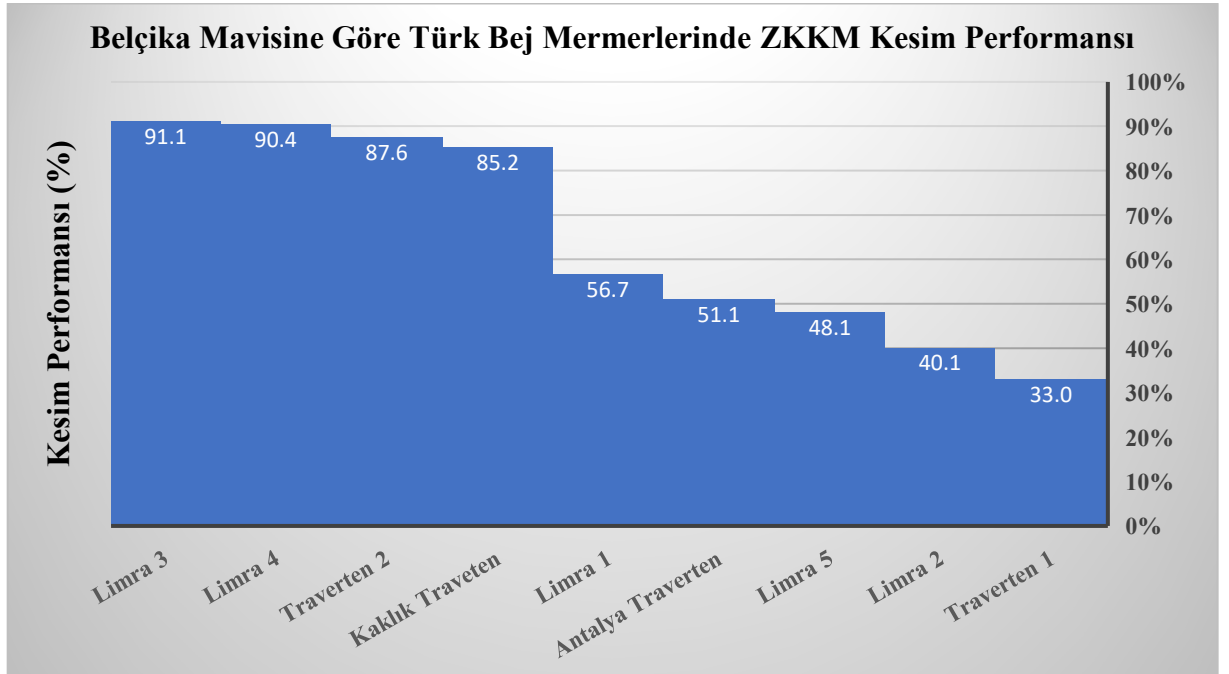
Limra 4	XF	3,4	12,20	D	90,4
Bucak Bej 1	XF	3,4	3,15	A	23,3
Bucak Bej 2	XF	7,4	5,20	E	38,5
Şuhut Bej 1	XF	7,4	7,20	F	53,3
Şuhut Bej 2	XF	7,4	7,30	-	54,1
Limra 5	ZG	5,4	6,50	G	48,1
Antalya 1 Traverten	YD	4,3	6,90	H	51,1
Antalya Bej 1	XF	4,9	4,30	I	31,9
Antalya Bej 2	XF	7,2	7,00	J	51,9
Senirkent Bej 1	XF	7,4	8,50	K	63,0
Senirkent Bej 2	XF	3,4	6,29	K	46,6
Kaklık Traverten	YD	6,8	10,50	H	85,2
Afyon Bej	YD	6,8	9,00	K	66,7
Bej	YD	6,8	4,50	G	33,3
Sütlüce Bej 1	B	7,2	9,50	L	70,4
Sütlüce Bej 2	HB	7,2	7,00	M	51,9
Sütlüce Bej 3	XF	7,2	9,50	N	70,4
Çayırbağ Bej	XB	7,3	6,07	O	45,0
Çumra Bej	XF	7,4	5,70	P	42,2

Bu çalışmada, Türkiye'de yaygın olarak üretilen doğaltaşların Belçika mavisi kireçtaşına göre ZKKM göre kesme performansı araştırılmıştır. Saha çalışmaları ve literatür çalışmaları sonucunda bej mermerlerin tek eksenli basınç dayanımının 90-140 MPa aralığında, Limra kireçtaşının ise 44-49 MPa ve travertenlerin 40-45 MPa aralığında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Türk doğaltaş ocaklarında Belçika Mavisine göre ZKKM kesim performansları Bej mermerler için Şekil 2'de, Limra ve Travertenler için Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Bej Mermerler için Kesim Performansı

Bej mermerler için kesim performansı %23 ile %70 arasında değişmektedir. Bununla birlikte kesim performansı ortalaması %47 olarak tesbit edilmiştir. Kesim hızları ise 3,15 m²/sa ve 9,15 m²/sa arasında değişmektedir.



Şekil 3. Limra ve Traverten için ZKKM Kesim Performansı

Limra ve traverten için kesim performansı %33 ile %91 arasında değişmektedir. Ayrıca, kesim performansı ortalaması %47 olarak tesbit edilmiştir. Kesim hızları ise 4,45 m²/sa ve 12,30 m²/sa arasında değişmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırma sonuçlarına göre Türk doğaltaş ocaklarında çalıştırılan zincirli kollu kesici makinelerin genel anlamda da kesme verimlilikleri düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda her bir doğaltaş ocak işletme sahibi ve teknik elemanları kendi ocaklarında değerlendirmelerini yaparak nedenlerini saptamaları önerilmektedir. Belçika mavisinde kullanılan XF marka ZKKM ile Türk Doğaltaşlarında yapılan kesimlerde performanslar daha düşüktür. ZKKM kesici uç dizilimi ve türü kesme verimliliğini etkilemektedir. Bununla birlikte Türk doğaltaş ocaklarında benzer kayaçlarda farklı kesici uç dizilimleri kesim performansında farklılıklar göstermektedir.

KAYNAKLAR

Candemir, İ. (2021). Doğaltaş ocaklarında kullanılan zincirli kesme makinelerinin kaya özelliklerine bağlı performans tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi.

Carrières du Hainaut. Belgian Blue Limestone Quarry. <https://www.carrieresduhainaut.com/en/>

Çalışkan, M. A., Yavuz, H. (2019). Mermer ocaklarında kullanılan zincirli kesme makinelerinin performansının araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23 (Özel Sayı), 108-118.

Çelik, M. A., Ersoy, M., Yeşilkaya, L., Kayı, Z. (2017). Mermer ocaklarında elmas tel kesme ve zincirli kollu kesme makinelerinin birlikte kullanımının incelenmesi. Journal of Polytechnic, 20 (2), 459-473.

Çopur, H., Balcı, C., Bilgin, N., Tumaç, D., Feridunoğlu, C., & Dincer, T. (2006). Cutting performance of chain saws in quarries and laboratory. İçinde Proceedings of the 15th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (s. 1-6). Torino, Italy.

Çopur, H., Balcı, C., Bilgin, N., Tumaç, D., Düzyol, İ., Kekeç, N. (2007b). Doğaltaş madenciliğinde kullanılan zincirli kesme makinelerinin performansı. C. Şensöğüt (Ed.), 1. Maden Makinaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s. 37-46, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Dumlupınar Üniversitesi.

Çopur, H. (2010). Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47, 104–120.

Dagrain, F. (2011). Understanding stone cutting mechanisms for the design of new cutting tools sequences and the cutting optimization of chain saw machines in Belgian Blue Stone quarries. Diamante Applicazioni & Tecnologia, 66, 54-67.

Dagrain, F., Marchandise, P., & Brux, P. (2012). Monitoring of chain saw machines to follow their performances in quarries. Diamante Applicazioni & Tecnologia, 69, 43–49.

Demmak.Demmak Kollu Zincirli Kesici Makinası DZK 3400. Erişim tarihi: 20 Mayıs 2024, <https://www.demmak.com/urunlerimiz/demmak-kollu-zincirli-kesici-makinası-dzk-3400/>

Karaabat, V. (2022). Mermer ocağı ekipmanlarının etkinliklerinin değerlendirilmesi üzerine yeni bir yaklaşım. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.

Kılıç, İ., Demirdağ, S. (2021). Köprülü elmas tel kesme makinası ile zincirli kollu kesici makinanın kesim performanslarının karşılaştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 509-525.

Kulaksız, S. (2021). Doğaltaş (mermer) maden işletmeciliği ve işleme teknolojileri (5. Baskı). TMMOB Maden Mühendisleri Odası.

Kulaksız, S. (2022). Zincirli kollu kesicilerde teknolojik gelişmeler ve kesme takımında kırılma nedenleri. *IMCET 2022 Proceeding of 27. International Mining Congress and Exhibition of Turkey* (s. 1025-1034). TMMOB Maden Mühendisleri Odası.

Marmo Macchine. (2011). World Record PMDS Belgium Blue. *Marmo Macchine*, (220), 138-139.

Özkan, E., Koç, Ş. A. (2022). Doğaltaş ocaklarının etkinliğinin veri zarflama analizi yöntemi ile araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Sarışık, A., Sarışık, G. (2012). Investigation of the cutting performance of the natural stone block production in quarries with armed-chain cutting machine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 227(6), 1291-1301. <https://doi.org/10.1177/0954406212460151>

Sarışık, A., Özkan, E., Sarışık, G. (2013). Doğaltaş ocaklarında JCB traktörlü kollu zincirli kesici makineleri ile blok üretimi ve kesim performanslarının araştırılması. 4. Maden Makinaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı (s. 133-144). İzmir, Türkiye.

EFFECT OF DISCONTINUITIES ON BLAST FRAGMENTATION IN OPEN-PIT EXCAVATION: A COMPARATIVE STUDY BETWEEN DIFFERENT ROCK TYPES

Nur Lyana Khalil¹, Muhammad Irman Khalif Ahmad Aminuddin¹, Hareyani Zabidi^{1*}

¹*School of Materials and Mineral Resources Engineering, Universiti Sains Malaysia, 14300, Penang, Malaysia*

**Corresponding Author: Hareyani Zabidi*

Email: srhareyani.zabidi@usm.my

Tel. +60135016293

ABSTRACT

Thirty blasts rounds are investigated in this study to determine the relationship between existing spacing and persistence, on fragmentation at three different quarries consisting of three different types of rocks: granite, limestone, and marble in the vicinity of Kinta Valley, Perak, Malaysia. Three phases were carried out throughout the research, pre-blast (discontinuities mapping and sample collection), post-blast (muckpile photographing, image analysis, lab testing, and other raw data processing), and finally the assessment phase: size distribution, particularly the characteristic size, X_c , from each blast are then compared and linked to their respective UCS and structural data to evaluate the influence of these properties on resultant X_c . It is revealed that both compressive strength and structural properties work in tandem in influencing the blast outcome. Additionally, the shape of fragments was observed to be influenced by the way discontinuities intersect in the rock mass and the size was influenced by the spacing and persistence of the discontinuities. The overall results suggest that strength of rock mass, discontinuities' dip angle and the intersection with the slope face together with their structural properties does affect the size of fragments produced with some dependency on the properties of different types of rocks.

Keywords: Blasting, Fragmentation, Discontinuities analysis, Image analysis, Size Distribution

INTRODUCTION

Blasting operation is more than just fragmenting rocks, the economics of many quarrying operations in fact depends on the fragments' size distribution. The degree of fragmentation is an important aspect of blasting; good fragmentation can be achieved with good blasting practice. Commonly, blasting in quarry operations is designed and carried out to prepare *in situ* rock mass for downstream processes with little concern of achieving good fragmentation, only to fulfil daily/monthly production tonnage. Ideally, fragmentation is considered good when there is no need for secondary breakage before the fragments can be hauled to the next processing stages and with a minimal number of unsaleable fines (Chakraborty et al., 2004; Cunningham, 2005). Ouchterlony (2003) has reviewed studies regarding process efficiency that have been previously done, and it has been proven that fragmentation does affect subsequent downstream processes' efficiency. Fragmentation depends on two parameters: the uncontrollable (geology of the mine site) and controllable parameters (design of the blast) (Hustulid, 1999). From the two parameters affecting fragmentation mentioned, the focus of this paper is on the uncontrollable parameters. Geological features influencing fragmentation fall into two groups. The first group is physicommechanical properties which include properties such as strength, elasticity, hardness, deformability, density, etc. These properties are dependent upon composition,

internal bonds, rock texture, and distribution of minerals forming the rock. The second group is the structural properties of the discontinuities that consist of orientation, spacing and persistence of discontinuities, aperture, and the in-situ block sizes, created by a range of long-term geological processes (Latham and Lu, 1999; Hafsaoui and Talhi, 2009). Mining process is sequential and can be visualized using a flow diagram such as the one shown in Fig 1. It is known that geological features do affect fragmentation, however, there is no one size that fits all blast guide as geological features vary depending on the locality; each locality is unique with its own features. It has been brought to our attention that there have only been a few studies done on this topic for local sites, so it is necessary to analyze the geological feature of the chosen local site as it is crucial to comprehend the in-situ geological features of the site to study how they affect the outcome of a blast. For this research project, the focus is on persistence and spacing properties. Three quarries in the Kinta Valley area made up of three types of rock (granite, limestone, and marble) were selected for the purpose of comparison studies on the effect of geological features of different types of rock.

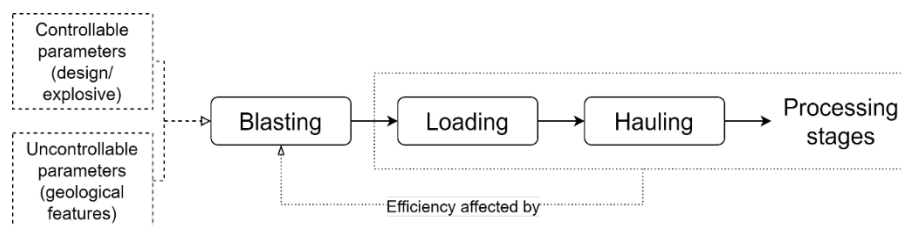


Figure 1. Mining/extraction process flow diagram

METHODOLOGY

Data collected on-site includes orientation, spacing, and persistence of discontinuities as determined by discontinuities mapping via conventional window/scanline mapping using geological (Brunton) compass, but only persistence and spacing will be discussed in this paper. Both spacing and persistence were measured in length ranges and assigned numbers based on the Rock Mass Rating (RMR) system (refer Table 1). Discontinuities accounted for were joint sets and bedding.

Image analysis was selected to measure the size of fragments as it is the most practical method for large scale production blast compared to sieving and other direct measurement methods. After a blast was carried out, images of muckpile are taken to measure the size of blasted rock fragments. In each picture, two scales (1 m painted wooden planks/sticks or PVC pipes, as shown in Fig 2b) were placed as a size reference. Two scales were used instead of one for tilt correction as the line of observation is not perpendicular to the muckpiles surface (WipWare Technical Services, 2003). These images were analyzed using image analysis software “WipFrag” to obtain its fragments size distribution and was plotted in cumulative percent passing size graph; characteristic size, X_c (X63.2) obtained from the plot was used as the benchmark to evaluate the fragmentation. Statistical analysis to assess the correlation between the geological features and fragment size using ANCOVA (analysis of covariance) and contour plot were employed for individual analysis of spacing and persistence, and orientation. Fragmentation assessment from each blast was then compared and were linked to their respective rock mass properties and structural data to evaluate the impact of those properties on resultant fragmentation. For ease of reporting, each parameter was assigned with abbreviations: spacing (SP), and persistence (PER).

Table 1. RMR-Based Numerical Ratings for Discontinuity Spacing and Persistence

Conditions	Parameters / Number assigned				
	1	2	3	4	5
Persistence (m)	>20	10-20	3-10	1-3	<1

Spacing	<60 mm	60-200 mm	200-600 mm	0.6-2 m	>2m

SITE DESCRIPTION

The selected three quarries: LA, LC, and IM; each representing a different type of rocks are all located in Kinta Valley in the state of Perak, Malaysia mostly made up of mountainous limestone and enormous karstic formation as well as pinnacle limestone bedrock (Hutchison and Tan, 2009). The valley is underlain by a sequence of sedimentary rock that has been intruded by granitoids and associated late phase minor intrusives. The sedimentary rock in the valley had also been affected by both thermal and regional metamorphism caused by the intrusion of granitoids and earth movement during and after the granitic emplacement bordering the valley during late Triassic. The granite Main Range runs in a north-south direction for more than 400km forming the ‘backbone’ of Peninsular Malaysia on the east and northeast-southwesterly trending Kledang Range (about 40 km) on the west formed an inverted V-shape encompassing the valley on topography (Ingham and Bradford, 1960; Rajah, 1979; Meng *et al.*, 2014). Geological map of Kinta Valley showing the distribution of lithologies across the valley is provided in Figure 2a: LA (granite) is located on the Main Range granite near the contact zone with the valley and IM (marble) is near the contact zone with Main Range granite not far from LA, while LC (limestone) is located at the north of the valley. Both LC and IM are located on limestone/marble hills (Figure 2c-e).

RESULT AND DISCUSSION

Discontinuities sets’ orientation

All data collected and the result obtained from WipFrag are summarised. For LA, there were a total of 729 joints mapped, 304 joints and bedding were mapped for LC and 502 joints for IM.

Discontinuities sets’ spacing and persistence

From the spacing and persistence data, the frequencies of each spacing and persistence for all three quarries are visualized as bar chart in Fig 3 (with spacing and persistence numbering based on Table 1). From the bar chart the distribution of both spacing and persistence can be examined; it is noticed that the frequency pattern of each quarry is different. For LA, more than half of the joints are between 10 to 20 m long; these joints are mainly the sub-vertical to vertical joints that can be generally seen around the quarry which bench height is ~15 m. Meanwhile, half of LC’s recorded persistence was 3 - 10 m which mostly comprises of beddings; the bedding at several locations in quarry B was observed to have undergone tectonic movement based on minute changes in orientation of the same bedding plane and this correspondingly affect the recorded length despite the bedding plane spanning the whole mapped area. Bedding with length of more than 20 m are the sets that have not been moved which was recorded having the second highest frequency. IM shows almost the same pattern as LA where joints with 10-20 m recorded as the highest number and 3-10 m as second highest, though there were no more than 20 m joints was recorded. Among these three quarries, only LC was recorded having a bedding plane with length less than 1 m.

In term of spacing, the only similarity is between LC and IM where the number of joints/beddings with spacing 60-200 mm and 200-600 mm has almost the same frequency. Whereas for LA, spacing with similar frequency are joints with spacing 200-600 mm and 0.6-2.0 m. Each quarry’s highest mapped spacing were different with LA: 200-600 m, LC: 60-200 mm and IM: 0.6-2 m. Another noticeable difference is that LC has a low number of discontinuities with spacing 0.6-2 m compared to LA and IM.

Plus, only IM logged joints with spacing of more than 2 m and did not have any joints with spacing less than 60 mm. In the case of LC, both horizontal bedding and vertical joints mostly belong in 60-600 mm spacing range, their intersection resulted in rectangular/flaky blocks around this size range, and this can be observed especially in quarry B.

Analysis of covariance (ANCOVA) was conducted for persistence and spacing for each quarry while controlling for strength, dip angle, intersection angle and the interaction of dip angle and intersection angle with each levels labelled as in Table 1. It was found that there was a significant difference in mean X_c between the SP and PER levels while controlling for the covariates for all three quarries. The ANCOVA figure for each quarry is listed as below (Table 2 and 3).

Mean X_c for each SP and PER level grouped into 200 mm intervals from smallest to largest are shown in Table 6. From the table, the order of SP and PER in increasing X_c mean produced for all quarries can be discerned.

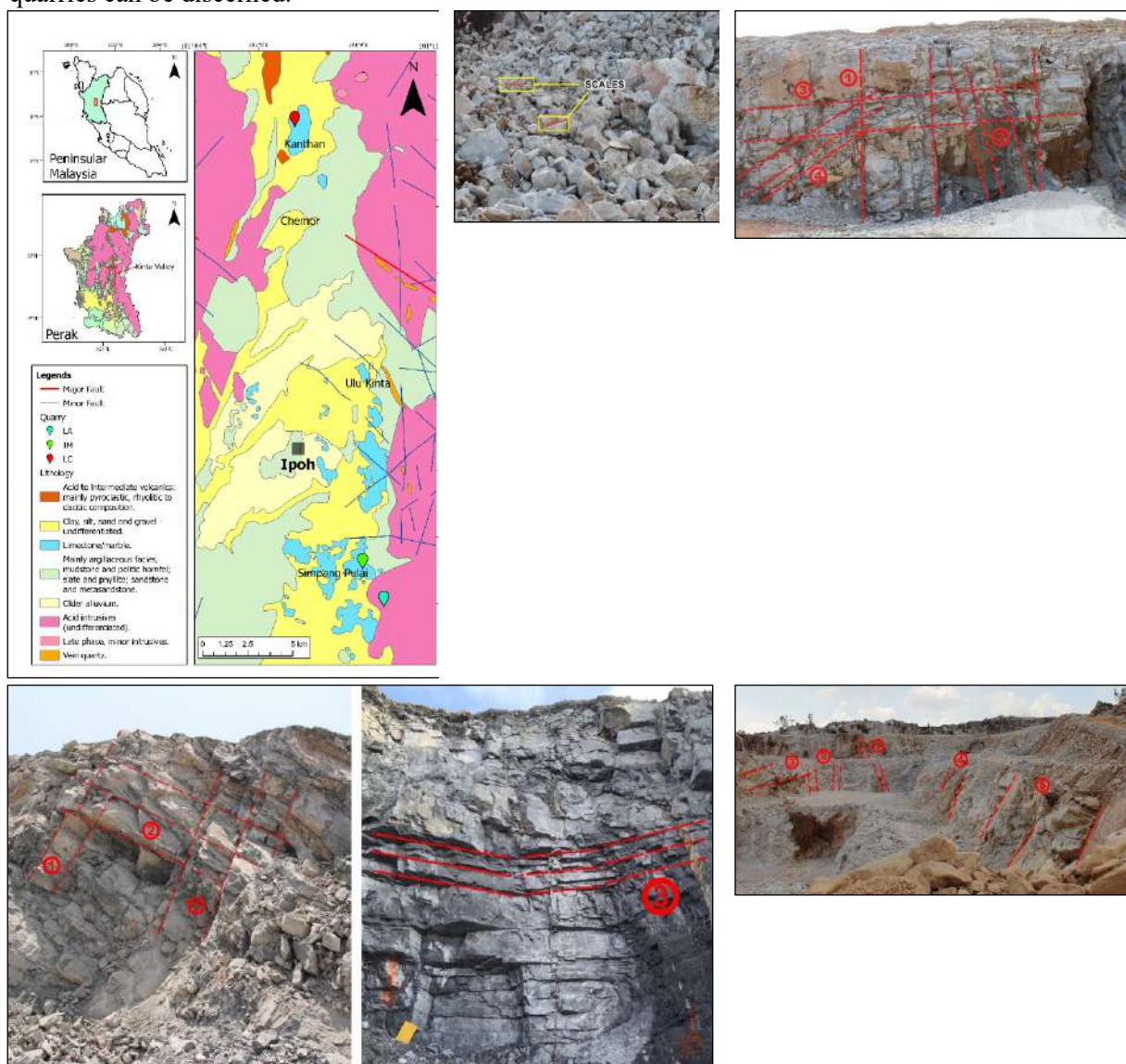


Figure 2. (a) Geological map of Kinta Valley and the location of the three quarries; (b) Scales used in muckpiles images; (c) Joints at LA7 blast site (location: chainage 15-40 m); (d) Bedding and joint in Quarry E hill and Quarry B; (e) Common joints in IM quarry

Similar as observed from the contour plot, Lafarge Cement has a lower size distribution compared to the other two. All LC's SP and PER levels belongs in the below 800 mm groups while LA's mean Xc exceed 1000 mm except for SP3 and PER3. Some of the SP produced mean Xc that is larger than their initial maximum size, this is because the calculated Xc mean was adjusted to other covariates: other geological conditions. This interaction with other conditions happened on site plus the intersection with other joints with different SP and PER in one blast site could results in Xc mean being bigger than the initial maximum size.

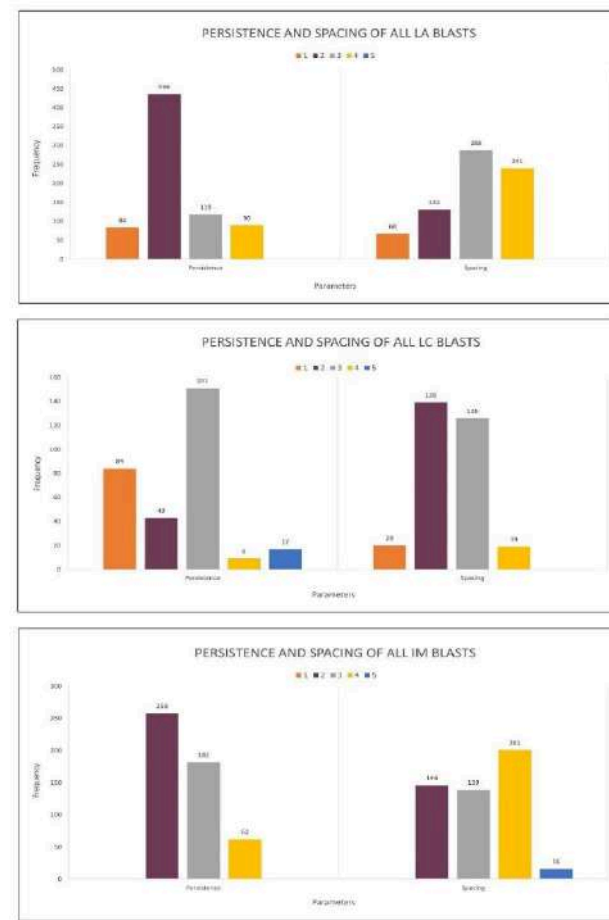


Figure 3. Persistence and spacing frequency for each quarry

Table 2. SP and PER ANCOVA figure for all quarries

Quarry	LA	LC	IM
SP/PER			
SP	[F(3,714)= 61,930, p<0.001]	[F(3,291)= 32,761, p<0.001]	[F(3,409)= 9,281, p<0.001]

PER	[F(3,714)= 18,932, p=<0,001]	[F(4,291)= 57,274, p=<0,001]	[F(2,409)= 4,973, p=0,007]

Table 3. Summation of Xc mean computed from ANCOVA analysis

Size Range (mm)	SP	PER
200-400		LC-PER5
	LC-SP1	LC-PER2
400-600	SP2	PER3
	SP3	PER4
600-800	LC-SP4	LC-PER1
	IM-SP2	
	LA-SP3	LA-PER3
800-1000	IM-SP3	IM-PER1
	SP4	PER2
	SP5	PER3
1000-1200	LA-SP2	LA-PER1
	SP4	PER2
		PER4
1200-1400	LA-SP1	

CONCLUSIONS

Based on the analysis that had been done, generally, the structural properties in each quarry were observed to be different. It varies across the three quarries; LA's and IM's main joints were vertical joints dipping $\pm 80^\circ$ with majority of the existing joints having PER2 and SP4 while LC's main was $\pm 30^\circ$ dipping beddings with majority of the discontinuities in the quarry having PER2 and SP2. Comparing blasts from these three quarries, it is apparent that LC is more efficient than the other two quarries given

that it produced the smallest Xc ranges. LA has the largest size ranges and LC has the smallest size ranges.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the personnel of the quarries for providing access to the quarry sites and assistance during the period of study. Not forgetting, laboratory technicians and research assistants involved in lab work for UCS and PLT tests. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or non-profit sectors.

REFERENCES

- Chakraborty, A. K., Jethwa, J. L., Gupta, P. K. (2004). Parametric study to develop guidelines for blast fragmentation improvement in jointed and massive formations. *Engineering Geology*, 73(1-2), 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.12.003>
- Cunningham, C. V. B. (2005). The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on. R. Holmberg & European Federation of Explosive Engineers (Ed.), *Third EFEE world conference on explosives and blasting*, p. 201–210.
- Hafsaoui, A., Talhi, K. (2009). Influence of Joint Direction and Position of Explosive Charge on Fragmentation. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(2A), 125–132.
- Hutchison, C. S., Tan, D. N. K. (2009). *Geology of Peninsular Malaysia*. The University of Malaya and The Geological Society of Malaysia.
- Hustrulid, W. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mining (Volume 1)*. Balkema.
- Ingham, F. T., Bradford, E. P. (1960). *Geology and Mineral Resources of the Kinta Valley, Perak. Federation*.
- Latham, J. P., Munjiza, A., Lu, P. (1999). Rock fragmentation by blasting-a literature study of research in the 1980's and 1990's. *FRAGBLAST- International Journal of Blasting and Fragmentation*, 3(3), 193–212.
- Meng, C. C. (2014). *Structural History of the Kinta Valley, Perak, Malaysia*. UNIVERSITI TEKNOLOGI PETRONAS.
- Meng, C. C., Chian, H. K., & Liew, Y. C. (2014). Geological Features of Kinta Valley. *PLATFORM-A Journal of Engineering, Science and Society*, 10(2), 2–14.
- Ouchterlony, F. (2003). Influence of blasting on the size distribution and properties of muckpile fragments, a state-of-the-art review. *MinFo proj.* P2000–10.
- Rajah, S. S. (1979). The Kinta Tin Field, Malaysia. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 11, 111–136.
- WipWare Technical Services. (2003). *Sampling and Analysis Guide*. (s.1–39).

MERMER YATAKLARININ UMREK KODU KAPSAMINDA EKONOMİK OLARAK DEĞERLENDİRİLEBİLİRLİĞİ

ECONOMIC EVALUATION OF MARBLE DEPOSITS WITHIN THE SCOPE OF UMREK CODE

A. Yıldız^{1,2*}, İ.C. Engin³, M. Bağcı^{1,2}

¹ *Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.*

² *Afyon Kocatepe Üniversitesi Jeotermal ve Maden Kaynakları Uyg. ve Araş. Merk. Müdürlüğü, Afyonkarahisar*

(*Sorumlu Yazar: ayildiz@aku.edu.tr)

³ *Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar*

ÖZ

Litolojik özelliklerdeki çeşitlilik, tektonizma ve rezerv gibi jeolojik özelliklerle kesme ve yüzey işleme performansı, fiyatlardaki dalgalanmalar, çevresel etki değerlendirmeleri, siyasi ve hukuksal durum vb. birçok faktör mermerlerin üretilebilirliğini, ekonomisini ve değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Madencilik tanımlamalarında bir standardizasyonun sağlanması ve maden yatağının detay arama ve fizibilite çalışmalarının yapılması ve raporlanması gerekliliği nedeniyle maden kaynak-rezerv sınıflaması ve rezerv hesaplanmasına yönelik dünyada tanımlama, prosedür ve raporlama standartları geliştirilmeye başlanmıştır. Bu doğrultuda Maden Rezervleri Uluslararası Raporlama Standartları Komitesinin kısa adı olan CRIRSCO tanımlamaları 1999 yılında uluslararası hüviyet kazanmıştır. Dünyadaki bu gelişmelerle ilişkili olarak Ülkemizde 7 Eylül 2016 tarihinde Ulusal Maden, Rezerv ve Kaynak Raporlama Komisyonu (UMREK) oluşturulmuş ve 4.12.2017 tarihinde de Yerbilimleri, Maden ve Metalürji Profesyonelleri Birliği (YERMAM) kurulmuştur. Mermer madenciliğinde mermer yatağının kaynak/rezerv miktarının hesaplanmasında veya diğer bir ifadeyle kestiriminde mermer yatağının karakteristik özellikleriyle ilişkili bazı hususlara dikkat etmek gerekmektedir. UMREK Kodu'nda Azaltma Faktörleri olarak tanımlanan bu hususlar mermer kaynak tahmininden görünür rezerve geçişte kritik öneme sahiptir. UMREK Koduna göre, bir kayacın ticari olarak doğaltaş (mermer) olabilme özelliği öncelikle blok üretimine uygun olması ve plaka halinde kesilebilir olmasına bağlıdır. Blok mermer üretimi konusunda öncelikle iki ana özelliğin ortaya konulması gerekmektedir. Bunlar; (1): Sahanın istenilen ölçülerde ticari boyutlarda blok verebilmesi ve (2): Ocaktan çıkartılan bloğun çeşitli şekillerde plaka halinde kesilebilme özelliğidir. Üretilebilir ticari blok hacmi (Vb) ve blok kazanım oranına bağlı olarak yüzdesel (%) oranı, mermer yatağının görünür rezervinin belirlenmesinde hayati öneme sahiptir. Raporlamada, belirlenecek olan kaynak miktarından yukarıda tanımlanan azaltma faktörleri de dikkate alınmak suretiyle rezerv miktarları belirlenmelidir.

Anahtar Kelimeler: Umrek kodu, mermer, ekonomik değerlendirme, hat etüdü, modelleme

ABSTRACT

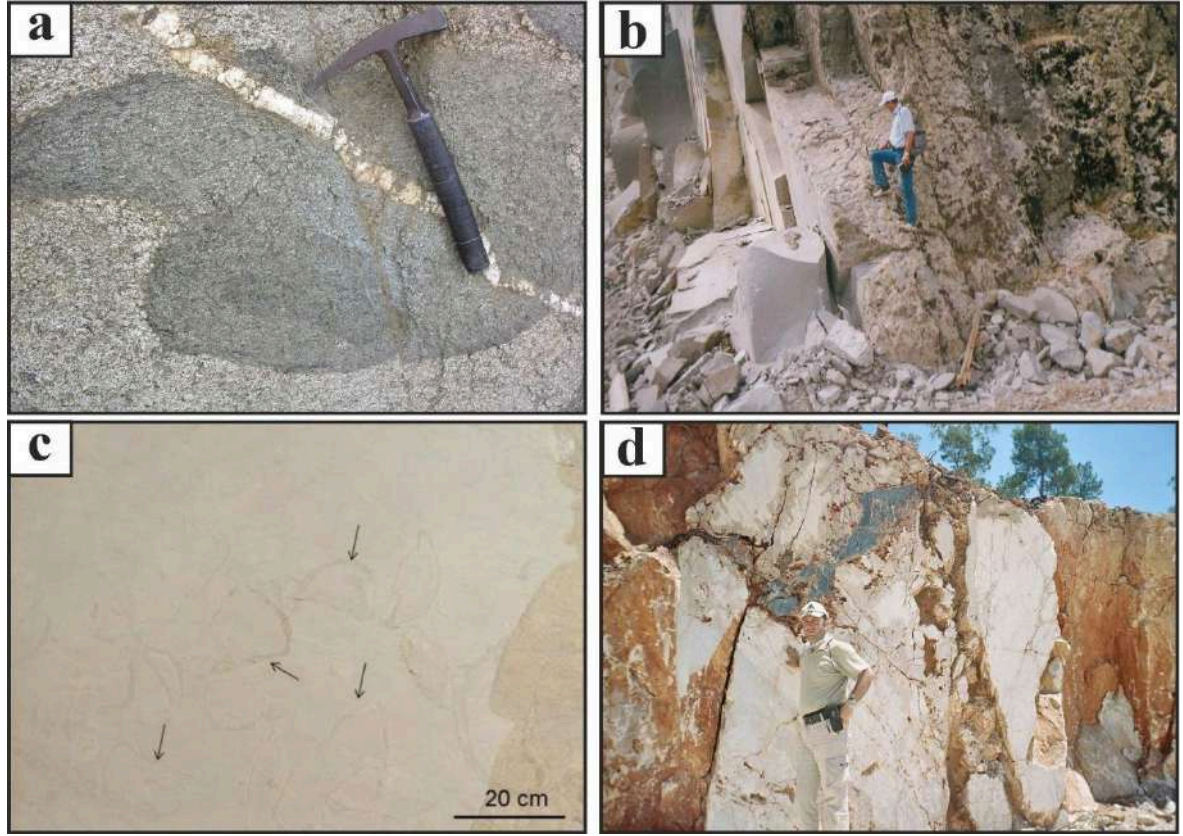
Many factors such as diversity in lithological features, geological features such as tectonism and reserves, cutting and surface processing performance, price fluctuations, environmental impact assessments, political and legal status, etc. make it difficult to produce, economically and value marbles. Definition, procedure and reporting standards for mineral resource-reserve classification and reserve calculation have begun to be developed worldwide due to the need for standardization in mining definitions and the need to conduct and report detailed exploration and feasibility studies of mineral deposits. In this context, the CRIRSCO definitions, which is the short name of the Committee on International Reporting Standards for Mineral Reserves, gained international identity in 1999. In relation to these developments in the world, the National Mining, Reserve and Resource Reporting Commission (UMREK) was established in our country on September 7, 2016 and the Association of Geosciences, Mining and Metallurgy Professionals (YERMAM) was established on December 4, 2017. In marble mining, it is necessary to pay attention to some issues related to the characteristic features of the marble deposit in the calculation or, in other words, estimation of the resource/reserve amount of the marble deposit. These issues, defined as Reduction Factors in the UMREK Code, are of critical importance in the transition from marble resource estimation to proven reserves. According to the UMREK Code, the ability of a rock to be commercially considered natural stone (marble) depends primarily on its suitability for block production and its ability to be cut into slabs. First of all, two main features need to be revealed regarding block marble production. These are; (1): The ability of the field to provide commercially sized blocks in the desired dimensions and (2): The ability of the block extracted from the quarry to be cut into slabs in various shapes. The producible commercial block volume (Vb) and the percentage (%) ratio depending on the block acquisition rate are of vital importance in determining the apparent reserve of the mineral deposit. In reporting, reserve amounts should be determined from the resource amount to be determined, taking into account the reduction factors defined above.

Keywords: Umrek code, marble, economic evaluation, line study, modeling

GİRİŞ

Günümüzde mermercilik sektöründe farklı jeolojik özelliklerde çok sayıda kayaç türü mermer ve doğaltaş olarak üretilerek, işlenmekte ve satışı yapılmaktadır. Mermer ve doğaltaşların jeolojik özelliklerindeki bu çeşitlilik farklı renk, görünüm, fiziksel ve mekanik özelliklerde değişik kayaç türlerinin sektörde üretilmesi ve işlenmesine olanak sağlarken, doğaltaşların üretimi sırasında bazı zorlukları beraberinde getirmekte ve mermer ve doğaltaşların ticari değerlerini olumsuz etkilemektedir.

Kırık, çatlak ve fay gibi tektonik unsurlar tüm mermer ve doğaltaş türlerinde gözlenen ve blok boyutunu etkileyen en önemli jeolojik yapılardır. Magmatik kökenli doğaltaşlarda anklav, dayk, damar ve soğuma çatlakları; sedimanter kökenli mermer ve doğaltaşlarda tabakalanma ve mega fosil oluşumları; metamorfik mermerlerde ise sistozite ve foliasyon yapıları bunların kalitesini etkileyen jeolojik yapılar olarak ön plana çıkmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Değişik mermer ve doğaltaş türlerinde gözlenen süreksizlik türleri; (a): Granitlerde anklav ve pegmatit daykı, (b): Andezitlerde soğuma çatlakları, (c): Kireçtaşlarında megalodon fosilleri ve (d): Mermerlerde kırık ve çatlaklar

Doğaltaşların jeolojik geçmişine bağlı olarak değişim sunan renk/desen homojenitesi, kırık, çatlak, fay ve tabakalanma gibi süreksizliklerin sahadaki dağılımlarının detaylı jeolojik araştırmalar, jeofizik incelemeler ve sondaj/yarma çalışmalarıyla ortaya konması ve bu sayede kırıklı-çatlaklı alanlarla, masif kütlelerden oluşan bölgelerin tespiti blok verimliliği ve ocak üretim planlarının yapılması açısından oldukça önem taşımaktadır. Ayrıca söz konusu süreksizlikler mermer yatağının kaynak/rezerv miktarının hesaplanmasında göz önünde bulundurulacak jeolojik yapılardır. Kayaçların mermer ve doğaltaş olabilme özelliğini etkileyen bu yapılar UMREK Kodu'nda Azaltma Faktörleri olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmada kayaçların mermer ve doğaltaş özelliklerini etkileyen jeolojik yapıların ortaya konması için uygulanan yöntemler anlatılmış, elde edilen verilerin UMREK raporlama formatına uygun olarak değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur.

2. OCAK VERİMLİLİĞİNİN BELİRLENMESİ VE MERMER YATAKLARININ EKONOMİK DEĞERLENDİRİLEBİLİRLİĞİ

Ocak verimliliğini kontrol eden temel parametreler mermerin blok verimliliği ve ocak içindeki renk doku vb. kalite özelliklerinin değişimidir. Bu amaçla üretim öncesinde mermer ocak üretimi yapılacak sahada yapılan jeolojik ve jeofizik çalışmalarla üç boyutlu olarak üretilebilecek blok boyutları ve bunların dağılımları belirlenebilmektedir. Bunun yanında, karot verileri kullanılarak mermer yatağı modellenmekte ve seleksiyonda belirlenecek farklı zonlar blok model haline getirilerek, her bir seleksiyonun ocaktaki dağılımıyla birlikte ayrı ayrı rezervleri hesaplanmaktadır. Bu bölümde ocak verimliliğinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler detaylı olarak verilmiştir.

2.1. Karot Verileri Kullanılarak 3 Boyutlu (3B) Modelleme

Renk, doku ve diğer fiziksel özelliklere bağlı olarak ocak sahasında değişik özellikler sunan mermerlerin ayırtlanması (seleksiyonlar) gerekmektedir. Bu aşamadaki çalışmalarda öncelikle jeolojik araştırmalarla değişik mermer türlerinin mostradaki dağılımı haritalanarak raporlanmaktadır. Jeolojik çalışmalar sonucunda belirlenen noktalarda karot sondajları yapılmaktadır. Karotların üzerinde yapılan litolojik ve yapısal incelemeler sonucunda elde edilen veriler bilgisayar programında sayısallaştırılarak mermer ocağının 3 boyutlu modeli oluşturulmuş olur. Karot verileriyle 3 boyutlu modelleme çalışmalarında işlem adımları şu şekildedir:

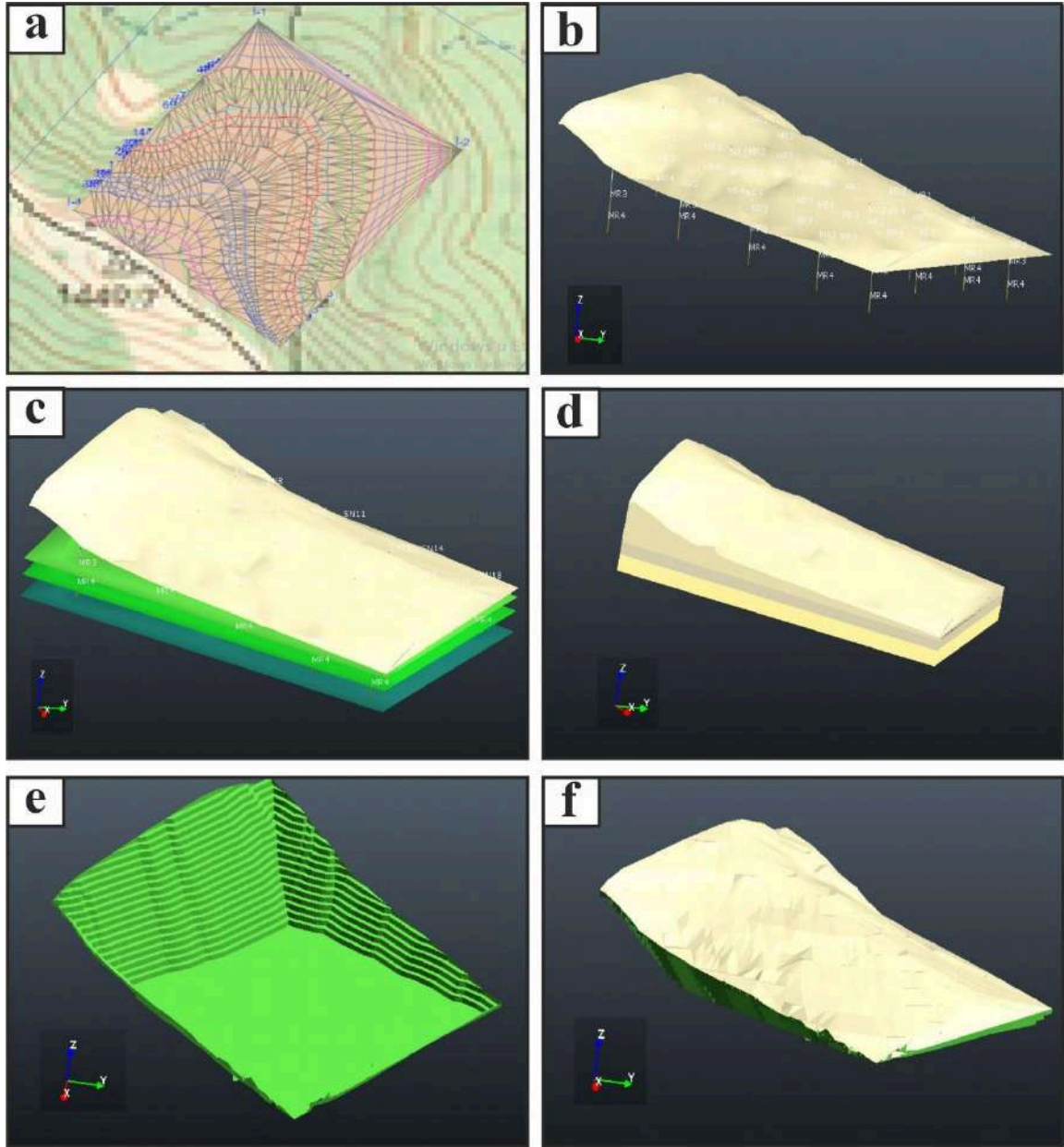
- 1.Ocak yüzeyinin topoğrafik harita yardımıyla sayısallaştırılması (Şekil 2a),
- 2.Sondaj koordinatları, derinlik bilgileri, seleksiyon derinlikleri vb. bilgilerin bilgisayar programına girilmesi (Şekil 2b),
- 3.Sondaj karotlarının incelenmesiyle kaç tip seleksiyon bulunduğunun tespit edilmesi (Şekil 2c),
- 4.Her seleksiyonun başlangıç ve bitiş derinliklerinin karotlar için kaydedilmesi,
- 5.Katı model oluşturma (Şekil 2d),
- 6.Rezerv ve seleksiyon oranlarının hesaplanması,

2.2. Konumsal Ölçümlerle 3 Boyutlu Modelleme

Ocak blok verimliliği iki süreç sonunda ortaya çıkar. Bunlardan ilki mermerin bünyesinde bulunan çatlak yüzeylerinin kesimi ile oluşan polihedral kütlelerdir. İkincisi ise üretim amacıyla belli hacimlerde ocakta yapılan dağ kesimi olarak adlandırılan kesim yüzeyleri ile bu kütlelerin ayrılması ve son olarak sayalama işlemiyle fabrikada işlemeye uygun düzgün prizmatik bloklar elde edilmesidir. Dolayısıyla, blok verimliliğinin temel belirleyicisi süreksizlik (çatlak) yüzeyleriyle sınırlanan blokların büyüklüğü olmakla birlikte dağ kesimi ve sayalama işlemi de verimliliği etkileyen diğer bir süreci teşkil etmektedir.

Süreksizlik yüzeylerinin ruhsat alanındaki mermerlerin yayılımını belirlemenin en verimli yöntemi sahada mermer yüzeylerinde hat ölçümü yapmaktır. Hat ölçümü ile yüzlek veren süreksizliklerin yönelimleri (doğrultu ve eğimleri) jeolog pusulası ile belirlenmektedir. Mermerlerin blok verimliliği aşağıdaki işlemlere göre hesaplanmaktadır.

Daha önceki işlemlerle belirlenen rezerv değerleri yerinde mermer rezervidir. Bu rezervin tamamının üretilmesi açık işletme koşullarında mümkün değildir. Belirli bir şev açısında çalışma zorunluğu vardır. UMREK tanımlamalarında da yer aldığı gibi ruhsat alanı içerisinde madencilik çalışmaları sonucunda üretilebilecek mermer miktarı görünür rezerv olarak ifade edilmektedir. Görünür rezervin hesaplanabilmesi için mermer ocak üretim planının oluşturulması ve açık ocak nihai taban kotuna gelindiğinde ne kadar mermer üretilbileceğinin hesaplanması gerekmektedir (Şekil 2e; f).

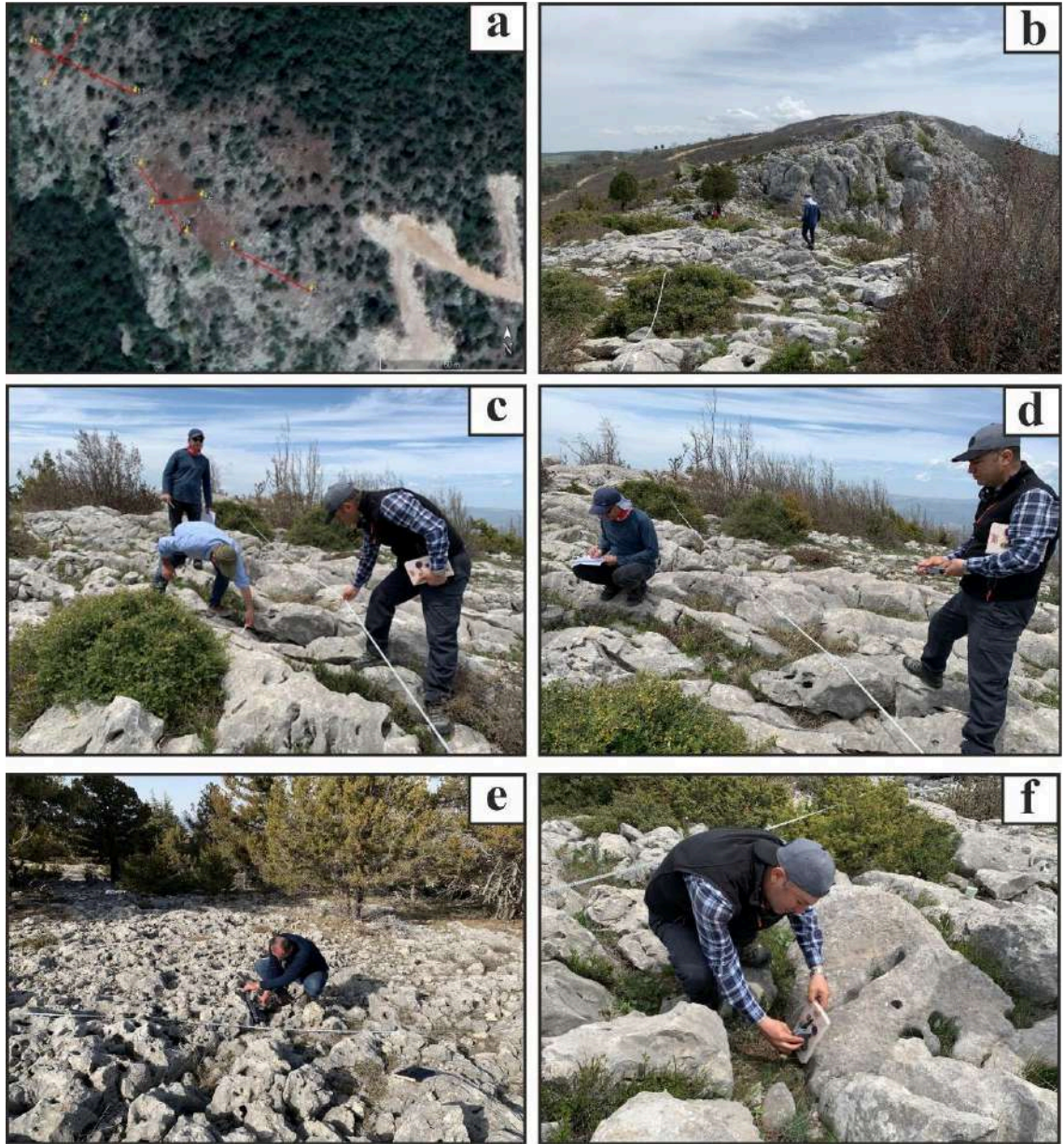


Şekil 2. Karot verileriyle 3 boyutlu modelleme çalışmalarında işlem adımları

a) Sahadan Süreksizlik Verilerinin Alınması: Mermerlerin blok verimliliğini etkileyen tabaka ve eklem gibi süreksizliklerin konumsal özellikleriyle (doğrultu, eğim yönü ve eğim miktarı) süreksizliklerin devamlılık, aralık açıklık gibi yapısal özellikleri ölçülerek, süreksizliklerin dağılımları belirlenmektedir. Bunun için genellikle hat etüdü olarak bilinen yöntem kullanılmaktadır. Hat etüdü çalışmaları jeolojik haritalama çalışmaları sonucunda üretim açısından uygun görülen bölgelerde gerçekleştirilmektedir (Şekil 3).

b) Süreksizlik Verilerinin Bilgisayarda Modellenmesi: Bu aşamadaki çalışmalarda kullanılan stereografik izdüşüm tekniği, süreksizlik düzlemlerinin bir küre içine yerleştirilmiş gibi varsayıp bunun çeşitli kabuller ışığında bir daire üzerine izdüşümünün alınması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemin avantajlı yönü süreksizliklerin sadece istatistiksel raporlanmasının ötesinde üretim yapılan ocaklarda şev aynalarının konumlarıyla ilişkilerinin irdelenmesini içeren kinematik analize imkân

vermesidir. Çok sayıda süreksizlik ölçümü alınması durumunda bunların büyük dairelerinin ve gül diyagramlarının hazırlanması sonucunda bölgedeki hakim kırık çatlak hatları belirlenmiş olur (Şekil 4).

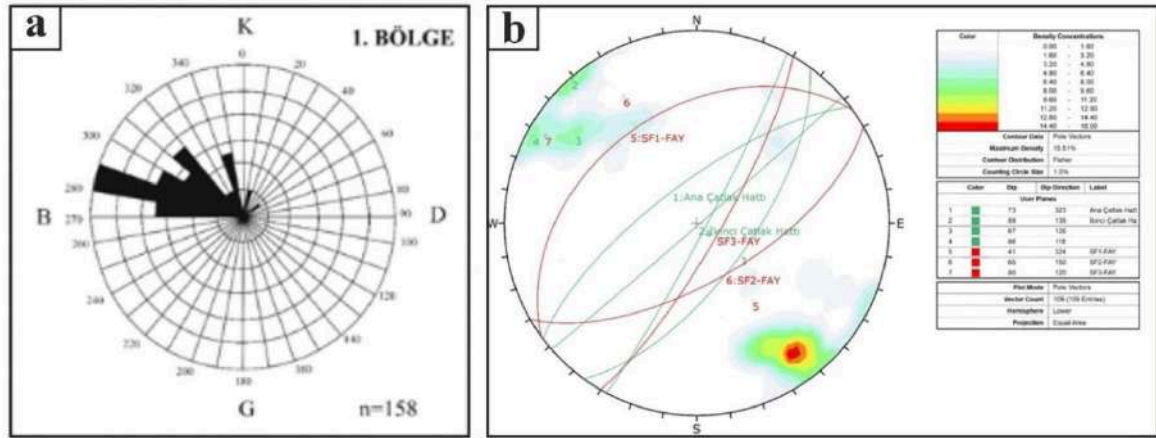


Şekil 3. Sahadan süreksizlik verilerinin alınması; (a; b): Hatların belirlenmesi, (c): Süreksizlik aralıklarının ölçümü, (d): Doğrultu ölçümü, (e): Eğim yönü ölçümü ve (f): Eğim miktarı ölçümü

c) Süreksizliklerle Ayrılan Blokların Yerinde (İn-Situ) Boyut Dağılımının Belirlenmesi: Kırık, çatlak, fay vb. süreksizlikler bilgisayar ortamında yönelimleri dikkate alınarak gerçek ölçüleriyle modellenir (Şekil 5a).

d) Maden İşletme Parametrelerinin Süreksizlik Modeline Eklenmesi: Mermer ocaklarında blok boyutları ocaktaki kırık çatlakların yanı sıra elmas tel kesme işlemiyle de sınırlanmaktadır. Dolayısıyla dağ kesimi adı verilen bu işlem sonrası blok boyutlarının belirlenebilmesi amacıyla kesme işlemi de

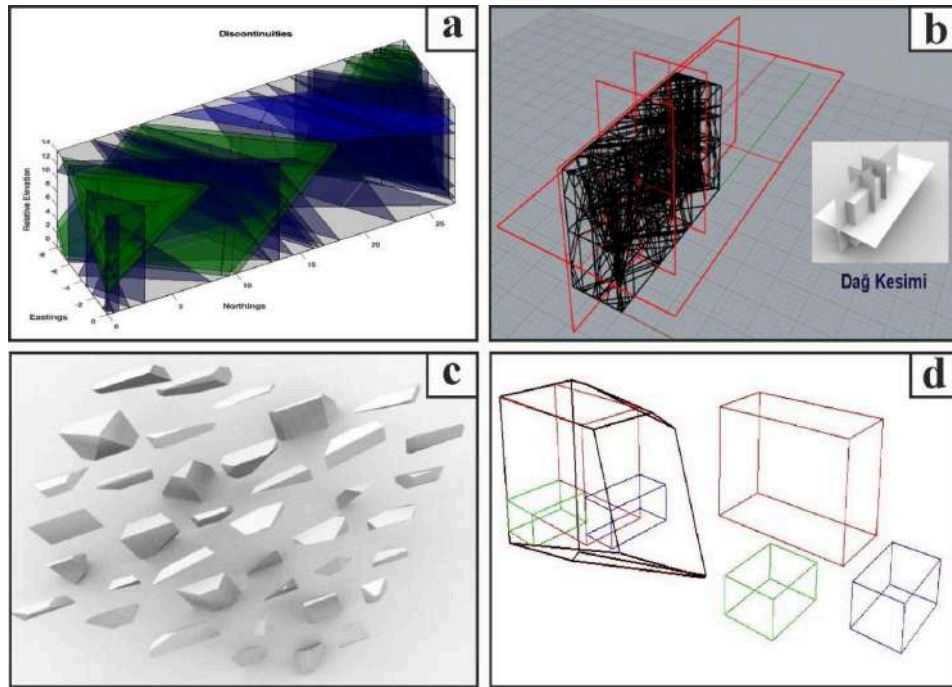
bilgisayar ortamında modellenir. Burada kademe yükseklikleri ve tahmini kesim ölçüleri dikkate alınır (Şekil 5b).



Şekil 4. Kırık ve çatlak verilerinin diyagramlarda gösterimi; (a): Gül diyagramları ve (b): Kontur diyagramları

e) Dağ Kesimi Sonucu Elde Edilecek Mermer Blok Boyut Dağılımının Belirlenmesi: Bu işlemlerin sonucunda mermer ocağında süreksizlikler ve tel kesme yüzeyleri arasında kalan blokların boyut dağılımları belirlenmiş olur (Şekil 5c).

f) Sayalama İşleminin Hesaplamalara Dâhil Edilmesi: Dağ kesimi sonucu oluşan bloklar doğrudan fabrikada işlenebilir düzgün şekillere sahip olmadığından sayalama işlemi yapılmalıdır. Bu aşamada, her blokta sayalama işlemi yine bilgisayar ortamında yapılarak istenilen blok boyutları aralıklarında kaç ton mermer üretileceği ve ocağın blok verimliliği % olarak tespit edilmiş olur (Şekil 5d).



Şekil 5. Mermerlerde blok verimliliğinin belirlenmesi işlemleri; (a): Blokların yerinde (in-situ) boyut dağılımının belirlenmesi, (b): Maden işletme parametrelerinin süreksizlik modeline

eklenmesi, (c): Dağ kesimi sonucu elde edilecek mermer blok boyut dağılımının belirlenmesi ve (d): Sayalama işleminin hesaplamalara dâhil edilmesi

3. MERMER VE DOĞALTAŞ SAHALARININ UMREK KODUNA GÖRE RAPORLANMASI

3.1. Tanım

Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama (UMREK) Kodu yatırımcıların ve hissedarların yeterli derecede bilgilendirilmesi amacıyla Türkiye Cumhuriyeti'ndeki Maden Arama Sonuçlarının, Maden Kaynaklarının ve Maden Rezervlerinin açık, güvenilir ve şeffaf bir şekilde raporlanması için asgari standartları, önerileri, yasal gereklilikleri ve uygulama esaslarını belirler.

UMREK Kodu, CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards) şablonuna uygun olduğu CRIRSCO tarafından onaylanmıştır. Ayrıca bu Kod, ülkemizin finans ve madencilik sektörüne hizmet edebilmesi amacıyla SPK (Sermaye Piyasası Kurulu), Bankacılık Düzenleme ve Denetleme Kurumu (BDDK), Türkiye Bankalar Birliği (TBB), Borsa İstanbul (BIST) ve Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) gibi kurumlarca da kabul görmektedir.

3.2. UMREK Koduna Neden İhtiyacımız Var?

Maden aramacılığı ve işletmeciliği yatırım riskinin en yüksek olduğu alanlardan biridir. Arama ve geliştirme faaliyetlerinin bir disiplin içinde açık, güvenilir ve şeffaf bir şekilde yapılmasıyla bu riskin olabildiğince azaltılması hedeflenir.

3.3. Mermer Ve Doğaltaş Sahalarının Raporlanması

UMREK Kodu; Mermer, Traverten, Granit, Andezit, Bazalt gibi blok olarak üretilen doğal (boyutlandırılabilir) taşlar ile dekoratif amaçla kullanılan doğaltaşları ele almaktadır. Raporda UMREK Kodunun temel ilkeleri ve amacı geçerlidir. Bazı doğaltaşlar kalite ve özelliklerine göre gruplandırılmalı, bu grupların mermer ve doğaltaş sahasındaki hacminin bir yüzdesi olarak belirtmelidir.

Kayaç tipi esas alınarak raporlama yapılmalıdır. Kayacın cinsi için petrografik analiz yapılır. Bu analiz sonuçları ile kayacın ne olduğu ve içindeki yabancı maddelerin varlığı öğrenilir. Kayaç içindeki yabancı maddeler veya mineral oksitleri gözle görülebilecek boyutta ise, bunların % cinsinden öğrenilmesi için kimyasal analizler de yapılmalıdır.

Blok mermer üretimi için gerekli olan (1): Sahanın istenilen ölçülerde ticari boyutlarda blok verebilmesi ve (2): Bu bloğun çeşitli şekillerde plaka halinde kesilebilme özelliği belirlenmelidir. Ancak az bulunan ve ticari değeri olan bazı doğaltaşlar (oniks vb.) el sanatları ve süs eşyalarında kullanıldığından kilo ile değerlendirilmektedir.

Doğaltaş ürünlerde renk ve desen homojenitesi büyük önem taşımaktadır. Renk, desen ve kalite değişimine neden olan yapısal ve dokusal faktörler belirlenmeli ve raporlanmalıdır. Ayrıca kalite değişimini gösteren iki-ve/veya üç-boyutlu jeoloji harita ve kesitler rapora eklenmelidir.

Belirlenmiş Doğaltaş (Mermer) Kaynağı, Ölçülmüş Doğaltaş (Mermer) Kaynağına uygulananndan daha düşük bir güven seviyesine sahiptir ve yalnızca Muhtemel Doğaltaş Rezervine dönüştürülebilir.

Ölçülmüş Doğaltaş (mermer) Kaynağı, maden planlamasının ve maden yatağının ekonomik ömrünün değerlendirilmesini sağlayacak şekilde Azaltma Faktörlerinin uygulanmasına izin verecek ölçüde, yüksek derece güvenilirlikle tahmin edilen miktar, satılabilir ticari blok ürün özellikleri

(Ortalama blok boyutu, yoğunluk, şekil ve fiziksel ve tekno-mekaniksel özellikler) Doğaltaş (mermer) Kaynağının bir parçasıdır.

Jeolojik kanıt, yeterince ayrıntılı ve güvenilir saha araştırmaları, örnekleme ve testler üzerinden türetilmektedir ve bu kanıt, incelenen sahadaki jeolojik sürekliliği ve devamlılığı doğrulamak için yeterlidir. Ölçülmüş Doğaltaş (mermer) Kaynağı, Belirlenmiş Doğaltaş (mermer) Kaynağına veya Potansiyel Doğaltaş (mermer) Kaynağına uygulanandan daha yüksek bir güven seviyesine sahiptir. Ölçülmüş Doğaltaş (mermer) Kaynağı, Görünür Doğaltaş (mermer) Rezervine ve bazı koşullar altında Muhtemel Doğaltaş (mermer) Rezervine dönüştürülebilir.

Raporlama kapsamında doğaltaş aramalarında karotlu sondaj çalışmalarından (düşey ve/veya eğimli) ve jeofiziksel yöntemlerden (Yer Radarı (GPR), çok düşük frekanslı elektromanyetik/radyo frekanslı elektromanyetik (VLF-EM/RF-EM)), elektriksel öz direnç vb.) yararlanılması mümkündür.

Kaynak ve Rezerv raporlamasında sahada belirlenen tüm Maden Kaynaklarının belirlenmesi (pazar olasılıkları dikkate alınarak jeo-stratigrafik analizler ve üretimi amaçlanan jeolojik birimin tariflenmesi), ölçülmüş kaynak tahmininin (Jeolojik prospeksiyon ile sondaj ve/veya jeofizik, mostradan numune alımı, kesit çalışmalarından elde edilen verileri içeren), görünür rezerv belirlenmesinde aşağıdaki Altı Azaltma Faktörü'nün tanımlanması ve rapor kapsamında belirtilmiş olması gerekmektedir.

SAF: Süreksizlik Açıklığı Faktörü
KF: Karstlaşma faktörü
ME: Mineral Etki Faktörü
AF: Ayrışma Faktörü

MF: Madencilik Faktörü
KAF: Kalite Faktörü
EF: Eklem Faktörü

Raporlamada belirlenecek olan kaynak miktarından yukarıda tanımlanan azaltma faktörleri de dikkate alınmak suretiyle rezerv miktarları belirlenmelidir (Anonim, 2023).

4. SONUÇLAR

Mermer ve doğaltaşlar jeolojik materyallerdir. Dolayısıyla oluşumunda çeşitli jeolojik olayların etkisi vardır. Ocak üretimi öncesi ruhsat sahası ve yakın civarının üretim verimliliğini etkileyen jeolojik parametreler jeolojik ve jeofizik (Yer radarı, çok düşük frekanslı elektromanyetik/radyo frekanslı elektromanyetik, elektriksel öz direnç vb.) yöntemlerle belirlenmelidir.

Elde edilen jeolojik parametreler yardımıyla bilimsel tabanı olan, mühendislik kurallarının göz önünde bulundurulduğu, UMREK kodlama sistemine uygun rezerv tanımlaması ve üretim planlamasının yapılması gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

Anonim, (2023). Ulusal maden kaynak ve maden rezerv raporlama kodu. Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu (UMREK), 104s, Ankara.

AN INVESTIGATION ON RADIOMETRIC CHARACTERISTICS OF MARBLE AND GRANITES IN TÜRKİYE BAZAAR

B. Camgöz^{1*}, Y. Işık Camgöz¹, G. Yaprak¹

¹Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

*Sorumlu yazar: berkay.camgoz@ege.edu.tr

ABSTRACT

Buildings, where people spend 80% of their time, reduce the dose exposed to the indoor environment by shielding against cosmic rays and terrestrial gamma radiation, namely the armor effect. To date, studies conducted with natural commercial stones such as granite, marble, travertine, etc. used in buildings have been conducted on the ²²²Rn, ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K radionuclide contents. Radioactive Potassium (K-40), Uranium (U-238) and Thorium (Th-232) are expected to be found in the mineralogy of marble and granites. Academic studies conducted worldwide have confirmed this. On the other hand, marble and granites, as a geological material, should have armouring characteristics against ionized electromagnetic radiation. In this study, the radioactivity content and radiation shielding characteristics of marbles and granites available in the Turkish market are presented. In this context, the gamma absorption coefficients of commercial natural stones were determined experimentally for gamma energy and 661,66 keV (Cs-137) using narrow beam photon geometry and compared with the XCOM theoretical values calculated using mineralogical variables for selected materials.

Keywords: Marble, Granite, Radiation shielding, Natural radiation

INTRODUCTION

Ionizing radiation plays a crucial role in human life due to its expanding use in industry, medicine, scientific research, and treatments. Given its biological effects, effective protective measures and advanced technologies are essential to safeguard human health. Among various radiation protection methods, shielding is the most efficient technique (Martin, 2000). A material's ability to shield radiation depends on both its composition and the characteristics of the radiation it encounters. While officially regulated procedures exist for industrial and medical radioprotection, natural radiation remains a concern due to stochastic effects and the lack of well-defined standards. Throughout their lives, humans are continuously exposed to background radiation from both cosmic and terrestrial origins. On average, individuals receive an annual radiation dose of approximately 2,4 mSv (UNSCEAR, 2000). Exposure within this range typically leads to stochastic effects, including somatic and genetic disorders, with potential additional contributions from varying radiation doses.

Shielding serves as a distinctive protective measure against radiation from natural sources. However, the 'as low as reasonably achievable' (ALARA) principle outlines three key radioprotection strategies: minimizing exposure time, increasing distance, and using shielding. Despite this, conventional radiation protection materials and methods are not practical for public use. Therefore, research should prioritize widely available and commonly used materials. Since building materials are essential in all aspects of daily life, they should be examined from both industrial and scientific perspectives for their potential to shield against natural and artificial radiation. Typically, materials such as marble, granite, and various natural stones are used in residential, commercial, and medical construction. It is well established that radiation levels are generally higher in acidic igneous rocks like granite, whereas they tend to be lower in sedimentary rocks (Canbaz et al., 2010). Regarding natural radioactivity, granites contain higher concentrations of uranium (U), thorium (Th), and their decay

products compared to metamorphic and sedimentary rocks. In contrast, limestone and its metamorphic counterpart, marble, contain lower levels of U, Ra, and Th (Yaprak and Yaşar, 2009).

Numerous studies have examined the radiological characteristics of natural stones, including their radionuclide content, radon permeability, and radiological indices (Albering H.J. et al., 1996; Bruzzi et al., 1992; De Vecchi et al., 2000; Iqbal et al., 2000; Malanca et al., 1995). This study aims to analyze the gamma shielding capabilities of commercially available natural stones using a broad and diverse sample set. While previous research exists on this topic, the variety and quantity of samples examined remain limited. Additionally, validation studies for attenuation measurements are lacking (Yaprak and Yaşar, 2009).

Moreover, aside from their use in construction, the radiation shielding properties of the mentioned materials have been neither fully conceptualized nor standardized. Additionally, natural stone allows for greater flexibility in geometric design compared to rigid concrete structures. To protect human health, exposure to ionizing radiation in everyday environments should be reduced to lower the risk of stochastic effects. Selecting suitable building materials can contribute to this objective. For effective shielding, it is crucial to determine the radiation attenuation characteristics of the materials under consideration (Ozyurt et al., 2018). This concept focuses on assessing the radioprotective efficiency of dense and homogeneous rocks, which can serve as effective shielding materials in construction (Akkurt et al., 2004).

Unlike synthetic materials, natural construction stones have a complex composition and formation process. Even within a small set of samples, these complexities create variations in stone properties. Additionally, each stone reservoir has a unique chemical composition and distribution. As a result, naturally derived stones are expected to exhibit distinct gamma attenuation characteristics within a certain data range. However, performing gamma attenuation measurements for every stone sample is neither practical nor cost-effective. Therefore, establishing an average gamma attenuation value or a shielding characterization for natural building materials is necessary. Studies conducted on a small number of heterogeneous samples have shown considerable uncertainties. To address this, expanding the experimental dataset with a larger sample size is crucial, and the experimental findings should be reinforced with generalized analytical data. Actual attenuation data for different chemical compositions and mixtures have been documented (Akbal et al., 2002; Stankovic et al., 2010; Singh and Badiger, 2013). Additionally, many of these datasets have been supported using various analytical methods and the Monte Carlo approach (Berger, 2010). While absorption experiments and attenuation theories are easily applicable to simple materials, accurately collecting data remains a challenge due to the intricate and unpredictable nature of radiation–mass interactions. Therefore, fine-tuning experimental parameters and instrumentation is necessary. Reliable measurements also require selecting the appropriate detectors, optimizing spectroscopic analysis, ensuring robust background shielding, and performing thorough validation.

In this study, multiple samples were analyzed using a carefully designed experimental setup to evaluate the gamma attenuation properties of natural building stones available in Turkish markets. And activity concentrations of natural radioactive element ingredients were measured-calculated. With an estimated $5.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ of marble reserves—about 33% (~40% according to some sources) of the world's total—Turkey is home to the richest marble deposits (Çetin, 2011). According to a 2018 report, Turkey's active reserves include $4 \times 10^9 \text{ m}^3$ of marble, $2,8 \times 10^9 \text{ m}^3$ of travertine, and $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ of granite (Karahan, 2018). As a leading global exporter, Turkey's market includes both local and international stone products, making the scope of this study broader than just a national level.

The primary goal of this study is to examine the gamma shielding characteristics of natural stones using an extensive sample pool. Previous studies have largely relied on an insufficient number of

samples, and this research aims to provide a comprehensive and widely referenced database for the field. Furthermore, earlier studies have not extended validation experiments to XCOM or analytical data comparisons. A recognized gamma attenuation standard has been established (Edera and Schlattl, 2018) in accordance with the International Electrotechnical Commission (IEC). However, unlike this study, prior research has not taken this standard into account (Ayman et al. 2022; Ozyurt et al. 2018). While numerous gamma attenuation studies exist, they primarily focus on natural stone composites, industrial materials, earth-derived ceramics, alloys, and various composite materials (Singla and Dhingra, 2023; Abualroos et al., 2023; Alzahrani et al., 2024; Hannachi et al., 2023). Notably, direct research on raw stone materials remains limited.

For both natural stones and commercial rocks, neither the Turkish Standards Institute nor the American Society for Testing and Materials has established radiometric or radioactive standards. This study highlights the necessity of developing consistent radiometric standards.

MATERIAL AND METHOD

Terrestrial Radionuclide Activity Concentration Studies: The gamma spectrometer system used to determine the contents of ^{226}Ra (^{214}Bi ; 1764 keV), ^{232}Th (^{208}Tl ; 2614 keV.) and ^{40}K (1461 keV) in the studied samples was composed of a 184 cc HPGe coaxial detector (detector efficiency: 25%, FWHM: 1.83 keV and peak/compton ratio: 57:1 for 1.33 MeV gamma energy of ^{60}Co), Ortec Model-671 spectroscopy amplifier and Canberra PC based MCA (8 K) Wilkinson ADC and was shielded with 100 mm lead. In low activity measurements, determining the detection and detection limit of the technique used is of great importance (Yaprak, 1999). The minimum observable activity in a gamma spectrum is the formation of a peak that can be distinguished from background counts (Yaprak, 1999). The lowest activities that the gamma spectrometer system used in the study can measure were calculated based on CURRIE criteria.

Gamma Attenuation Studies: For this study, three categories of natural stones—marble, granite, and sedimentary rocks—were collected and organized. Gamma attenuation experiments were performed using gamma spectroscopy. Since semiconductor detectors provide the highest accuracy, HPGe detectors (Canberra system) were utilized. When the collimated gamma source and detectors are positioned at an optimal distance, the initial gamma intensity, denoted as I_0 , is recorded by measuring the gamma count without any sample present (Camgoz et al. 2024). The intensity measurement was then taken with the sample placed between the source and the detector. The experiment followed the narrow beam geometry outlined in the IEC 61331-1:2015 Standard (TSchöpf and Pichler, 2016). Prior to measuring the attenuation rates of the samples, the experimental setup was validated using materials with well-documented attenuation properties—namely, lead, copper, and aluminum. The validation data is presented in study by Camgoz et al. (2024). The experimental geometry dimensions (Figure 1) were adjusted based on the attenuation characteristics of these reference materials. Additionally, the entire setup was enclosed within a cylindrical lead shield to minimize background radiation interference. A review of the literature indicates that this specific shielding method has not been employed in previous studies.

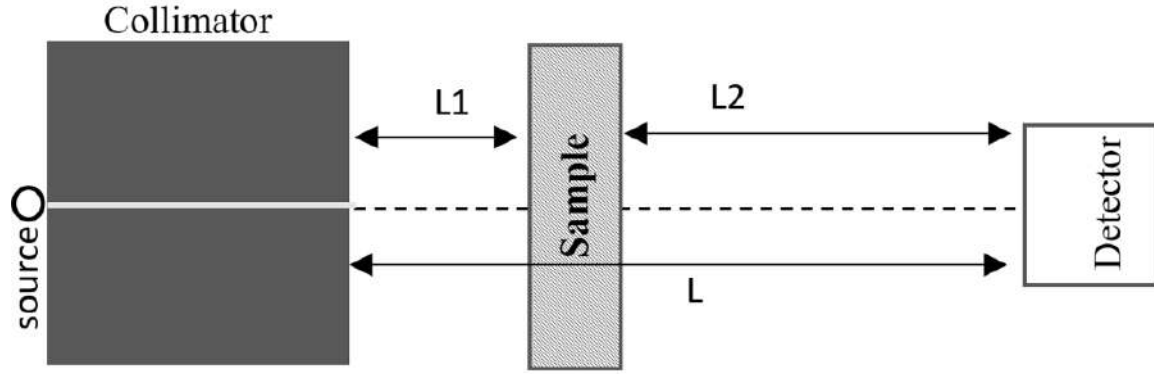


Figure 1. Attenuation experiment design

Geometry Definition: A Cs-137 gamma source was placed at the hole of the collimator to obtain a uniform line beam. L is the total distance between the collimator hole end and the detector surface. L_1 is the distance between the sample and the collimator hole out, and L_2 is the distance between the sample and the detector surface. (Distance ratios were adopted as $L_1 = L/3$ and $L_2 = 2L/3$ under validation conditions). Design was developed to be suitable for 61331-1 (2015) Standard–narrow beam geometry.

Source Definition: Cs-137 source (Amersham, ISO Class: C.34343) with a 1 mm diameter was utilized, emitting high-intensity photons with a gamma-ray energy of 661,9 keV. Cs-137, a single-energy radioactive isotope, has a half-life of 30,08 years. Its actual activity is measured at 137,94 kBq, with an uncertainty of 4%, as stated in the manufacturer's (AMERSHAM) certificate.

Sample Characterization: Natural rocks and stones form through various complex geological processes, resulting in an unpredictable and heterogeneous distribution of chemical and mineralogical compositions. Consequently, their visual properties can differ significantly. However, specific subtypes of these stones contain distinct compositions that define their respective rock categories. In this study, samples were collected from natural building stones classified into three main groups: sedimentary rocks, marbles, and granites. A total of 54 stone samples were analyzed. While additional varieties with different origins were available in the market, this study focused only on the most essential and representative types.

Calculation method: The attenuation (absorption) coefficient μ $\{\mu \rightarrow \mu(E, x)\}$ is a function of the initial gamma energy (E) and sample thickness (x). The attenuation equation is expressed in equation 1.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

Where I is transferred intensity, I_0 is Initial intensity (of source) and x is thickness of material.

Equation 1 does not explicitly indicate how attenuation depends on energy. However, both I and μ are directly affected by the initial gamma energy. The spectra of I_0 and I were obtained through gamma spectroscopy using HPGe detectors. The validation process (Camgoz et al., 2024) confirmed that Compton correction was not required, as the semiconductor detector used for photopeak analysis has limited efficiency due to the presence of the Compton edge. The mass attenuation coefficients were determined using the following equation:

$$\mu\rho = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

where μ_p is mass attenuation coefficient and ρ is density of absorber material.

Table 1. XCOM (National Institute of Standards and Technology) mass attenuation coefficients (μ/ρ) of Pb, Cu and Al for various energies. Experimental validation data were compared with the XCOM values

Gamma Energy (keV)	Mass Attenuation Coefficient (μ/ρ : cm ² /g)		
	Pb	Cu	Al
500	0,161	0,083	0,084
600	0,124	0,076	0,078
662	0,110	0,073	0,075
800	0,088	0,066	0,068

In this study, the mass attenuation coefficient remains unaffected by the sample's thickness and geometry, which is a common characteristic. The attenuation experiments were carried out under the assumption of a uniform plane geometry for the sample. However, μ_p is a distinctive property associated with the geometric shape of a sample.

RESULTS AND DISCUSSION

Activity Concentration Results: In this radiological examination, natural radionuclide activity concentrations were determined by gamma spectroscopy approximately 90 different natural building stones obtained from important block stone production regions of Türkiye such as Aegean, Marmara, Central Anatolia, Mediterranean, Eastern and Southeastern Anatolia and in 49 imported natural stone samples widely used in Türkiye. The ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K activity concentrations of the natural building stones under examination are given below, considering their lithological classifications.

35 marble samples and 8 granite samples were used from sample pool for the stud of activity concentration analysis because of their suitable conditions for the study.

Table 2. ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K Activity concentrations of marble samples

No	Commercial name of Natural Stones	Natural-Terrestrial radionuclide Activity concentrations (Bqkg ⁻¹)		
		²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
1	Afyon Açık Gri	<0,5	<0,5	<2

2	Afyon Bal	1,5 ±0,5	3±1	43 ± 5
3	Afyon Beyaz	2 ±0,2	<0,5	<2
4	Afyon Çizgili	1± 0,1	<0,5	<2
5	Afyon Gri	<0,5	<0,5	<2
6	Afyon Kaplan Postu	3.5 ± 0,5	1±0,1	18±2
7	Afyon Koyu Gri	2.5 ± 0,5	<0,5	<2
8	Afyon Menekşe	1 3 ± 0,2	1,5 ± 0,1	30±1
9	Afyon Pembeli	1 ± 0,1	1,5 ± 0,1	25±1
10	Afyon Sarılı	<0,5	<0,5	<2
11	Afyon Şeker	1,5 ± 0,5	0,5 ± 0,1	11±1
12	Akşehir Siyah	9 ±0,5	1±0,2	21±1
13	Aydın Linyit Siyahı	37±1	<0,5	5±1
14	Belevi Siyah	23±2	<0,5	20 ±1
15	Denizli Siyah	20± 0,5	<0,5	12 ±1
16	Ege Bordo	15±0,2	2±0,1	19±1
17	Ege Gümüş	3±0,2	0,5 ±0,1	5±1
18	Ege Kahve	13± 0,2	1,5 ±0,1	30±1
19	Ege Siyah	19±2	<0,5	170±2
20	Egean Pearl	6±1	<0,5	<2
21	İskenderun Siyah	14 ± 50	0,5± 0,1	10±1
22	Konya Yeşil	<0,5	<0,5	102±7
23	Kütahya Yeşil	1,5 ± 0,5	1,5 ± 0,5	27±1
24	Likya Brown	<0,5	<0,5	42±2
25	Milas Limon	<0,5	5±2	<2
26	Muğla Beyaz	2±0,5	<0.5	<2
27	Muğla Şeker	2,5 ± 0,5	0.5 ± 0.1	2± 1
28	Petrol Yeşili	9±1	<0,5	<2
29	Teos Ateşi	<0,5	<0,5	<2
30	Teos Yeşil	<0,5	<0,5	<2
31	Toros Siyah	<0,5	4±1	<2

32	Troya	<0,5	<0,5	<2
33	Uşak Dolomit	<0,5	<0,5	<2
34	Uşak Yeşil	<0,5	<0,5	<2
35	Uşak Yeşil Desenli	3 ± 0,5	5±1	101 ±3

Table 3. ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K Activity concentrations of granite samples

No	Commercial name of Natural Stones	Natural-Terrestrial radionuclide Activity concentrations (Bqkg ⁻¹)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
1	Aksaray Pink	75±2	78±2	1114±11
2	Aksaray Yaylak	82±3	62±2	1082±13
3	Anadolu	99±3	93±3	1027±11
4	Balaban Yeşil	60±2	45±1	766±7
5	Balya Balıkesir Gri	75±1	138±2	1153±11
6	Giresun Vizon	194±8	155±3	1377±18
7	İspir Pink	69±2	65±2	1602±16
8	Kozak Graniti	90±6	73±3	972±13

Table 4. Activity Indexes of Turkish Granites and Imported Natural Building Stones Based on Their Indoor Usage Rate (wm) (I)

Natural Stone	In rate of building material usage (%w _m)				D / nGyh ⁻¹	DE / μSvy ⁻¹
	Activity index (I)					
	w _m =1	w _m =0,75	w _{m0} =5	w _m =0.25	w _m =0.25	w _m =0.25
Türkiye Granites	3,2	2,4	1,8	0,9	61	298
Imported Natural Stone	2.6	2	1.3	0.7	51	250

Attenuation Results: Stone classification was utilized to independently assess attenuation. Data for marble, granite, and sedimentary rock samples are provided in Tables 5, 7, and 8, respectively. A brief statistical analysis was performed for the granite and marble samples (Table 6 and 8). However, due to the limited availability of sedimentary rocks (approximately 20 samples), conducting a statistical analysis was not feasible. The statistical evaluations were carried out using the institutionally licensed SPSS V.25 software.

Marbles: All samples in this category are domestic products. A total of 24 samples were analysed. The Meke Kayrak product is commercially classified as marble; however, from a geological perspective, it does not belong to this group. Instead, Meke Kayrak is a type of schist.

Table 5. Gamma attenuation rates, attenuation coefficients, half-value layers, and mean free paths (mfp) for the marble samples. The samples were categorized based on their commercial names in the marketplace

No.	Sample Name (Commercial Name)	Thickness x (cm)	I/I_0 (%)	μ_L (cm^{-1})	μ_p (cm^2/g)	HVL (cm)	mfp (cm)	x/mfp (%)
1	Afyon Bal	1,95	68	0,1991	0,0729	3,48	5,02	39
2	Afyon Beyaz	2,13	65	0,2058	0,0807	3,37	4,86	44
3	Afyon Gri	2,70	57	0,2086	0,0812	3,32	4,79	56
4	Afyon Menekşe	2,16	61	0,2290	0,1060	3,03	4,37	49
5	Afyon kaplanpostu	2,00	67	0,1996	0,0736	3,47	5,01	40
6	Afyon Pembe	2,10	65	0,2066	0,0735	3,35	4,84	43
7	Afyon Sarılı	2,00	66	0,2088	0,0785	3,32	4,79	42
8	Afyon Şeker	2,10	63	0,2191	0,0817	3,16	4,56	46
9	Akşehir Siyah	1,85	68	0,2048	0,0756	3,39	4,88	38
10	Buz Beyazı	1,00	81	0,2137	0,0753	3,24	4,68	21
11	Denizli Siyah	1,80	69	0,2101	0,0821	3,30	4,76	38
12	Ege Beyaz	1,70	68	0,2247	0,0839	3,08	4,45	38
13	Ege Bordo	1,00	81	0,2153	0,0769	3,22	4,64	22
14	Ege Gümüş	1,35	74	0,2219	0,0807	3,12	4,51	30

15	Egean Pearl	1,20	76	0,2249	0,0770	3,08	4,45	27
16	Konya Yeşil	0,85	80	0,2697	0,1062	2,57	3,71	23
17	Kütahya Yeşil	1,00	81	0,2121	0,0760	3,27	4,71	21
18	Milas Limon	1,30	74	0,2300	0,0839	3,01	4,35	30
19	Muğla Beyaz	1,00	81	0,2128	0,0783	3,26	4,70	21
20	Muğla Şeker	1,85	69	0,2018	0,0753	3,44	4,96	37
21	Karabük Bej	1,05	78	0,2406	0,1055	2,88	4,16	25
22	Toros Siyah	1,00	83	0,1916	0,0734	3,62	5,22	19
23	Uşak Yeşil	1,00	79	0,2368	0,0932	2,93	4,22	24
24	Meke Kayrak (schist)	0,85	86	0,1751	0,0552	3,96	5,71	15

Table 2 presents the distribution of attenuation data for marble samples. A 95% confidence interval was determined, indicating that there is a 95% probability that all samples exhibit attenuation characteristics within the specified data range.

Table 6. Descriptive statistics for marble samples. The analysis included 23 samples, with the 24th sample excluded due to its geological classification as non-marble material

Marble	I/I_0 (%)	μ_L (cm^{-1})	μ_p (cm^2/g)	HVL (cm)	mfp (cm)
N (number of sample)	23	23	23	23	23
Mean	71,910	0,217	0,082	3,214	4,636
± Mean Std	1,584	0,004	0,002	0,048	0,069
Median	69,000	0,213	0,078	3,260	4,700

Standard Deviation		7,597	0,017	0,010	0,233	0,334
Geometric Mean		71,520	0,216	0,082	3,205	4,624
Skewness		-0,111	1,417	1,610	-0,856	-,864
Skewness ± Std		0,481	0,481	0,481	0,481	0,481
Kurtosis		-1,161	3,109	1,550	1,334	1,371
Kurtosis ± Std		0,935	0,935	0,935	0,935	0,935
Minimum		57,000	0,192	0,073	2,570	3,710
Maximum		83,000	0,269	0,106	3,620	5,220
95% Confidence Interval	Up Edge	75,200	0,224	0,087	3,314	4,781
	Down Edge	68,630	0,210	0,078	3,113	4,492
Distribution (%)	25	66,000	0,206	0,075	3,080	4,450
	50	69,000	0,213	0,078	3,260	4,700
	75	80,000	0,225	0,084	3,370	4,860
Normality Test		0,079	0,200	0,000	0,200	0,200
(K-S Test) p > 0.05						
Frequency Distribution		NORMAL	NORMAL	LOG-NORMAL	NORMAL	NORMAL

Kolmogorov–Smirnov Normality Test ($\alpha = 0,05$): Research findings indicate that the mass attenuation coefficients for marble samples follow a log-normal distribution ($p < 0,05$), while transfer rates (I/I₀), linear absorption coefficients, HVL, and mfp values conform to a normal distribution. The mean transfer rate was calculated as 71,91%, within a range of 57%–83%. The Kolmogorov–Smirnov normality test provides a simple way to compare normal and log-normal distributions by analysing the arithmetic mean, median, and geometric mean. In a log-normal distribution, the geometric mean and

median correspond closely to the arithmetic mean and median in a normal distribution. Additionally, the median value in a log-normal distribution serves as a representation of the mean (Yaprak G. and Yaşar Ö., 2009). The median mass attenuation coefficient in the log-normal distribution (K–S test; $p < 0,05$) was found to be $0,078 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$, with values ranging from $0,073$ to $0,106 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$. Among the tested samples, Konya Yeşil marble exhibited the highest attenuation values, whereas Meke Kayrak schist had the lowest attenuation coefficient) due to its exclusion from statistical analysis. Based on Tables 5 and 6, approximately half of the marble samples analysed showed attenuation within the 57%–69% range, while the remaining samples varied around $\sim 71,91\% \pm 7,59\%$.

Granite: A total of twenty-two granite samples were analysed, including five domestically produced samples and the rest designated for export. The attenuation properties of these granite samples are provided in Tables 7 and 8.

Table 7. Gamma attenuation rates, attenuation coefficients, half-value layers, and mean free paths for granite samples.

	Sample Name (Commercial)	Thickness x(cm)	I/I ₀ (%)	μ_L (cm^{-1})	μ_ρ (cm^2/g)	HVL (cm)	mfp (cm)	x/mfp (%)
1	Baltık Brown	2,00	66	0,2086	0,0831	3,32	4,79	42
2	Blue Perl	2,00	67	0,2038	0,0818	3,40	4,91	41
3	China Brown Porrino	2,22	67	0,1833	0,0761	3,78	5,46	41
4	China Black	2,00	62	0,2379	0,0952	2,91	4,20	48
5	Giallo Fioroti	2,00	67	0,2034	0,0851	3,41	4,92	41
6	Giallo Ormentalo	2,04	66	0,2044	0,0814	3,39	4,89	42
7	Giallo Topazio	2,00	67	0,1979	0,0779	3,50	5,05	40
8	Gemlik Diyarbaz*	1,90	68	0,2046	0,0787	3,39	4,89	39
9	Giresun Vizon*	1,06	80	0,2124	0,0795	3,26	4,71	23
10	İspir Pink*	1,96	69	0,1900	0,0728	3,65	5,26	37
11	Kozak Granit*	1,05	81	0,2008	0,0717	3,45	4,98	21

12	Teos Yeşil*	2,90	56	0,2005	0,0825	3,46	4,99	58
13	Nero Africa	2,10	63	0,2230	0,0858	3,11	4,48	47
14	New Calendonia	2,00	61	0,2442	0,0969	2,84	4,09	49
15	Rosavell	1,95	68	0,1980	0,0966	3,50	5,05	39
16	Rosa Porrino	1,96	67	0,2006	0,0768	3,46	4,99	39
17	Saphire Blue	1,99	70	0,1819	0,0710	3,81	5,50	36
18	Tiger Skin	1,95	66	0,2106	0,0755	3,29	4,75	41
19	Upatupa (in local trade)	2,00	66	0,2058	0,0820	3,37	4,86	41
20	Verde Mare	2,00	67	0,1967	0,0820	3,52	5,08	39
21	Verde Lavras	2,10	61	0,2358	0,0943	2,94	4,24	50
22	Zimbabwe	1,93	62	0,2465	0,0822	2,81	4,06	48

*National product

Table 8. Descriptive statistics of the granite samples

Granite	I/I ₀ (%)	μ_L (cm ⁻¹)	μ_p (cm ² /g)	HVL (cm)	mfp (cm)
N (number of sample)	22	22	22	22	22
Mean	66,68	0,209	0,082	3,344	4,83
± Mean Std	1,178	0,004	0,002	0,059	0,085
Median	67,00	0,204	0,082	3,3950	4,90
Standard Deviation	5,52	0,018	0,008	0,275	0,397

Geometric Mean		66,47	0,208	0,082	3,333	4,809
Skewness		1,09	0,873	0,685	-0,533	-0,528
Skewness $\pm$ Std		0,49	0,491	0,491	0,491	0,491
Kurtosis		2,64	0,106	-0,185	-0,087	-0,084
Kurtosis $\pm$ Std		0,95	0,953	0,953	0,953	0,953
Minimum		56,00	0,182	0,071	2,810	4,06
Maximum		81,00	0,246	0,097	3,810	5,50
95% Confidence Interval	Up Edge	69,13	0,216	0,086	3,466	5,00
	Down Edge	64,23	0,201	0,079	3,222	4,65
Distribution (%)	25	62,75	0,198	0,076	3,223	4,65
	50	67,00	0,204	0,082	3,395	4,90
	75	68,00	0,215	0,085275	3,500	5,05
Normality Test (K-S Test) $p > 0.05$		0,005	0,023	0,057	0,082	0,092
Frequency Distribution		LOG- NORMAL	LOG-NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL

Literature searches were given in Table 9. Sample diversity of the literature is less than expected. There can be found data for artificial materials in large number of sample scale however natural stones have no large sample pool in literature.

Literature search:

Table 9. Comparison of the attenuation data obtained from literature and this study (for 662 keV)

Material	Attenuation Coefficient		Method	Reference
	(cm^{-1})	(cm^2/g)		
Marble	0,172–0,3407	0,0642–0,0941	Experimental	Ozyurt O., et al. 2018
Marble	0,21	0,778	Simulation XCOM	Demir E., 2020
Marble	0,18983	0,07136	Experimental	Zaim N., Hatipoğlu D., 2018
Granite	0,198–0,218		Experimental	Laith A.N., et. al. 2016)
Granite	0,16–0,29		Experimental	Ayman M.A. et. al. 2022
	0,211–0,242		XCOM	
Limestone	0,161		Experimental	Awadallah, M.İ., İmran, m.,2007
Olivine basalt		0,076	XCOM	
Black granite		0,076		
Limestone		0,077		
Limestone		0,077		Al-Buriahi M.S. et. al. 2021
Dolerite		0,130		
Olivine basalt		0,076	EPICS2017	
Black granite		0,076		
Limestone		0,077		
Limestone		0,077		
Dolerite		0.076		

Data of This Study Attenuation Coefficient				
	(cm ⁻¹)	(cm ² /g)		
Marble	0,217 (0,192–0,269)	0,078 (0,0735 – 0,106)		
Granite	0,204 (0,182- 0,2465)	0,082 (0,071- 0,097)		
Limestone	0,177- 0,216	0,072–0,095		
Travertine	0,182–0,184	0,0796 –0,0805		
Other Materials	Attenuation Coefficient		Method	Reference
	(cm ⁻¹)	(cm ² /g)		
Cement		0,0668–0,0884	Simulation	Rodríguez F. et. al. 2022
Iron	0,463	0,076	Experimental	Ali M.D.M. et. al. 2021
Cement	0,139	0,058		
Clay	0,101	0,065		
Soil		0,076	Experimental	Alam M.N. et al. 2001
Sand		0,105		
Cement		0,071		
Brick		0,074		
Plaster		0,058		
Brick		0,0772	Simulation	Salinas I.C.P. et. al. 2006
Concrete		0,0767		
Asbestos		0,0765		

Wood		0,0814		
Phosphate	0,1843	0,0806	Experimental	Abbady A. et. al. 2022
Sandstone	0,1373	0,0761		

Sedimentary Rocks: We looked at the attenuation characteristics of eight natural sedimentary rock samples. These are onyx, travertine, and limestone rocks. Because there were fewer than 20 samples, statistical analysis could not be done. Table 8 provided attenuation data as well as basic statistics.

Table 10. Gamma attenuation rates, attenuation coefficients, half layer values and mean free paths for sedimentary rock samples

		Thickness	I/I ₀	μ_L	μ_p	HVL	mfp	
	Stone Name	(cm)	(%)	(cm ⁻¹)	(cm ² /g)	(cm)	(cm)	Type
1	Kırmızı Traverten	2,70	61	0,1835	0,0805	3,78	5,45	Travertine
2	Elazığ Sarısı	2,00	70	0,1816	0,0796	3,82	5,51	Travertine
3	Osmaniye Kırmızı	2,00	67	0,1992	0,0749	3,48	5,02	Limestone
4	Bursa Bej	1,00	83	0,1907	0,0836	3,63	5,24	Limestone
5	Ege Kahve	0,98	81	0,2159	0,0951	3,21	4,63	Limestone
6	Moko Bej	1,05	83	0,1771	0,0717	3,91	5,65	Limestone
7	Onix	1,80	67	0,2184	0,0903	3,17	4,58	Onyx
8	Uşak Dolomit*	0,97	80	0,2243	0,0843	3,09	4,46	Dolomite
Primitive Statistic								
	Mean	74	0,199	0,083	3,511		5,068	
	Median	75	0,195	0,082	3,555		5,130	

Geometrical Mean	73,5	0,198	0,082	3,498	5,049
Standard Deviation	8,70	0,018	0,008	0,322	0,465
Minimum	61	0,177	0,072	3,090	4,460
Maximum	83	0,224	0,095	3,910	5,650

*Dolomit consists by replacing MgO instead of CaO partially or completely. So, it is interested with limestones.

Attenuation rates of sedimentary rock samples vary in 67%-83% for 662 keV gamma energy. $0.095 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ as maximum mass attenuation coefficient of Ege Kahve sample is comparable with granites. Minimum value is 0.072 for Moko Bej sample.

As general evaluation of attenuation characteristics for natural stones, $(I/I_0)_{\text{granite}} > (I/I_0)_{\text{marbles}} > (I/I_0)_{\text{sedimentary}}$, mean values of linear and mass attenuation coefficients, HVL and mfp are close to each other.

For a large sample set, the results were analysed using a single gamma energy of 662 keV. The variation in attenuation rates with energy can be estimated by considering multiple energy points or a continuous energy spectrum, with the selected energy falling within the medium-energy range. Additionally, natural radiation dose energies are generally lower than 662 keV. In most cases, gamma energy levels, particularly in medical applications, do not exceed 662 keV. The examination of natural stone samples' attenuation coefficients showed similarities to those observed in aluminium. Kiran et al. (2014) experimentally determined the effective atomic number of a marble sample to be 13.04, which is close to the atomic number of aluminium. The atomic number serves as a key factor in defining the characteristics of a mixture or compound. When a mixture or compound has a specific effective atomic number, its attenuation coefficient remains stable over a range of elemental compositions (Camgöz and Tarım, 2023).

CONCLUSION

In this study, in addition to Turkish natural building stones of different origins, imported natural building stones were also evaluated in terms of radiological risk. This initiative, which is suitable for the purpose of the study, has enabled the creation of a radiological database for imported natural building stones. The usage rate of natural building stones in the building does not exceed 25%. In this context, the maximum activity indexes (I) of magmatic (igneous) natural building stones are given as depending on the percentage of indoor use of the material " w_m " and the gamma dose rates (D) and effective dose equivalents absorbed from terrestrial sources in the indoor environment are calculated. These results, which briefly summarize the radiological properties of Turkish and imported natural building stones, "clearly show that the use of these materials in building construction and decoration will not pose any radiological risk in the indoor environment".

Although natural stones include some terrestrial radioactive elements as other earth originated materials, this study examined the mass attenuation properties of commonly traded natural stones in Turkey. While intensity attenuation data for a gamma-absorbing medium can approximate dose attenuation at a given photon energy point or energy range, it is important to distinguish between dose

attenuation and intensity attenuation. In this research, only intensity attenuation was calculated. The study was conducted using a medium gamma energy level of 662 keV. The mass attenuation coefficients obtained for the analysed natural stone samples were found to be like those of copper and aluminium. Considering stochastic effects, “the use of these stones as construction materials—particularly in large-scale coatings—is expected to significantly reduce natural radiation exposure in residential areas”. Additionally, natural stones could serve as secondary radiation shields in clinical settings, particularly for low-energy gamma and X-ray applications. This research contributes to enhancing radiation shielding by complementing conventional materials, such as lead, in medical radiation protection and stochastic radioprotection. Although a single energy level was used for all samples, it provides a normalization benchmark for ionizing electromagnetic radiation at various energy levels. The findings suggest that as radiation energy decreases, the intensity of transmitted radiation also diminishes. The ability of these stones to “shield against low-energy radiation, such as that used in diagnostic imaging, is particularly noteworthy”.

Future Considerations: Although nuclear power plant accidents are rare, they remain a possibility. In such scenarios, Sr-90 and Cs-137 are the primary radioactive contaminants with long environmental half-lives. As Sr-90 is a beta emitter, effective insulation of Cs-137 is crucial due to its gamma radiation emissions. This study highlights the radioprotective capabilities of natural stones against radiation from Cs-137 sources, establishing a valuable radioprotection database. It is recommended that the radiation attenuation properties of commercial natural stones be standardized according to consistent and practical guidelines. Overall, no significant differences were observed in the mass attenuation coefficients of the examined natural stones. From this perspective, “marbles and other sedimentary rocks with low natural radio-nuclide content are recommended for shielding against X-rays and low-energy gamma radiation”. By incorporating a large sample set, this research provides an extensive database on the gamma attenuation properties of natural building stones, distinguishing it from previous studies that analysed a more limited number of samples. A key novelty of this study is the validation process using materials with well-documented attenuation properties, which enhances the quality and reliability of the data. The findings suggest that “natural stones could serve as effective shielding materials against stochastic radiation risks”. Unlike prior studies, the inclusion of a large number of samples allowed for statistical evaluation of data. While the statistical analysis of I/I₀ values may not appear highly significant due to variations in stone thicknesses, these results still provide insight into the radiation absorption rates of different samples. Furthermore, the outcomes of this research could support the development of national and international standards for natural stone applications in radiation shielding.

REFERENCES

- Abbady, A., Motoweo, M., Haro, S. (2022). Attenuation coefficients of Gamma rays in some natural rocks. *International Journal of Scientific Research*, 7, 1-7.
- Abualroos, N. J., Yaacob, K. A., Zainon, R. (2023). Radiation attenuation effectiveness of polymer-based radiation shielding materials for gamma radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 212, 111070.
- Akbal, S., Baytaş, A. F. (2002). Determination of Soil Parameters by Gamma Ray Transmission. *Radiation Measurement*, 35, 17-21. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00253-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00253-0)
- Akkurt, I., Kılınçarslan, S., Başığit, C. (2004). The photon attenuation coefficients of barite, marble and limra. *Annals of Nuclear Energy*, 31, 577-582. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2003.07.002>
- Alam, M. N., Miah, M. M. H., Chowdhury, M. I., Kamal, M., Ghose, S., Rahman, R. (2001). Attenuation coefficients of soils and some building materials of Bangladesh in the energy range 276-1332 keV. *Applied Radiation and Isotopes*, 54, 973-976. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00354-7](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00354-7)

- Albering, H. J., Hoogewerff, J. A., Kleinjans, J. C. S. (1996). Survey of ^{222}Rn Concentration in Dwellings and Fails in the Dutch Belgion Border Region. *Health Physics*, 60(4), 64-69.
- Al-Buriahi, M. S., Sayyed, M. I., Rashad, A., Bantan, A. R., Al-Hadeethi, Y. (2021). Nuclear radiation shielding characteristics of some natural rocks by using EPICS2017 library. *Materials*, 14, 4669.
- Ali, M. D. M., Eisa, M. E. M., Mars, J. A., Mohamadain, K. E. M., El Faki, A. E., Hamed, A., Cloete, K. J., Beineen, A. A. (2021). Study of gamma rays shielding parameters of some building materials used in Sudan. *International Journal of Radiation Research*, 19, 191-195.
- Alzahrani, F. M. A., Elqahtani, Z. M., Alzahrani, J. S., Eke, C., Alrowaili, Z. A., Al-Buriahi, M. S. (2024). Gamma attenuation characteristics of silicon-rich glasses in $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{ZnO}$ system for radiation applications. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17, 100760.
- Awadallah, M. İ., İmran, M. (2007). Experimental investigation of g-ray attenuation in jordanian building materials using hpge-spectrometer. *Journal Environmental Radioactivity*, 94, 129.
- Ayman, M. A., Al-Naggar, T. I., Bashiri, A. M., Alsareii, S. A. (2022). Radiation shielding performance for local granites. *Progress in Nuclear Energy*, 150, 104294.
- Berger, M. (2010). XCOM: Photon cross sections database. <http://www.Nist.Gov/Pml/Data/Xcom/Index.Cfm>.
- Bruzzi, L., Mele, R., Padoani, F. (1992). Evaluation of Gamma and Alpha Doses due to Natural Radioactivity of Building Materials. *Journal of Radiation Protection*, 12(2), 67-76.
- Camgöz, B., Tarım, D. (2023). Determination of dosimetric dependence for effective atomic number of LDR brachytherapy seed capsule by Monte Carlo simulation. *Nuclear Engineering and Technology*, 55, 2734-2741. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.04.015>
- Camgöz, Y. I., Camgöz, B., Yaprak, G. (2024). Investigation on radiation attenuation properties of natural stone samples traded in Turkey. *Science of the Total Environment*, 926, 171452.
- Canbaz, B., Çam, N. F., Yaprak, G., Candan, O. (2010). Natural Radioactivity (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) and Assesment of Radiological Hazards in the Kestanbol Granitoid, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 141(2), 192-198.
- Çetin, E. (2011). Granitik Kayaçların Radyolojik ve Mineralojik Yönden Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Turkey National Thesis Center. <http://tez.yok.gov.tr/>
- De Vecchi, G., Lazzarini, L., Lünel, T., Mignucci, A., Visona, D. (2000). The genesis and characterization of 'Marmor Misium' from Kozak (Turkey), a granite in antiquity. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 145-153.
- Demir, E. (2020). Assessment of special hybrid composite materials against radiation, analysis by xcom program, evaluation of radiation damage with Xe-26 ions by SRIM simulation, PhD Thesis, Turkey National Thesis Center. <http://tez.yok.gov.tr/>
- Eder, H., Schlattl, H. (2018). IEC 61331-1: A new setup for testing lead free X-ray protective clothing. *Physica Medica*, 45, 6–11.

Hannachi, E., Slimani, Y., Sayyed, M. I., Mahmoud, K. G. (2023). Scheelite-type BaWO₄ doped with HO₂O₃ oxide as a promising lead-free shield for gamma rays: Structural, optical properties, and radiation attenuation efficiency. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 167, 107802.

Iqbal, M., Tufail, M., Mirza, S. M. (2000). Measurement of Radioactivity in Marble Found in Pakistan Using a NaI (Tl) Gamma Ray Spectrometer. *Journal of Radioactivity*, 51, 255-265.

Karahan, D. S. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Doğaltaşlar. The institute of Mineral Research and Exploration (MTA).

Kiran, K. U., Ravindraswami, K., Eshwarappa, K. M., Somashekarappa, H. M. (2014). Effective atomic number of granite by gamma backscattering method. *Proceedings of the DAE Symp. on Nucl. Phys.*, 59.

Laith, A. N., Abdalsattar, K. H., Hussein, A. A., Israa, M. H. (2016). Study the attenuation coefficient of granite to use it as shields against gamma ray. *Detection*, 4, 33-39.

Malanca, A., Pessina, V., Dallara, G., Luce, C. N., Gaidolfi, L. (1995). Natural radioactivity in Building Materials from the Brazilian State of Espirito Santo. *Applied Radiation and Isotopes*, 46(12), 1987-1992.

Martin, J. E. (2000). *Physics for Radiation Protection*. Wiley-Vch Press National Institute of Standards and Technology. Element/compound/mixture selection.
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

Ozyurt, O., Altinsoy, N., Karaaslan, Ş. İ., Bora, A., Buyuk, B., Erk, İ. (2018). Calculation of gamma ray attenuation coefficients of some granite samples using a Monte Carlo simulation code. *Radiation Physics and Chemistry*, 144, 271-275. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.08.024>

Rodríguez, F., Rey, J., Mendoza, R., Martínez, J., Hidalgo, M. C. (2022). Combining geophysical methods (DC, IP, TDEM and GPR) to characterise mining waste in the Linares-La Carolina district (southern Spain). *Journal of Environmental Management*, 322, 116166.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116166>

Salinas, I. C. P., Conti, C. C., Lopes, R. T. (2006). Effective density and mass attenuation coefficient for building material in Brazil. *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 13-18.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2005.07.003>

Singh, V. P., Badiger, N. M. (2013). Study of mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities of carbon steel and stainless steels. *Radioprotection*, 48, 431-443.
<https://doi.org/10.1051/radiopro/2013067>

Singla, A., Dhingra, N. (2023). Investigation of impact of soil texture, depth and gamma ray energy on the mass attenuation coefficient and determination of soil bulk density using Gamma-Ray Spectrometry. *Radiation Physics and Chemistry*, 216, 111400.

Stankovic, S. J., Ilic, R. D., Jankovic, K., Bojovic, D., Loncar, B. (2010). Gamma radiation absorption characteristics of concrete with components of different type materials. *Acta Physica Polonica Part A*, 117, 812-816. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.117.812>

TSchöpf, T., Pichler, T. (2016). Radiation Protection Clothing in X-Ray Diagnostics – Influence of the Different Methods of Measurement on the Lead Equivalent and the Required Mass. *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, 188, 768-775.

UNSCEAR. (2000).

Yaprak, G. (1999). Indoor ^{222}Rn concentrations in The Vicinity of a Turkish Coal-Fired Power Plant. *Journal of Environmental, Radioactivity*, 46, 131-135.

Yaprak, G., Yaşar, Ö. (2009). Türkiye Mermerlerindeki Doğal Radyonüklid İçeriğinin ve Radon Emanasyon Hızının Radyolojik Risk Açısından Değerlendirilmesi, Ege University Scientific Research Project.

Zaim, N., Hatipoğlu, D. (2018). Experimental investigation of gamma radiation attenuation coefficients for kırklareli marble. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 22, 141-147.

MERMER OCAKLARINDA BLOK ÜRETİM MALİYETLERİNİN ÜRETİM KAPASİTESİ İLE DEĞİŞİMİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF VARIATION IN BLOCK PRODUCTION COSTS WITH PRODUCTION CAPACITY IN MARBLE QUARRY

T. Mallı *, A.H. Deliormanlı

Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

**Sorumlu yazar: tahir.malli@deu.edu.tr*

ÖZ

Türkiye doğaltaş ihracatı 2024 yılında 1,939,360,648 \$ değeriyle ülke ihracatını %0,74 düzeyinde desteklemiştir. Doğaltaş sektöründe mermer-traverten ham veya blok ürün grubu ihracat değerleri bir önceki yıla göre %7,44 oranında düşerek 616,065,056 \$ değerine ve miktar bakımından %7,79 oranında düşerek 3,168,165 t düzeyine gerilemiştir. Mermer sektöründe ihracat değeri ve miktarında önemli oranda düşüş ve global rekabetteki risklere karşın işletmelerin teknik ve ekonomik parametrelerin optimize edilmesine yönelik önlem ve çözüm stratejilerinin geliştirmesi kaçınılmazdır. Bu durum, mermer işletmelerinde üretim maliyet ve gider bileşenlerinin minimize edilmesini ekonomik açıdan gerektirmektedir. Özellikle maliyet analizi ve kontrolü işletmelerin ekonomisi ve sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, örnek bir mermer işletmesinde ekonomik blok mermer üretimlerinin sağlanmasına yönelik olarak kapasitenin üretim maliyetlerine etkisi belirlenmeye çalışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mermer ocağı, ekonomik üretim, işletme kapasitesi, blok verimi, maliyet analizi.

ABSTRACT

Natural stone exports of Türkiye supported the country's exports by 0.74% in 2024 with a value of \$1,939,360,648. In the natural stone sector, exports values of the marble-travertine raw or block product decreased by 7.44% compared to the previous year, falling to \$ 616,065,056 and in terms of quantity, falling by 7.79% to 3,168,165 tons. Therefore, the significant decreased in export value and quantity in the marble sector and risks in global competition, it is inevitable for enterprises to develop precautions and solution strategies to optimize technical and economic parameters. This situation requires the minimization of production cost and expense components in marble enterprises from an economic perspective. In particular, cost analysis and cost control is very important for economy and sustainability of marble quarries. In this study, the effect of capacity on production costs is tried to be determined in order to ensured economical block marble production in a model marble quarry.

Keywords: Marble quarry, economical production, operation capacity, block efficiency, cost analysis.

1. GİRİŞ

Dünya'nın en zengin mermer yataklarının bulunduğu Alp-Himalaya kuşağında yer alan Türkiye, 5,1 milyar m³ (13,9 milyar ton) muhtemel mermer rezervine sahip olup bu değer 15 milyar m³ olduğu tahmin edilen dünya rezerv toplamının %33'üne karşılık gelmektedir. Sektör yaklaşık 1500 doğaltaş ocağı, fabrika ölçeğinde faaliyet gösteren 2000 kadar tesis ile 300,000 istihdam ile önemli bir faaliyet alanıdır (Doğaltaşlar Sektör Raporu, 2021). Türkiye zengin rezervleri ve gelişen mermer işleme sanayisi ile dünyanın en önemli doğaltaş üreticileri arasında yerini almıştır. Özellikle son dönemde büyük şirketlerin yaptığı yatırımlar sayesinde modern mermer ocağı üretim yöntemleri ve gelişen en son teknikler sayesinde mermer üretimi ve işleminde büyük artış kaydedilmiştir (Özçelik, 2023).

Dünya doğaltaş ihracatı içinde %11 düzeyinde pay alan Türkiye doğaltaş ihracatı 2024 yılında 1,939,360,648 \$ değeriyle toplam ihracat içinde yaklaşık %0,74 düzeyinde ülke ihracatını desteklemiştir. (IMIB,2024). Doğaltaş ihracatı 2022 yılında 2,096,357 \$ değerinde ve miktar olarak 7,176,765 ton düzeyinde gerçekleşmiştir. İhracat değeri 2023 yılında bir önceki seneye göre yaklaşık %7,6 oranında düşerek 1,936,698,152 \$ düzeyinde gerçekleşirken miktar olarak da %12,1 oranında azalarak 6,307,373 ton düzeyinde gerçekleşmiştir. 2024 yılında da düşüşü devam eden doğaltaş sektöründe mermer-traverten ham veya blok ürün grubu ihracat değerleri bir önceki yıla göre %7,44 oranında düşerek 616,065,056 \$ değerine ve miktar bakımından %7,79 oranında düşerek 3,168,165 t düzeyine gerilemiştir (IMIB,2024).

Mermer sektöründe ihracat değeri ve miktarında önemli oranda düşüş ve küresel rekabetteki risklere karşı işletmelerin önlem ve çözüm stratejileri geliştirmesi kaçınılmazdır. Dünya mermer sektöründe kazanılan ticaret hacmi, rekabet gücü ve elde edilen büyümenin sürdürülebilir kılınması, üretim ve istihdamı arttırmanın küresel piyasalarda rekabet edebilmenin yolu ekonomik rekabetçi işletmelerden geçmektedir. Bu yönüyle, optimum üretim kapasitelerinde planlanan işletmelerde sağlanacak ekonomik çözümler ve uygulamalarla verimlilik ve maliyetlerde iyileştirmeler sağlanabilir. Böylelikle, mermer işletmelerinin daha rantabl çalışması sağlanarak, ülke mermer rezervlerinden daha yüksek rasyonel ve ekonomik fayda sağlanabilmesi olasıdır (Mallı, 2017).

Model çalışma, mermer işletmelerinin sürdürülebilirliği, maliyet kontrolü ve karlılık analizinde başabaş noktası kapasitenin belirlenmesi işletmelerin ekonomisi ve sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir. Mermer ocaklarında ekonomiyi direkt etkileyen parametrelerden blok verimi ve üretim kapasitelerinin arttırılması durumunda birim üretim maliyetleri hesaplanmaktadır. Ayrıca işletmede artan kapasitedeki üretimlerde işletme gelir/gider oranlarındaki değişimin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada, model bir mermer işletmesinde ekonomik blok mermer üretimlerinin sağlanmasına yönelik olarak artan üretim kapasitesinin işletme ekonomisine olası etkileri belirlenmeye çalışılmaktadır.

2. MERMER SEKTÖRÜ & İŞLETME DİNAMİKLERİ

Ülkemiz doğaltaş sektöründe 2024 yılı verilerine göre II(b) grubu işletme ruhsatına sahip 3145 işletme faaliyet göstermektedir (MAPEG,2024). Türkiye mermer-traverten ham veya blok ihracat değerleri son beş yılda düşüş trendinde olup 2024 yılında devam ettiği görülmektedir. 2018 yılında ihracat değeri 945,174,218 \$ düzeyinde ve miktar olarak 5,043,319 ton seviyesinden 2023 yılında 665,615,396 \$ değerine ve 3,436,179 tona gerilediği ve 2024 yılında 616,065,056 \$ değerine ve 3,168,166 tona gerilediği görülmektedir. Türkiye mermer-traverten ham veya blok ihracat değerleri son beş yılda düşüş trendine devam etmekte olduğu Türkiye mermer-traverten ham veya blok ihracat değeri ve en yüksek ihracat miktarına ulaştığı 2018 yılına göre %31,86 miktar bazında ve % 29,57 oranında değer kaybettiği görülmektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Türkiye mermer-traverten ham veya blok ihracat miktar ve değerleri (IMIB,2024)

Yıl	Miktar (ton)	İhracat Değeri (\$)
2024	3.168,166	616.065,056
2023	3.436,179	665.615,396
2022	3.561,194	642.929,128
2021	4.231,113	787.240,626
2020	3.470,482	663.287,368
2018	5.043,319	945.174,218

Mermer sektöründe son yıllarda ihracat değerleri ve miktarlarında önemli oranda düşüşler olduğu açıkça görülmekte ve bu durumuna karşın sektörün bilimsel bir bakış açısıyla yeni stratejiler geliştirmesi kaçınılmazdır. Sektördeki bu daralma üreticilerin maliyet kontrolünü ve giderlerini minimize edilmesi ve rekabetçi işletme kapasitelerinde çalışmayı gerektirmektedir. Özellikle mermer ocaklarında karlılık analizi için blok verimine de bağlı olarak başabaş kapasitesinin belirlenmesi işletme ekonomisi ve sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Dünya mermer ticaretinin yaklaşık %10'unu gerçekleştiren Türkiye mermer ve doğaltaş sektöründe mermer ve traverten üretiminin gerçekleştiren işletmeler, tektonik yapının neden olduğu blok verimliliği, yapısal sorunlar vb. gibi teknik kısıtlarla birlikte işletmelerin temel girdisi enerji ve işçilik maliyetleri gibi ekonomik kısıtların etkisindedir. Ayrıca küresel koşullardaki zorluklar ve düşen satış fiyatları da işletmelerin rekabet gücünü azaltmaktadır. Bu zorlukların aşılabilmesi ve sektördeki sürdürülebilirliğin devamlılığı, mermer işletmelerinin uygun maliyetli rekabetçi üretimlerine bağlı olacağı için işletmelerde birim üretim maliyetlerinin akılcı stratejilerle düşürülmesi gerekmektedir. Mermer işletmelerinde ekonomik üretimi etkileyen faktörler genellikle; ocak blok verimi, üretim kapasitesi, makine-ekipman seçimi ve yatırımları, sarfiyat ve tüketim değerleri gibi temel parametreler; sabit ve değişken giderleri etkilemekte olduğu için işletme ekonomisi ile karlılığı da belirlemektedir (Mallı, 2017). İşletmelerin rekabet gücünü belirleyen önemli etkenlerden olan başabaş noktası analizi ve başabaş kapasite değeridir. Başabaş noktası analizi, bir işletmenin karı arttırma hedefinin gerçekleştirilmesinde satış arttırma veya sabit ve değişken giderlerin minimizasyonu temel alan stratejidir. İşletme gelirinin toplam maliyete eşitlendiği bu kapasitede kar ve zarar sıfıra eşittir. Özellikle çeşitli üretim düzeylerinde giderlerin belirlenmesinde ve giderlerde oluşabilecek değişimlerin işletmenin başabaş noktası kapasitesi ile karlılığına etkilerinin belirlenmesinde, ayrıca işletmenin belirli bir kapasite noktasında giderlerinin karşılanıp karlı üretimler için satış fiyatının belirlenmesinde bu analizden yararlanılmaktadır (Kahraman ve Köse, 2014). İşletmelerin karlılık ve rekabet düzeyinin geliştirilmesi için satış değerinin yükseltilmesi önceliklidir, ancak gerçekte zor olduğundan gider kontrolü ve üretim kapasitesinin artırılması işletmeler için daha kolay ve olasıdır. Bu nedenle, mermer işletmelerinin bu kapasite değerinin üstünde çalışılması ve özellikle mermer ocaklarında bu kapasitenin aşılmasına yönelik planlamalar yapılması gerekmektedir.

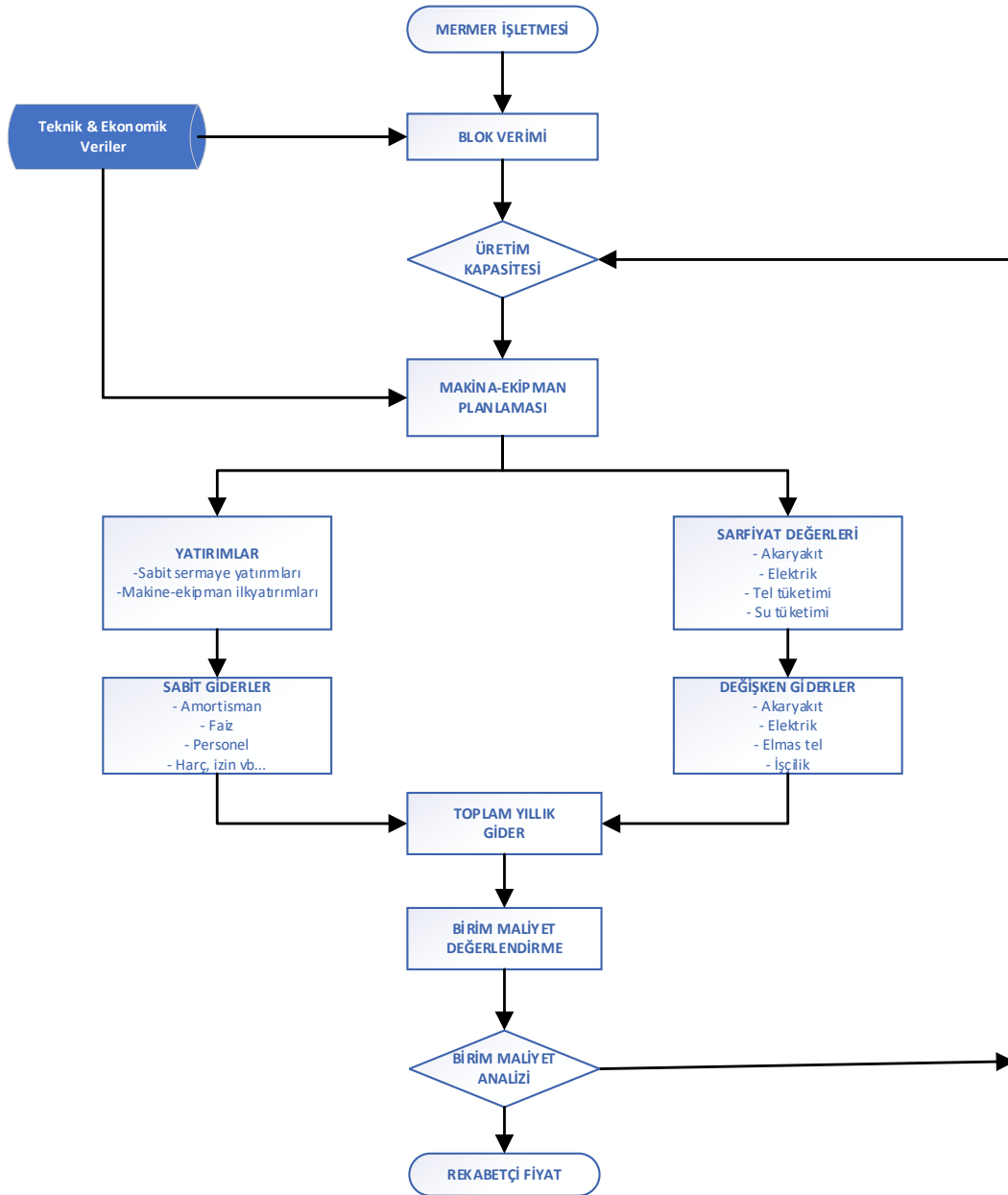
Mermer işletmelerinde jeolojik ve ekonomik etkenlerden kaynaklanan teknik ve ekonomik problemlere çözüm aranması gerekmektedir. Madencilik sektörünün önemli bir alt kolu olan mermer madenciliği Türkiye’de önemli bir yere sahiptir. Mermer sektöründe 2000’den fazla maden işletmesi ve 600’ün üzerinde mermer çeşitliliği bulunmaktadır (Kekeç, 2018). Ülkemizde mermer ocaklarında blok üretim verimlerinin oldukça düşük olduğu jeolojik parametrelerinin yanısıra üretim faaliyetlerindeki bazı uygulamalardan da kaynaklandığı belirtilmektedir (Şengün ve Bilgin, 2022). Mermer ocak işletmeciliğinde yatağın işletilebilirliği ve ekonomik blok boyutu belirlenirken jeolojik yapı, doğal koşullar, alt yapı, yasal durum ve sermaye gibi parametreler dikkate alınmaktadır (Onargan, 2005). Bu yüzden fizibilite etütleriyle mermer işletmesinin hukuki-yasal kriterleri, jeolojik kriterleri ve ekonomik kriterleri incelenerek en uygun ocak yeri belirlenmektedir (Altınççek, 2001). Mermer işletme maliyetine etki eden faktörler; çalışılan bölge koşulları ile ilgili, üretilecek ürünle ilgili, üretim

yöntemiyle ve işçilikle ilgili ve piyasa ile ilgili faktörlerdir (Ersoy ve Aşıkoğlu,2006). Mermer ocaklarında elde edilecek blokların uygun standartlarda olması gerekmektedir ve ocaklardan ürün olarak ortalama 1,5 m x 1,4 m x 2,8 m boyutlarında ticari bloklar üretilmektedir (Onargan, 2005). Bu ticari bloklar, işleme sonrasında elde edilen levha ve/veya fayans kalitesini ve boyutlarını etkilemektedir. Bu nedenle, mermer ocaklarından olabildiğince homojen ve çatlaksız blok üretiminin sağlanması toplam kalite ve işletme verimliliği için temel hedeftir. Bu nedenle, blok mermer endüstrisinde, süreksizlik durumunun, özellikle eklem takımının yönelimi ve süreksizlik yoğunluğu ile kesim boyutları arasındaki oranının araştırılması yüksek önceliğe sahiptir (Deliormanlı, 2014). Blok mermer üretiminin karlılığı öncelikle süreksizlik sisteminin üç boyutlu paterninden büyük ölçüde etkilenen üretilebilir mermer blok boyutuna bağlıdır. Doğaltaş ocakçılığı sırasında optimum blok boyutuna ulaşmak zorunlu hale gelmektedir; eklem ve kırık-çatlak miktarının, aralıklarını ve yönelimlerini de kapsayacak şekilde anlaşılmasını gerektirmektedir (Mosch, 2011).

3. MODEL ÇALIŞMA

Mermer ocaklarında ekonomik rekabetçi üretimi sağlayacak işletme modellerinin planlanması gerekmektedir. Model çalışmada; bu yaklaşıma uygun olarak mermer işletmelerinde üretim kapasitelerin artırılması durumunda birim üretim maliyetleri ile değişimin öngörülmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, aktif çalışan bir mermer ocağında ölçümler yapılarak modele uyarlanmıştır. Mermer ocağının blok verimi %10 düzeyinde olup basamak yükseklikleri 7 m'dir. Ana blok kesiminde yükseklik; 7 m, en; 2 m ve uzunluk; 15 m olmak üzere kesilen blok hacmi 210 m³'dür. Ana blok kesim işlemi elmas tel makinesi ile saatte 10 m² yüzey kesimi işlemi yapılırken ebatlama-sayalama makinası kesim hızı 4 m²/h'dir. Bu işletme parametrelerine göre mermer ocağı blok üretim kapasitesi saatte 8.08 m³ olmak üzere günlük bazda 193.84 m³/gün ve yıllık bazda 38760 m³ blok mermer kesimi ve 3876 m³ ticari blok üretimi gerçekleştirilmektedir. Mermer blok satış fiyatı ortalama olarak; 2024 yılı Türkiye mermer-traverten ham veya blok ihracat değerinin miktarına bölünmesiyle türetilen 194.45 \$/ton değeri alınmıştır.

Model çalışmada; mermer ocaklarında teknik parametrelerden blok verimi ve üretim kapasitesi değişkenlerine bağlı olarak sabit ve operasyonel(değişken) maliyetler hesaplamakta ve sonraki aşamada birim maliyete dönüştürülmektedir. Eğer birim maliyet değerleri satış fiyatı sabit değerini aşıyorsa döngüsel olarak üretim kapasitesi artışı ile daha ekonomik birim blok üretim maliyeti belirlenmeye çalışılmaktadır. Üretim kapasitesindeki iterasyonlar sayesinde satış fiyatından elde edilen gelirlerin toplam giderlere eşit olduğu başabaş kapasite değeri de öngörülebilmektedir. Çalışmada izlenen algoritma adımlarına ait akım şeması Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Mermer ocaklarında kapasiteye bağlı birim maliyet analiz modeli akım şeması

4. DEĞERLENDİRME & TARTIŞMA

Mermer ocaklarında temel maliyet unsurları üretime dayalı operasyonel ve sabit giderlerden oluşmaktadır. Operasyonel giderler akaryakıt, elektrik, elmas tel, lastik sarfiyat değerlerine bağlı olarak değişirken, sabit giderler ise makine ilkyatırımları ile altyapı yatırımlardan kaynaklı amortisman bedeli, devlet hakkı, ruhsat ve lisans bedellerinden oluşmaktadır. Sabit ve operasyonel giderlerin toplamından oluşan genel giderler yıllık bazda hesaplanmakta ve yıllık üretim kapasitesine bağlı olarak birim maliyete dönüştürülmektedir.

Mermer ocağının blok verimliliği %10 ve üretim kapasitesinin yıllık bazda 3876 m³ ticari blok üretimi esas alınarak yapılan çalışmaya göre mermer ocaklarında sabit maliyetlerin toplam maliyetler içindeki payının yaklaşık %40 düzeyini aştığı görülürken operasyonel giderlerin ise %56 düzeyini aştığı

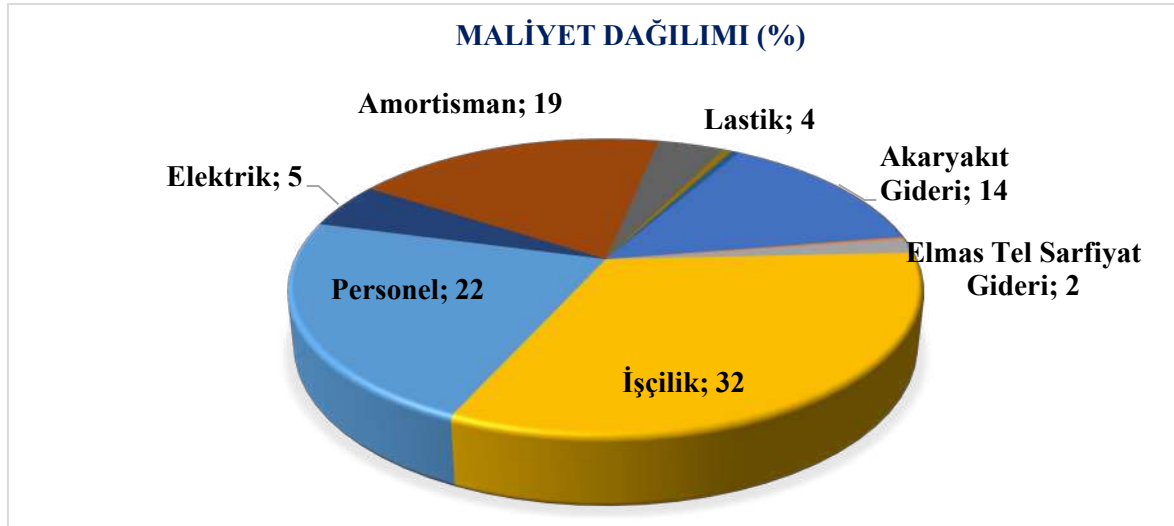
görülmektedir. Model verilerinden türetilmiş ve mermer işletmesi için öngörülen yıllık bazda ve birim m³ bazında maliyet değerleri Çizelge 2’de verilmektedir.

Çizelge 2. Mermer işletmesi maliyet ve dağılım değerleri

GİDERLER	Yıllık (\$)	Birim maliyet (\$/m ³)	Dağılım (%)
Akaryakıt	138,720	35,8	13,89
Elektrik	49,459	12,8	4,95
Elmas tel	15,402	4,0	1,54
Lastik	40,000	10,3	4,00
İşçilik	320,000	82,5	32,05
Teknik + personel	220,000	56,7	22,03
Amortisman bedeli	187,605	48,4	18,79
Devlet hakkı + ruhsat bedeli	24,393	2,7	2,44
Diğer	2,785	0,74	0,31
Toplam	998,365	257,51	100,00

Model mermer ocağı için öngörülen blok üretim maliyetlerinin temel bileşenler;

1. İşgücü maliyetlerinin yaklaşık %32 düzeyinde,
2. Mühendis ve teknik personel maliyetleri yaklaşık %22 düzeyinde,
3. Makine-ekipman yatırımlarından kaynaklı amortismanların yaklaşık %19,
4. Akaryakıt giderinin yaklaşık %14 düzeyinde olduğu görülmektedir (Grafik 2).



Şekil 2. Mermer işletme için öngörülen maliyet dağılımı

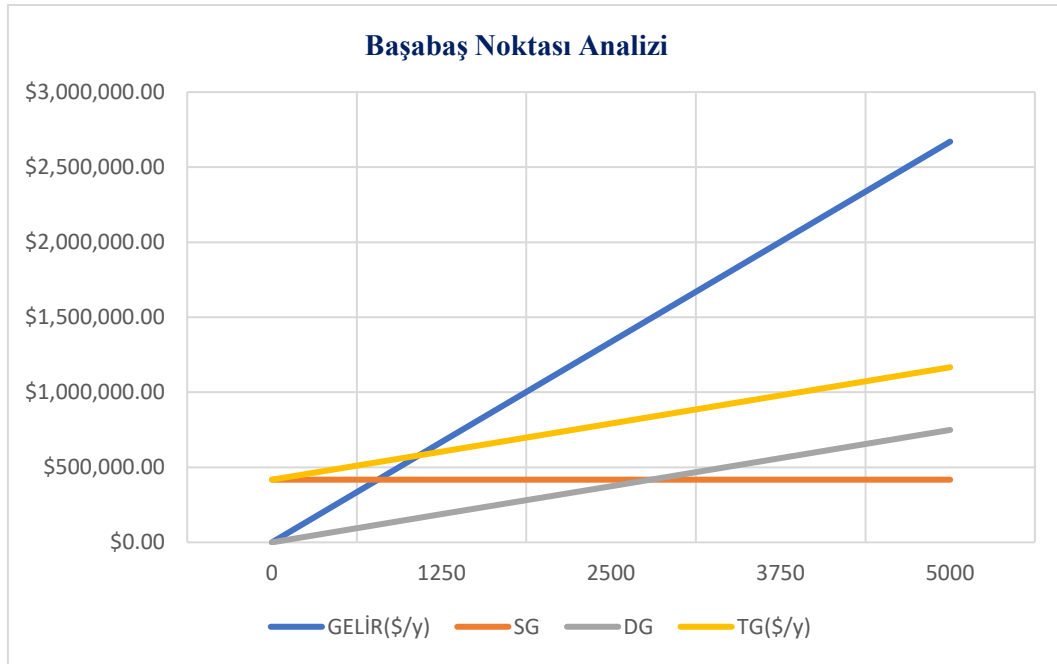
Mermer işletmelerinde sabit maliyetlerin özellikle yatırımlara dayalı amortisman, faiz, devlet hakkı, ruhsat, orman bedeli ile diğer lisans işlemlerinin toplam giderleri baskılamakta olduğu ve genel gider içinde yüksek olduğu görülmektedir. Buna yönelik sağlanacak üretim kapasitesindeki artışlarla sabit maliyetlerin, toplam üretim maliyetleri üzerindeki etkisi azaltılarak birim blok üretim maliyetleri düşürülebilir. Maliyetler kapasite ile doğru orantılı olarak artarken, birim maliyet değeri ise yıllık toplam maliyetin kapasite ile değişimine bağlı olarak genellikle düşme eğilimi göstermektedir. İşletme toplam

maliyetlerinin gelir ile eşitlendiği nokta işletme için karlılığı ve zararın sıfır olduğu başabaş noktası kapasitesidir. Başabaş kapasitesinde gelirin gidere oranı 1'dir ve bu değerinin üstünde çalışılması gerektiği ve mermer işletmelerinin bu kapasiteyi aşacak planlamalar yapması önerilmektedir. Blok verimi %10 olan bir mermer ocağı için Başabaş noktası analizi Çizelge 3'te verilmektedir.

Çizelge 3. Kapasiteye bağlı gelir/gider analizi

ÜRETİM (m ³ /yıl)	Gelir (\$)	Gider (\$)	Gelir/Gider Oranı
0	0.00	417,838.85	0
1000	534,000.00	567,404.17	0,94
1086,945	580,428.40	580,428.40	1
1250	667,500.00	604,853.97	1,10
2500	1,335,000.00	792,102.93	1,68
3750	2,002,500.00	979,351.90	2,04
5000	2,670,000.00	1,166,600.87	2,28
10000	5,340,000.00	1,915,596.73	2,78

Blok verimi %10 için başabaş noktası kapasitesi 1086,95 m³/yıl düzeyindedir ve bu kapasitenin üstünde bir faaliyetin rantabl olması olasıdır. En yüksek gelir ve rantabilite değeri kapasitenin yüksek olduğu düzeylerde oluşmaktadır. Blok verimi %10 olan bir mermer ocağı için kapasiteye bağlı gelir-gider analizi grafiği Şekil 3' de verilmektedir. Grafikte sabit maliyetler (SG), değişken maliyetler (DG) ve toplam maliyetler (TG) olarak ifade edilmektedir. Grafikte gelir (GELR) ile toplam maliyet (TG) eğrisinin kesişim noktasından dikey inilerek yatay eksendeki kapasite değeri "başabaş noktası" değerini ve başka bir ifadeyle işletme için karlılığın ve zararın olmadığı başabaş kapasitesini vermektedir.



Şekil 3. Kapasite değişimi ve gider-gelir analizi

Yapılan model ve analiz sonuçlarına göre;

1. Blok verimi %10 için başabaş noktası kapasitesi 1086,95 m³/yıl, birim üretim maliyeti 257,51 \$/m³ ve ton başı birim üretim maliyeti 93,6 \$/ton düzeyinde belirlenmiştir.
2. Blok veriminin yükselmesi durumunda örneğin %12 blok verimi için başabaş noktası kapasitesi 1022 m³/yıl düzeyine düşmektedir. Ayrıca mermer blok birim üretim maliyetinin 215 \$/m³ düzeyine düşmesi öngörülmektedir.
3. Blok veriminin düşmesi durumunda ise örneğin %8 için başabaş noktası kapasitesi artarak 1200 m³/yıl seviyesine yükselmesi öngörülmektedir. Bununla birlikte; mermer blok birim üretim maliyetinin de yükselerek 320 \$/m³ düzeyine ulaşması öngörülmektedir.

Mermer işletmeciliğinde işletmelerin giderlerini etkileyen temel parametrelerden blok veriminin rantabiliteye etkisi oldukça fazladır. Genellikle mermer ocaklarında düşük blok verimlerinde çalışılması; ekonomik açıdan oldukça riskli ve gelirin gideri karşılama oranı oldukça düşüktür. Ayrıca, mermer ocaklarında düşük kapasiteli blok üretimlerinin giderek artan maliyetlere bağlı olarak düşük blok verimliliklerinde çalışması durumunda rasyonel ve karlı üretimin gerçekleşmesi olası görülmemektedir.

Mermer işletmelerinde üretim kapasitesi ve blok veriminin yüksek olduğu opsiyonlarda en yüksek gelir/gider oranı değerine ulaşılması öngörülmektedir. Örneğin %10 blok veriminde Q: 10000 m³/yıl üretim kapasitesine ulaşılması durumunda gelirlerin giderlere oranı yaklaşık 2,8 düzeyine ulaşmaktadır.

Mermer ocaklarında blok verimlerinin düşmesi başabaş noktası kapasitesinin de yükselmesiyle neticelenmektedir. Bu nedenle; mermer işletmelerinde düşük blok verimlerinde çalışılması; yüksek birim üretim maliyetleri ve buna bağlı olarak düşen rantabilite ile sonuçlandığı için rasyonel ve ekonomik görünmemektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya mermer sektöründe kazanılan ticaret hacmi, rekabet gücü ve elde edilen büyümenin sürdürülebilir olması, üretim ve istihdamı arttırmanın küresel piyasalarda rekabet edebilmenin yolu ekonomik rekabetçi işletmelerden geçmektedir. Bu yönüyle, başabaş kapasitesi üzerinde üretim planlaması yapıp gerçekleştiren işletmelerde sağlanacak çözüm yaklaşımlarıyla verimlilik ve maliyetlerde önemli ölçüde ekonomik iyileştirmeler sağlanabilir. Böylelikle, mermer işletmelerinin daha ekonomik çalışması sağlanarak ülke mermer rezervlerinden daha yüksek rasyonel ve ekonomik fayda sağlanabilmesi olasıdır. Yapılan model çalışma ve analizlerden; tektonik koşul ve süreksizliklerden oldukça yoğun etkilenen mermer işletmeleri için blok verimliliğinin arttırılması zor olduğu için işletme kapasitelerinin yükseltilmesi gerektiği önerilmektedir.

Böylelikle mermer ocaklarında üretim kapasitesi artışının işletmenin karlılık ve rantabilite düzeyini arttırdığı görülmektedir. Mermer ocaklarında düşük blok verimliliklerinde ve üretim kapasitelerinin arttırılmadan çalışmalara devam edilmesi durumunda; zamanla artan işletme maliyetlerinin ekonomik olarak sürdürülebilmesi olası görülmemektedir. Bu nedenle; özellikle blok verimi düşük mermer ocaklarında üretim kapasitelerinin yükseltilmesi rasyonel ve kaçınılmaz görünmektedir.

KAYNAKLAR

Altınççek, A. (2006). Mermer Ocağı Açımında temel alınacak bölgesel ve yersel kriterler. MERSEM 2001, Türkiye 3. Mermer Sempozyumu (s. 235-247).

Doğaltaşlar Sektör Raporu. (2021). Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, İhracat Genel Müdürlüğü, Maden, Metal ve Orman Ürünleri Dairesi. <https://ticaret.gov.tr/data/SektörRaporu2021>

Deliormanli, H. A., Maerz, N. H., Otoo, J. (2014). Using terrestrial 3D laser scanning and optical methods to determine orientations of discontinuities at a granite quarry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 66, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.12.007>

Ersoy, M., Aşıkoğlu, R. (2006). Mermer Ocaklarında Blok Üretim Maliyetine Etki Eden Faktörler ve Blok birim maliyetinin hesaplanması. *MERSEM 2006, Türkiye 5. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu* (s. 95-101).

Ersoy, M., Yüksel, Z. (2011). İscehisar Aktaşören Mevkii Mermer Ocağında Kesme Düzlemi Süreksizliklerinin Elmas Tel Kesme Verimliliğine etkisinin araştırılması. *Madencilik*, 50(2), 3-18.

İMİB. (2024). 2023 Yılı Maden Sektörü Görünümü Raporu. İstanbul Maden İhracatçıları Birliği. <https://imib.org.tr/veri-merkezi/ihracat-istatistikleri/>

Kahraman, B., Köse, H. (2014). Maden İşletme Ekonomisi (4. Baskı). DEÜ Mühendislik Fakültesi yayınları No:223.

Kekec, B., Bilim, N., Ghiloufi, D. (2018). A Review on the Evolution of the Turkey Mining Sector. *Academic Perspectives Procedia*, 1, 1146–1156.

Mallı, T. (2017). Mermer Ocağı İşletme Planlamasında Üretim Kapasitesinin Birim Maliyete Etkisinin Araştırılması. *MERSEM, Türkiye 9. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi* (s. 37-44). Antalya.

MAPEG. (2024). Maden İstatistikleri, Maden Üretim Değerleri. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. <https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik>

Mosch, S., Nikolayew, D., Ewiak, O., Siegesmund, S. (2011). Optimized extraction of dimension stone blocks. *Environmental Earth Sciences*, 63, 1911–1924.

Onargan, T., Köse, H., Deliormanlı, A. H. (2005). Mermer. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları No: 95.

Özçelik, Y., Polat, E., Bayram, F., Ay, A. M. (2004). Investigation of the effects of textural properties on marble cutting with diamond wire. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 228–234.

Özçelik, M. (2023). Environmental effect of marble quarry operation in Burdur Lake Basin (Burdur Turkey). *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 10(3), 4517-4525. <https://doi.org/10.15243>

Şengün, N., Bilgin, İ. (2022). Mermer Ocak İşletmeciliğinde Yastıklama Uygulamasının Üretim Verimine Etkisinin Araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(1), 132-140.

CAPTURING ANISOTROPY IN MARBLE QUALITY ESTIMATION THROUGH ORIENTATION-AWARE NEURAL NETWORKS

I. Kapageridis ^{1*}, A. Patra ¹, C. Albanopoulos ², F. Pavloudakis ¹

¹ *Laboratory of Mining Informatics and Machine Learning Applications, Department of Mineral Resources Engineering, University of Western Macedonia, Koila, Kozani, Greece*

**Corresponding author: ikapageridis@uowm.gr*

² *Iktinos Hellas SA*

ABSTRACT

Accurate estimation of marble quality is essential for optimising quarry planning, product quantities forecasting, and economic evaluation. In anisotropic ornamental stones (including marble), visible attributes such as veining, colour banding, and texture vary significantly with cutting direction, making orientation a critical factor in both sampling and extraction. Drillhole sampling is performed in multiple directions in 3D space, and the apparent marble quality of each sample is inherently influenced by its orientation relative to these features. Incorporating sample and block orientation parameters (azimuth and dip), into the marble quality estimation process provides the model with essential context that reflects both the extraction geometry and the sampling geometry. In this study, we developed an orientation-aware machine learning framework for marble product percentage prediction using neural networks. The model inputs included block or sample centroid coordinates (X, Y, Z), trigonometric transformations of azimuth and dip to represent orientation, and trigonometric transformations of Random Fourier Features, while the outputs were proportional distributions of marble product categories. The network was trained on drillhole composite data and applied to a block model for spatial prediction. Model interpretability analysis using permutation feature importance demonstrated that orientation-derived inputs were among the most influential predictors, surpassing spatial coordinates in importance. This confirms that including orientation information allows the model to capture anisotropic quality patterns that would be missed in location-only models, thereby improving prediction accuracy and practical relevance for production planning. A case study from a marble quarry in NE Greece demonstrated the benefits of this approach.

Keywords: marble resources estimation, anisotropy, neural networks, Random Fourier Features, permutation feature importance

INTRODUCTION

Marble quarry resource estimation is typically based on exploration, either through the judgment of experienced personnel or by applying machine learning (ML) techniques to assess two key aspects: the aesthetic attributes that determine the marketability of marble products from a specific quarry, and the density of natural joints and fractures that control the proportion of recoverable blocks (slabs). Depending on the actual marble products produced by a quarry and the market requirements, some general categories are commonly used, such as A, AB, B, C, and waste. These general categories or classifications reflect marble mass visual and structural parameters, which can also differ from one quarry to another. Because drill core surface area is minimal compared to that of quarry slabs, it is often difficult to evaluate core samples objectively and consistently in terms of the defined aesthetic parameters. Moreover, drilling campaigns in marble quarries are usually irregular in terms of spatial density and drillhole orientation, since drilling is dictated by extraction progress and the need to uncover

high-quality marble. These factors make the application of conventional geostatistical methods to marble resource estimation particularly challenging.

Previous estimation efforts of marble and other natural stone deposits are reported by Forlani and Pinto (2000), who applied photogrammetry and 3D modelling techniques to quantify block volumes in quarry settings; by Careddu et al. (2010), who developed a GIS-based approach to evaluate ornamental stone resources at the regional scale; by Abdollahisharif et al. (2012), who introduced stochastic simulation methods for assessing block size distribution and recovery ratios in dimension stone quarries; by Exadaktylos and Saratis (2020), who proposed a geostatistical framework integrating structural and quality indicators to improve the reliability of marble reserve estimation, and by Kapageridis et al. (2018), who developed a resource estimation system based on quality indicators and geostatistics.

The application of machine learning in marble and ornamental stone resource estimation holds significant promise by enabling objective, reproducible classification of aesthetic and structural properties that are traditionally evaluated subjectively. ML models trained on texture descriptors and imagery can effectively distinguish quality categories and infer classification on new samples, improving both consistency and scalability. Previous studies have demonstrated the potential of machine learning for ornamental stone characterisation, classification, and resource estimation. For example, López et al. (2010) developed a granite slab classification technique using neural networks and support vector machines, while Canayaz and Uludağ (2020) utilised convolutional neural networks on a 28-class marble dataset, achieving up to 97% accuracy. Kamath et al. (2025) demonstrate that neural fields combined with random Fourier feature encoding and derivative-based constraints can improve geological modelling by capturing high-frequency details, reducing topological artefacts, and enabling uncertainty quantification.

Study Area and Data

The marble deposit examined in this study is located in the Volakas area, near the city of Drama, and is operated by Iktinos Hellas S.A. Volakas hosts several major marble quarries, each producing distinct qualities of marble. Geologically, the area is characterised by metamorphic formations and marble horizons (metamorphic limestones) embedded within a gneissic framework. The wider region predominantly features horizons and outcrops of white, microcrystalline dolomitic marbles, which in certain locations are quarried, interbedded with grey, mesocrystalline calcitic marbles. The open-pit quarry operated between elevations of 1,110 m and 1,260 m, while the underground workings extend below 1,090 m. Quarrying activity in the area is intensive, with six other marble quarries in proximity and an additional three within the broader Volakas region.

Methodology

The main modelling workflow was implemented as a Python script running inside Maptek Vulcan, combining Maptek's proprietary Python libraries with widely used open-source machine learning and data processing packages. TensorFlow served as the primary deep learning framework, enabling efficient tensor operations and execution backends optimised for both CPU and GPU. Its high-level API, Keras, provided a user-friendly interface for building, training, and deploying neural networks in a concise and modular manner, supporting layers such as Dense for fully connected computations, BatchNormalization for activation standardisation, and Dropout for regularisation. Model training employed Keras utilities for early stopping, learning rate scheduling, and checkpointing. Scikit-learn contributed preprocessing tools, including the StandardScaler for feature standardisation and train-test splitting functions for reproducible data partitions. NumPy facilitated numerical array manipulation for efficient in-memory dataset handling, while Pandas supported data ingestion, cleaning, and tabular representation of input features and model predictions. For interpretability, an additional Python script

was developed to perform permutation feature importance analysis. Drillhole samples processing, block modelling, visualisation, and analysis were carried out in Maptek Vulcan.

Data Preprocessing

The provided dataset consists of 150 surface and underground exploration drillholes (vertical and horizontal) giving a total of 1,477 1m samples. The parametrisation of marble samples and their classification into quality categories is carried out by experienced personnel. In the studied deposit, the company's classification system relies on the following parameters (Figure 1): lithology (dolomitic or calcitic), type (flower-like or diagonal veining), background (presence of visible defects), and tectonic features (number of discontinuities per metre of drill core, associated with prominent groups). Depending on sample characterisation as to the above parameters and by applying conditions for product definition (specific to this deposit), each sample receives a product code (A, AB, B). Samples not satisfying product conditions are classified as WASTE. Compositing drillhole 1m samples to 6m length follows to bring them closer to the dimensions of the blocks to be estimated, and for calculating sample centroid coordinates required for correct locating of samples in 3D space for spatial analysis and estimation. The original drillhole orientation values (azimuth and dip) are also stored in the composites database against each 6m composite. A regular block model consisting of 812,784 blocks and appropriate variables was also generated to host the neural network predictions and provide centroid X, Y, Z coordinates and block orientations.



Figure 1: Examples of Volakas marble type and background categories.

Feature Engineering

The feature preparation process begins with the raw spatial and orientation data of each marble composite sample. The three-dimensional coordinates (X, Y, Z) are taken directly, while azimuth and dip angles are carefully transformed into continuous features that a neural network can interpret. Azimuth values are wrapped to the $[0, 360)$ range and converted into sine and cosine pairs, which ensures the circular nature of direction is preserved. Dip values are clipped between -90° and $+90^\circ$, shifted to the $[0, 180]$ range, and likewise expressed as sine and cosine. To further enrich these features, Random Fourier Features (RFF) are used to capture spatial patterns at multiple scales. RFFs are a way to approximate a kernel function (often a Gaussian/Radial Basis Function kernel) by mapping the input into a higher-dimensional space using sinusoidal functions (Rahimi and Recht, 2007). The key parameter that controls the “scale” of these sinusoidal components is the σ (sigma) value. In the Gaussian kernel, σ corresponds to the length scale: how quickly similarity between two points decays as their distance increases.

1. **Small σ** (e.g., 0.2): corresponds to high-frequency components. These capture fine-scale, local variations in the data (sensitive to small spatial changes).
2. **Large σ** (e.g., 4.0): corresponds to low-frequency components. These capture broad, global trends and smooth variations across the deposit.

3. By using a mixture of σ values, the network receives a multi-scale “basis set” of sinusoidal features, so it can model both fine details and coarse structures.

First, a characteristic length scale is estimated from the sample coordinates, based on the median distance to the second nearest neighbour, which prevents the RFF from encoding excessively fine details. Then, the normalised coordinates are projected through a random matrix with columns tuned to different frequency bands, defined by a set of sigmas (e.g., 0.2, 0.8, 4.0). A random phase is added, and both sine and cosine of the transformed values are taken, doubling the number of features generated. In this application, a total of 48 random projections is generated, and for each one, two features are calculated (sine and cosine), leading to 96 RFFs, and a total of 103, combined with the 7 coordinates and orientation features discussed before. These RFFs effectively act as randomised sinusoidal filters that allow the model to approximate complex spatial correlations without explicitly constructing variograms. The result is a high-dimensional feature set — combining the base spatial/orientation descriptors with dozens of sinusoidal components — that gives the network a rich representation of local marble quality patterns.

Neural Network Architecture

Before data even enters the network, all engineered features (coordinates, orientation encodings, and Random Fourier Features) are standardised using StandardScaler, which rescales each column to have zero mean and unit variance based on the training set. This step is crucial because the raw features operate on very different numerical ranges — spatial coordinates may be in the order of hundreds of meters, while sine/cosine values lie between -1 and 1 , and RFF oscillations vary by construction. By applying this global standardisation, the model avoids scale imbalances that could otherwise bias learning and slow convergence. The scaled features are then passed to the neural network, ensuring a consistent input domain across all predictors. The network itself is a multilayer perceptron (MLP) designed for probabilistic prediction of product proportions (Figure 2). Its input layer accepts the standardised feature vector and immediately applies a BatchNormalization transformation, which stabilises the forward pass by normalising activations batch by batch and introducing trainable shift and scale parameters. This is followed by a stack of fully connected hidden layers (three layers of 256 neurons each), where each Dense layer uses a ReLU activation to capture nonlinear interactions among features. After each dense transformation, another BatchNormalization is applied, and an optional Dropout layer is included for regularisation or Monte Carlo Dropout uncertainty estimation at prediction time. The final stage is a dense output layer with as many units as there are target product categories (four in our example), using a softmax activation to produce a probability distribution over the products.

Neural Network Development

Training begins once the standardised feature matrix and normalised product proportions are prepared. The dataset is split into three parts: a training set, a validation set, and a test set. The test set (15% of the data) is held back entirely until final evaluation, while the remaining samples are used for training and validation. Within the training portion, a further fraction (20%) is reserved for validation, which monitors how well the model generalises to unseen data during training. This validation set plays a critical role in guiding early stopping and learning rate adjustments. The targets are treated as probability distributions, since each row represents the proportions of products summing to one. The model is trained to minimise Kullback–Leibler divergence (KL-divergence), which measures the difference between the predicted probability distribution and the true normalised product proportions:

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{i=1}^C P(i) \log \log \frac{P(i)}{Q(i)} \quad (1)$$

where:

1. $P(i)$ is the true probability of class i (in our case, the normalised proportion of product i in a sample),
2. $Q(i)$ is the predicted probability of class i output by the network (from the softmax layer),
3. C is the number of product categories (in our case, 4), and
4. the logarithm is natural log (base e).

This choice of loss function ensures that the model learns not just absolute values but the correct distributional structure of outputs. Optimisation is handled by the Adam algorithm, an adaptive gradient descent method that efficiently adjusts learning rates for each parameter. Several callback mechanisms are used to stabilise and improve training: EarlyStopping halts training if validation loss does not improve for a set number of epochs, restoring the weights from the best-performing epoch; ModelCheckpoint saves that best model to disk for future inference; and ReduceLROnPlateau lowers the learning rate when progress plateaus, helping the optimiser escape shallow minima (Figure 3). Training proceeds in batches (128 samples at a time), and each full pass through the training data constitutes one epoch. A run is set to last up to 300 epochs, though early stopping usually shortens this.

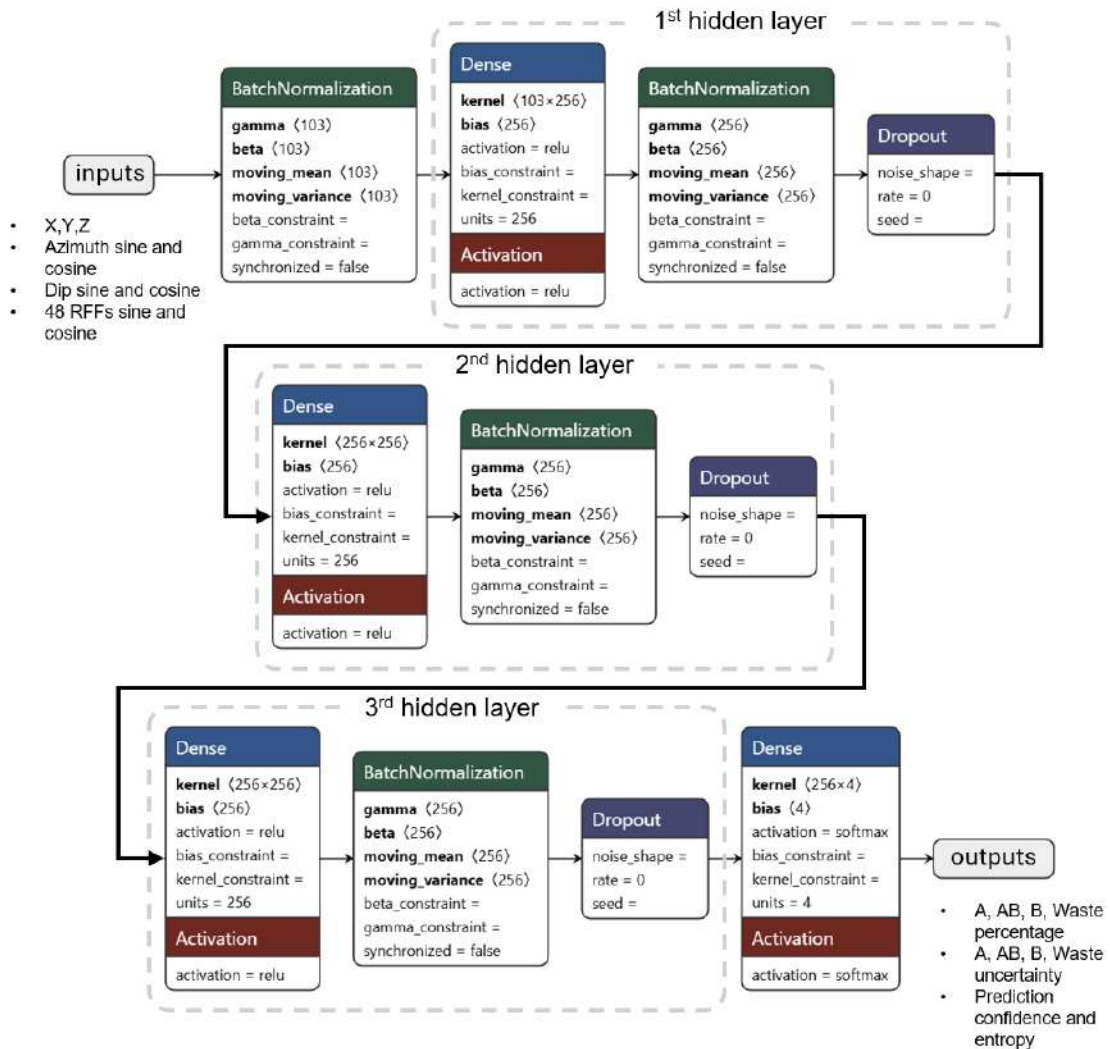


Figure 2: Simplified block diagram of the neural network architecture (visualised using netron.app).



Figure 3: Learning rate, training and validation loss (KL-divergence) during training.

Permutation Feature Importance Analysis

Permutation Feature Importance was applied to the trained marble quality estimation model to quantify the contribution of each input variable to predictive performance. The concept of permutation feature importance was introduced by Breiman (2001) and further formalised by Fisher et al. (2019). Gregorutti et al. (2017) discuss the effects of correlated predictors on permutation variable importance measures, particularly within a geospatial modelling context. In our example, after training the neural network on spatial coordinates (X, Y, Z), orientation-derived features (sin / cos of azimuth and dip), and RFFs, the model was first evaluated on a held-out test set to establish baseline metrics. Each input feature was then permuted in turn by randomly shuffling its values across the test samples, breaking its relationship with the targets while leaving all other inputs unchanged. The model was re-evaluated after each permutation, and the resulting increase in loss compared to the baseline was taken as the measure of that feature's importance. Features causing the largest degradation in performance were deemed most influential, while negligible or negative changes indicated low or no relevance. This analysis revealed that orientation features and some RFFs, had the highest importance scores, exceeding those of spatial coordinates, thereby confirming their significant role in capturing anisotropic quality patterns in the marble deposit (Table 1). Delta values show the average change in the evaluation metric (KL divergence, MSE, MAE, or R²) when the feature (or feature group) is permuted, i.e. how much worse the model performs when that feature's information is destroyed.

Table 1. Top feature groups based on permutation feature importance.

Feature Groups	Size	Delta	Delta_std
Orientation	4	0.0581	0.0040
RFF_pair_7	2	0.0392	0.0030
RFF_pair_14	2	0.0351	0.0006
RFF_pair_6	2	0.0351	0.0016
RFF_pair_3	2	0.0344	0.0016
RFF_pair_8	2	0.0341	0.0019
RFF_pair_4	2	0.0341	0.0023

RFF_pair_1	2	0.0332	0.0009
RFF_pair_20	2	0.0310	0.0024
RFF_pair_10	2	0.0306	0.0003
RFF_pair_28	2	0.0300	0.0018
XYZ	3	0.0297	0.0029

Uncertainty and Confidence Measures

Uncertainty and confidence are quantified using Monte Carlo (MC) Dropout, which repeatedly runs the trained neural network on the same block model inputs while keeping dropout layers active. This produces a distribution of predicted marble product percentages for each block instead of a single fixed value. From this distribution, a number of parameters are calculated including mean prediction – the average estimated percentage across all runs, used as the final predicted value, standard deviation per product – a measure of prediction spread, indicating how much the model’s outputs vary; higher values suggest greater uncertainty for that product in that block, predictive entropy – a single scalar that captures how “spread out” the average prediction is across all possible products; high entropy means the model is less certain about which product dominates, and confidence score – a normalised value between 0 (completely uncertain) and 1 (very confident), derived from entropy relative to the maximum possible uncertainty for the number of product classes. Figure 4 shows a section through the estimated block model coloured by the confidence score-bright patches are predictions the model trusts, while dark patches indicate zones of ambiguity where decisions should be treated cautiously and more samples might be necessary.

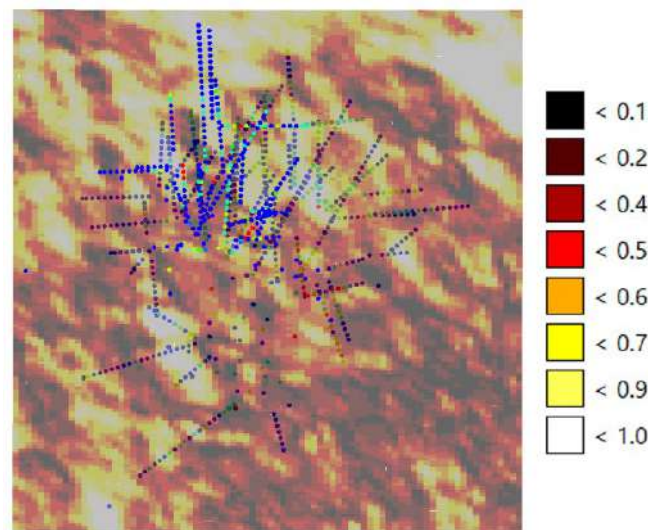


Figure 4: Block model section at 1160m elevation coloured by prediction confidence values – drillhole composite samples are also shown for reference.

RESULTS AND DISCUSSION

Running the main network development script took approximately 24.5s and 3m:25s to complete in training and predicting mode respectively, on an 8th generation core i7 CPU with 32Gb of RAM and an NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti with 4Gb of dedicated graphics memory. Figure 3 shows the training progress of the neural network, with training loss decreasing rapidly toward near-zero while validation loss stabilises after an initial drop and later shows a slight upward trend. The learning rate reductions,

triggered when validation loss plateaued, helped maintain training stability, with the best generalisation performance achieved in the early to middle epochs. Figure 5 illustrates horizontal and vertical sections of the block model with marble product percentages predicted by the orientation-aware MLP. Drillhole composites are shown for reference. The network not only reproduces the variability observed at the sampled locations but also extrapolates coherent spatial patterns into areas without direct data support. This behaviour highlights the capacity of the Random Fourier Feature encoding to capture multi-scale spatial variability and the ability of the neural network to generalise marble quality trends beyond the sampled volume. On the held-out test set, the network achieved R^2 values ranging from 0,35 to 0,68 across individual product categories. These accuracy levels are encouraging given the heterogeneous nature of marble, where geological variability and irregular sampling inherently limit predictability.

CONCLUSIONS

This work presented an orientation-aware neural network framework for predicting marble product percentages directly from drillhole data, integrating spatial coordinates with azimuth and dip to account for the directional dependence of marble quality. The use of Random Fourier Features enabled the network to represent complex spatial variability across multiple scales, while Monte Carlo dropout provided valuable uncertainty and confidence estimates for each block prediction. The combination of standardised inputs, a probabilistic loss, adaptive optimisation, and monitoring on a validation set allowed the network to converge efficiently and avoid overfitting, while providing a reliable estimate of its ability to generalise to spatial blocks of the marble deposit at unknown locations. The results indicate that the approach is effective in capturing both local detail and broader deposit-scale trends, demonstrating the suitability of deep learning for marble quality estimation. Future work should focus on refining the network architecture through adaptive feature scaling and automated hyperparameter optimisation, as well as testing the method on larger datasets and different quarry settings to further validate its robustness and generalisability.

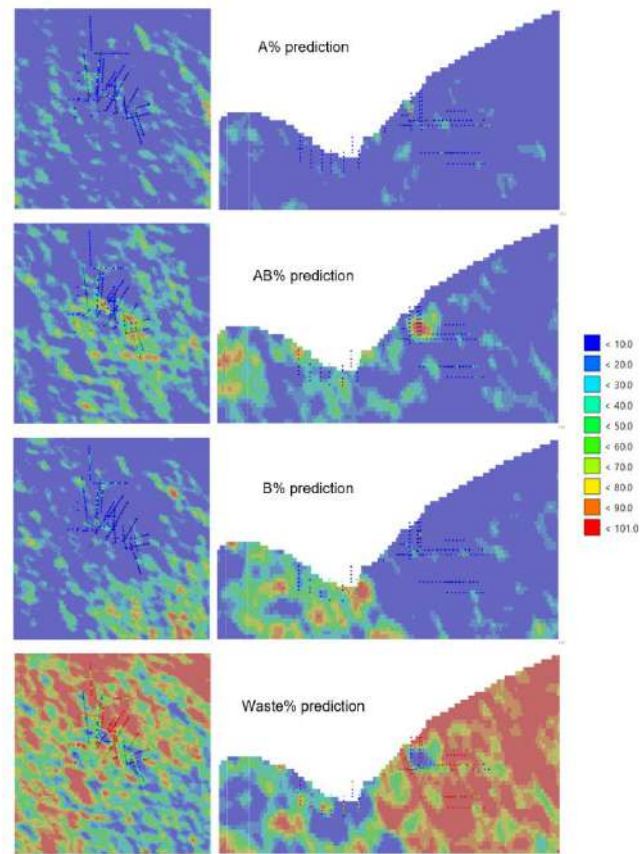


Figure 5: Block model sections at 1160m elevation (left) and 502,360m easting (right) coloured by marble product percentage predictions – composite samples within a 20m section width are also shown coloured by the same marble product percentage.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support of the University of Western Macedonia and funding of this research, and Iktinos Hellas SA for providing the data used in the study.

REFERENCES

- Abdollahisharif, J., Bakhtavar, E., Alipour, A., Mokhtarian, M. (2012). Geological Modeling and Short-term Production Planning of Dimension Stone Quarries Based on Market Demand. *Journal of Geological Society of India*, 80, 420-428.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Canayaz, M., Uludag, F. (2020). Marble Classification Using Deep Neural Networks. *European Journal of Technique*, 52-63. <https://doi.org/10.36222/ejt.671527>
- Careddu, N., Siotto, G., Tuveri, A. (2010). Evolution of a Marble Quarry: From Open Cast to Underground Exploitation. *Proceedings of Global Stone Congress 2010*. Alicante, Spain.

Exadaktylos, G., Saratsis, G. (2020). Methodology for the Estimation and Classification of White Marble Reserves. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37, 981–994. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00228-3>

Fisher, A., Rudin, C., Dominici, F. (2019). All Models are Wrong, but Many are Useful: Learning a Variable's Importance by Studying an Entire Class of Prediction Models Simultaneously. *Journal of Machine Learning Research*, 20(177), 1–81.

Forlani, G., Pinto, L. (2000). Monitoring Marble Extraction in Open Cast Quarries. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII(Part B4), 283-289. Amsterdam.

Gregorutti, B., Bertrand, M., Saint-Pierre, P. (2017). Correlation and variable importance in random forests. *Statistics and Computing*, 27, 10.1007/s11222-016-9646-1.

Kamath, A., Thiele, S., Gloaguen, R. (2025). (Auto) Differentiating geology: Geological modelling with random Fourier features and neural fields. EGU General Assembly 2025. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-9746>

Kapageridis, I., Albanopoulos, C. (2018). Resource and reserve estimation for a marble quarry using quality indicators. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118, 39-45.

López, M., Martínez, J., Matías, J. M., Taboada, J., Vilán, J. A. (2010). Functional classification of ornamental stone using machine learning techniques. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 234(4), 1338-1345. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2010.01.054>

Rahimi, A., Recht, B. (2007). Random Features for Large-Scale Kernel Machines. *Îçinde Advances in Neural Information Processing Systems*, 20.

2.Bölüm

HYBRID NUMERICAL MODELING OF ROCK INDENTATION: INSIGHTS FROM CERCHAR TEST SIMULATIONS

M.T. Hamzaban ^{1,*}, S. Balaie ¹

¹ *Mining Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran*

** Corresponding Author: hamzaban@sut.ac.ir*

ABSTRACT

Understanding rock-tool interaction mechanisms is critical for predicting tool wear and optimizing mechanical excavation processes. This study presents a hybrid numerical approach that combines the Discrete Element Method (DEM) and the Finite Difference Method (FDM) to simulate a Cerchar-type rock indentation test. The bonded-particle model (BPM) in PFC3D is used to represent granite and syenite rock types, while the steel indenter is modeled as a deformable continuum using FLAC3D. Calibration of microparameters was carried out based on experimental data, ensuring realistic replication of the mechanical behavior of both rocks. The coupled model allows evaluation of stress and deformation in both the rock and the steel tool, offering insight into elastic pin deformation and stress redistribution, particularly under high-resistance conditions. Results reveal asymmetrical fracture patterns induced by the granular heterogeneity of the rock. This study demonstrates the capability of coupled DEM-FDM models in realistically simulating rock indentation processes and contributes to the improved design and performance prediction of excavation tools in abrasive environments.

Keywords: Numerical modeling, Hybrid DEM-FDM model, Cerchar test, FLAC3D, PFC3D

INTRODUCTION

Mechanical rock cutting is essential in various applications within civil, mining, and petroleum engineering. Processes such as mechanized tunneling, blasthole drilling in both underground and open-pit mines, and exploratory or production drilling in oil fields all utilize specialized tools designed to penetrate and fracture rock materials. In addition to these applications, precise and controlled cutting is crucial for extracting and processing dimension stones used in construction. The effectiveness of rock cutting machinery is typically evaluated based on the cuttability and abrasivity characteristics of the rock. As tools wear down, changes in their geometry can lead to increased cutting forces (Martin and Fowell, 1997). Mechanized cutting primarily results in two modes of fragmentation: indentation and cutting (Fowell, 1993). These modes are differentiated by the orientation of the applied force; indentation involves forces that are perpendicular to the rock surface, while cutting applies forces tangentially (Zhu et al., 2016). In recent decades, indentation testing has also gained popularity as a method for investigating rock fracture behavior, coinciding with advancements in mechanical excavation technologies (Zhang and Zhang, 2019).

Due to the inherent complexity of rock-tool interactions during cutting processes, numerical modeling serves as an effective method to simplify analysis and explore the influence of various parameters. This study focuses on simulating a rock indentation process representative of the Cerchar Abrasivity Test, a widely used method for evaluating rock abrasiveness across several engineering applications. This test was selected because of its broad recognition, well-established mechanism, and the author's extensive prior research into the interaction between the steel pin and rock surface during the test (Hamzaban et al., 2019; Hamzaban et al., 2014a; Hamzaban et al., 2014b).

Among various numerical approaches, the Discrete Element Method (DEM) has emerged as a particularly suitable technique for modeling rock-tool interactions. One of the key advantages of DEM is its ability to naturally capture the progression of damage and fragmentation without the need for additional algorithms to track crack initiation and growth. This feature makes it especially appealing for applications such as rock cutting. Numerous DEM-based studies have investigated fracture mechanics and crack evolution in rock materials (D'Addetta et al., 2002; Huang, 1999; Kaitkay, 2002; Park, 2006; Rojek et al., 2011; Su and Akcin, 2011). Historically, most simulations of rock indentation have utilized two-dimensional models, such as PFC2D (Liu and Wang, 2018; Liu et al., 2018; Potyondy, 2017; Zhang et al., 2018; Zhu et al., 2017) and RFPA2D (Ma et al., 2011). While 2D models offer computational efficiency and allow for finer particle resolution, they often employ boundary conditions that oversimplify the actual three-dimensional nature of the problem. With advances in computational power, three-dimensional modeling has become increasingly feasible and is now more commonly applied to simulate rock cutting and indentation processes (Huang et al., 2024; Zhang and Zhang, 2019). In many of these studies, the cutting tool is represented as a rigid body, typically constructed from non-deformable walls. Although this approach successfully captures rock fragmentation and crack development, it does not provide insights into the stress and strain distributions within the tool itself. To address this limitation, hybrid modeling frameworks have been proposed. In these frameworks, the rock is modeled using DEM to simulate fracture behavior, while the cutting tool is represented as a deformable continuum utilizing the Finite Element Method (FEM) or the Finite Difference Method (FDM). This coupled strategy enables a simultaneous analysis of both rock fragmentation and the mechanical response of the tool material. In this study, a hybrid PFC3D-FLAC3D approach is employed to model the indentation of a steel pin into a rock surface.

APPLICATION OF BPMS IN ROCK FRAGMENTAION MODELING

Rock can be understood as a cemented granular composite made up of irregularly shaped particles, where both the individual grains and the cementing material can deform and fracture. This perspective forms the basis for modeling its complex mechanical behavior. The bonded-particle model (BPM) provides a numerical representation of this microstructure, effectively capturing a wide range of behaviors observed in natural rock. By simulating the mechanical interactions between bonded particles, the BPM serves two purposes: it acts as a scientific tool to study the underlying micromechanical processes and as an engineering model to predict the corresponding macroscopic responses. The BPM is implemented in both the two-dimensional and three-dimensional versions of the Particle Flow Code (PFC2D and PFC3D), which is based on the Discrete Element Method (DEM). This method was originally developed for simulating rock behavior (Cundall, 1971) and was later adapted to model soil mechanics (Cundall and Strack, 1979). DEM is part of a broader category of numerical techniques known as discrete-element methods, which are characterized by their ability to simulate the motion, including large displacements and rotations, of distinct interacting bodies (Cundall and Hart, 1993). These methods can accommodate the separation and recontact of elements during simulation, enabling realistic modeling of fracture and fragmentation processes.

CALIBRATION OF THE BPM PROPERTIES

The initial stage of any PFC simulation entails the calibration of contact model parameters to ensure that the simulated response aligns with the macroscopic mechanical properties of rock materials, as determined from laboratory tests or geotechnical investigations. In this study, two distinct rock types, granite and syenite, were evaluated through numerical simulations. Their key mechanical properties, namely uniaxial compressive strength (UCS_{lab}), elastic modulus (E_{lab}), and direct tensile strength (DTS_{lab}), obtained from experimental testing, are presented in Table 1. A total of 37 uniaxial compressive strength (UCS) tests and 15 Brazilian tensile strength (BTS) tests were conducted and averaged for the granite samples, while 53 UCS tests and 18 BTS tests were performed and averaged for the syenite samples. The BTS values were subsequently converted to direct tensile strength (DTS) values

using empirically derived correlation equations (Packulak *et al.*, 2024). To model inter-particle behavior, the Flat-Joint Contact Model (ITASCA, 2018) was adopted. This model has demonstrated superior performance over the widely used Parallel Bond Model in reproducing the mechanical response of rock materials. A known limitation of the conventional Parallel Bond Model is its inability to replicate realistic compressive-to-tensile strength ratios (σ_c/σ_t), which typically range from 3 to 7 (Potyondy and Cundall, 2004), significantly lower than the values observed in natural rocks (commonly between 10 and 30). The Flat-Joint Model addresses this limitation by enhancing the contact representation. It enables partial degradation of the bonded interface and incorporates a more realistic internal friction behavior, thereby achieving higher σ_c/σ_t ratios and more accurately capturing the mechanical behavior of intact rock (Zhang and Zhang, 2019).

Table 1. Summary of numerically simulated results compared to laboratory measurements for two different rock samples. The values in parentheses indicate the standard deviation of the corresponding experimental data

Parameter	Granite	Syenite
UCS_{lab} (MPa)	108.51 (34.6)	28.22 (13.7)
UCS_{cal} (MPa)	110.68	28.99
UCS_{error} (%)	2.00	2.74
E_{lab} (GPa)	24.62 (5.4)	13.62 (6.2)
E_{cal} (GPa)	23.84	13.31
E_{error} (%)	3.18	2.24
DTS_{lab} (MPa)	6.56 (2.7)	4.18 (1.8)
DTS_{cal} (MPa)	6.77	4.22
DTS_{error} (%)	3.13	0.97
E^* ($emod$) (GPa)	17.65	9.80
σ_t (ff_ten) (MPa)	5.70	3.43
c (ff_coh) (MPa)	47.15	10.33

To calibrate the Flat-Joint contact model parameters against the macroscopic mechanical behavior of rock materials, standard laboratory tests were replicated using PFC3D. The simulated results were then compared with corresponding experimental data. For a given microstructure, defined by grain size, shape, and spatial distribution, along with a specified surface gap, both Uniaxial Compressive Strength (UCS) and Direct Tensile Strength (DTS) tests were performed within the PFC3D environment (Figure 1). Through this procedure, suitable values for key microparameters, including the intergranular effective modulus (E^* or $emod$), tensile strength (σ_t or ff_ten), and cohesion (c or ff_coh), were identified for the two studied rock types. Table 1 presents the calibrated Flat-Joint contact model parameters along with the corresponding macroscopic responses, namely, Young's modulus (E_{cal}), Uniaxial Compressive Strength (UCS_{cal}), and Direct Tensile Strength (DTS_{cal}), obtained from the calibrated models. As indicated by the low relative error values reported in Table 1, the simulated rock specimens demonstrated good agreement with laboratory results, effectively capturing the mechanical behavior observed in physical tests. Figure 2 presents the stress-strain curves obtained from the numerical simulations for both rock specimens. As illustrated, the curves distinctly reflect the differing mechanical behaviors of the stronger (granite) and weaker (syenite) materials, highlighting variations in stiffness, strength, and failure response.

THE SIMULATION OF CERCHAR INDENTATION TEST

The Cerchar Abrasion Test and its corresponding Cerchar Abrasion Index (CAI) are among the most widely recognized methods for evaluating rock abrasiveness, with results extensively used to predict the performance of mechanical rock cutting systems (Alber *et al.*, 2015). Given the availability

of detailed data on rock-pin interaction during the test (Hamzaban et al., 2014a), the Cerchar test was selected as a suitable benchmark for evaluating the capability of coupled DEM-FDM numerical simulations to capture the interaction between cutting tools and rock materials. The Cerchar abrasion test procedure involves pressing a sharpened steel pin with a 90° conical tip against the rock surface under a constant normal load of 70 N. The pin is then drawn along a straight 10 mm path on the rock surface while maintaining the applied load. Following the test, the diameter of the wear flat formed on the pin tip is measured and reported as the Cerchar Abrasion Index (CAI) (Alber et al., 2015).

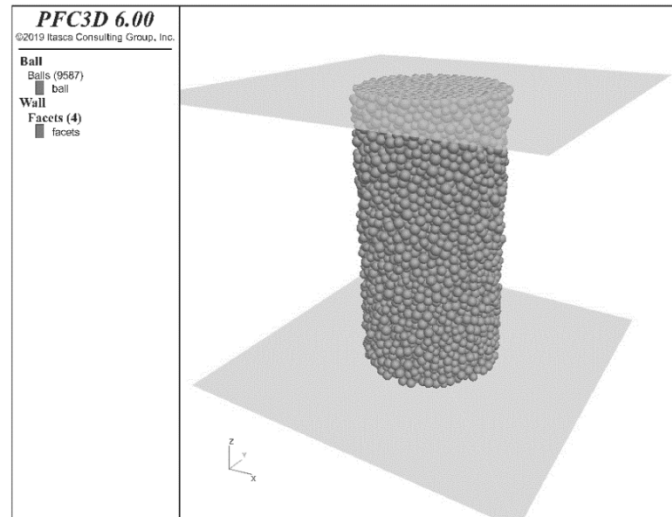


Figure 1. The cylindrical sample used for simulating *UCS* and *DTS* tests

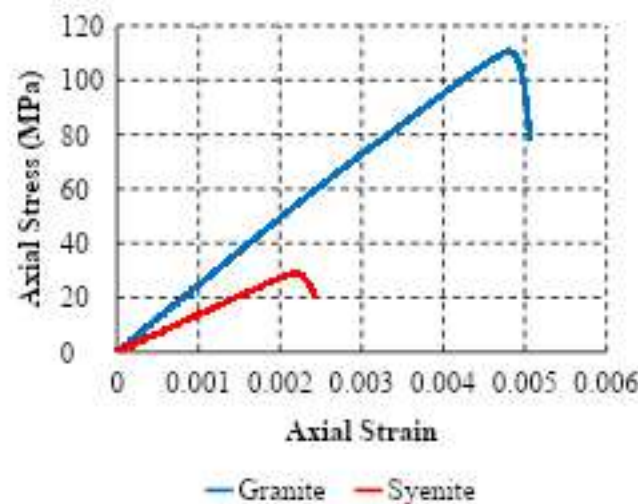


Figure 2. Stress–strain curves obtained from PFC3D numerical simulations for the granite and syenite samples, illustrating the contrasting mechanical responses of the two rock types

Due to the complexity of the full Cerchar testing procedure, the present study focuses exclusively on the initial phase, namely, the application of a 70-N normal load, referred to herein as the Cerchar indentation test. This test was performed on two rock types, granite and syenite, while complementary numerical simulations of the full scratching process are currently underway. A key distinction of this study compared to previous research lies in the modeling approach: earlier investigations commonly

treated the indenter as a rigid body and primarily concentrated on the fracture mechanisms within the rock. In contrast, the present work models the steel pin as an elastically deformable continuum, thereby enabling simultaneous analysis of both rock fracture development and the resulting stress and deformation within the pin itself. To achieve this, a hybrid modeling strategy was employed in which the steel indenter was represented using FLAC3D finite difference zones, while the rock material was simulated using the bonded-particle model (BPM) within the PFC3D framework. This integrated approach leverages the strengths of the finite difference method (FDM) for accurately capturing stress and strain distributions in continuum materials, alongside the discrete element method (DEM) for simulating crack initiation, propagation, and potential fragment detachment in the rock.

Figure 3 illustrates the overall configuration of the numerical model. As outlined previously, the steel pin was modeled using finite difference zones and treated as a linear elastic material with an elastic modulus of 200 GPa and a Poisson's ratio of 0.29 (Callister Jr and Rethwisch, 2020). The underlying rock medium was simulated using the bonded-particle model (BPM), where the contact parameters were calibrated to reflect the mechanical behavior of granite and syenite, as summarized in Table 1.

The penetration of the pin tip into the two different rock types of granite and syenite is illustrated in Figure 4. It is clear from the figure that in the granite the pin tip penetration into the rock surface (displacement in z direction) is about 0.172 mm. In contrast, the pin penetration into the weaker syenite surface is 2.34 mm, which is a more than 13.5 times of that of granite.

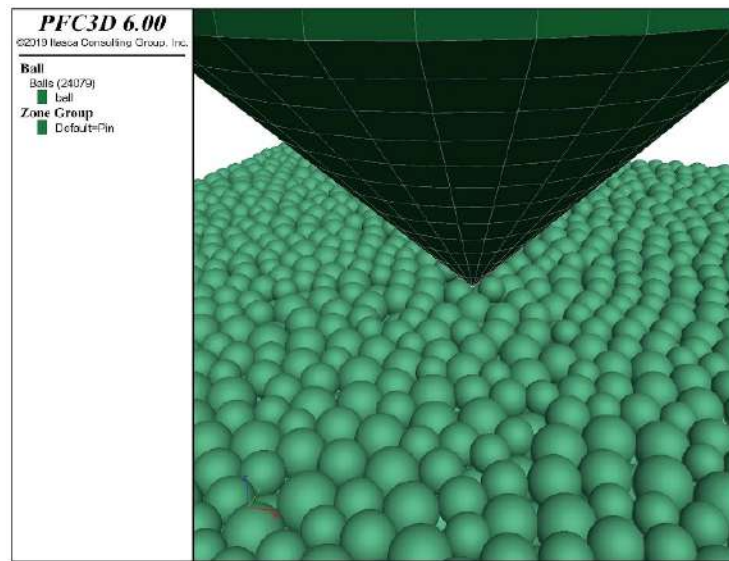


Figure 3. Overall configuration of the coupled FDM-DEM model used for simulating the Cerchar indentation test

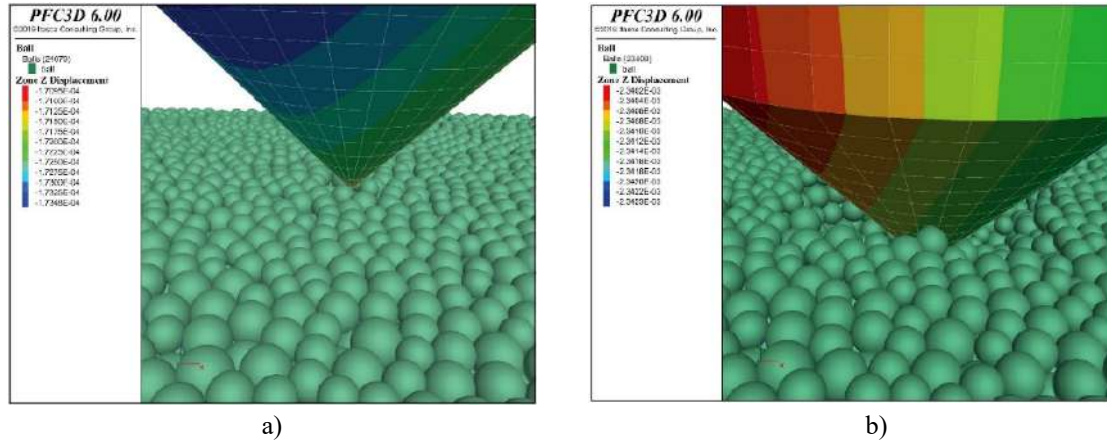


Figure 4. Penetration of the steel pin tip into the rock surface at the end of the 70 N normal loading simulation: (a) granite specimen and (b) syenite specimen

To better visualize the extent of damage on the rock surface, the vertical (z-direction) positions of particles are illustrated in Figure 5. The simulation code is designed to automatically remove any particles (balls) that become detached from the rock surface, thereby enabling realistic simulation of surface damage as the progressive formation of a cavity. As shown in the figure, the granite specimen exhibits minimal damage, indicated only by the development of microcracks (displayed as disks) within the bonded particle model (BPM) beneath the applied load of the steel pin. In contrast, the syenite specimen demonstrates a markedly different response, with the formation of a clearly visible cavity on the surface. The total computed volume of detached particles was 0.395 mm^3 for the granite specimen, increasing significantly to 35.3 mm^3 for the syenite specimen. The color gradient in Figure 5b represents the depth of this indentation, correlating to the z-position of the particles. While fracture disks are also present in the syenite specimen, they are intentionally hidden in Figure 5b to highlight the morphology of the damaged surface. In addition to the distinct responses of the two rock types under identical loading conditions, it is noteworthy that neither the fractures in the granite nor the cavity in the syenite exhibit perfect symmetry, despite the application of a symmetric load via the conical steel pin. This asymmetry arises from the heterogeneous nature of the BPM, in which particles vary in size and are randomly distributed, resulting in an inherently anisotropic mechanical response. Such asymmetrical damage is commonly observed in rock cutting processes, particularly when grooves with irregular flanks are formed.

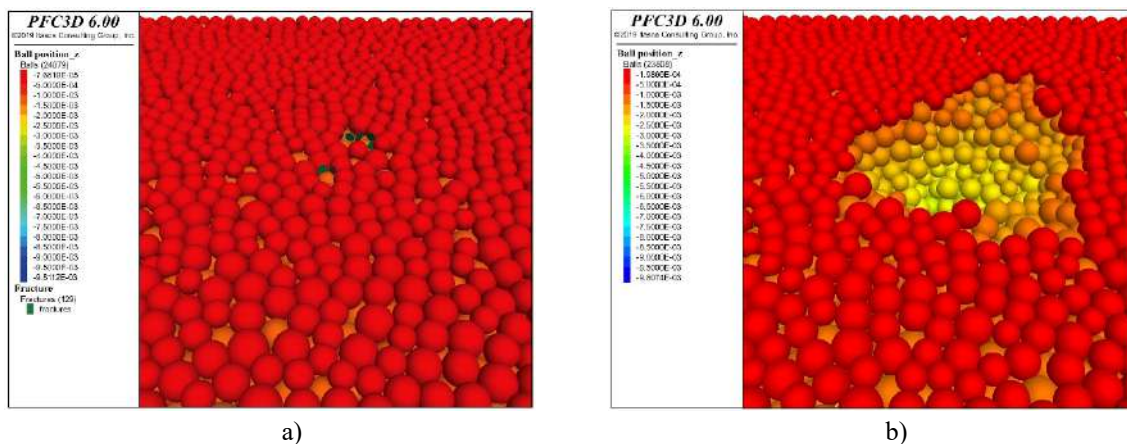


Figure 5. Surface damage observed on the rock specimens following the application of the 70 N normal load: (a) granite and (b) syenite

As previously noted, the primary objective of employing the hybrid DEM-FDM model is to evaluate the deformations, contact forces, and stress components developed in the cutting tool, represented here by the steel pin tip, during tool-rock interaction. Figure 6 presents the history of vertical (z-direction) displacements recorded at the pin tip (red line) and at the corresponding projection point located at the base of the conical section (blue line). A comparative analysis of the granite and syenite cases provides deeper insights into the interaction mechanisms between the pin and the rock material. The displacement magnitude indicates that the pin penetrates deeper into the syenite surface compared to the granite, as expected due to the lower strength of syenite. Additionally, the displacement curves exhibit distinct behaviors for the two rock types. In granite, the penetration follows a smooth, continuous curve that levels off at the end, suggesting progressive resistance to indentation. In contrast, the syenite shows a stepwise displacement pattern, attributed to the sequential detachment and ejection of particles (balls) beneath the pin during the indentation process. Another noteworthy observation is the relationship between the tip and base displacements. For syenite, the two curves overlap entirely, indicating that the conical pin moves uniformly, behaving essentially as a rigid body. However, in the granite case, a small divergence between the tip and base displacements emerges toward the end of the simulation. This separation signifies elastic deformation in the steel pin, as the cone tip and base exhibit slightly different vertical displacements. Interestingly, this differential deformation only becomes apparent after the pin is fully engaged with the harder granite surface, highlighting the role of rock stiffness in tool deformation.

To gain clearer insight into the deformation behavior of the steel pin tip, its deformed geometry is illustrated in Figure 7 from both top and side views. A magnification factor of 300 is applied in all plots to better visualize the deformed zones. As shown in Figure 7a, in the case of granite, significant distortion occurs at the pin tip, particularly at the contact interface with the rock surface, indicating a high concentration of stress. In contrast, for the syenite specimen, no substantial deformation is observed at the pin tip, which can be attributed to the lower resistance offered by the weaker rock material during penetration. However, the greater penetration depth into the syenite leads to contact between the side flanks of the pin and the rock, as also depicted in Figure 4b. Under this condition, the flanks of the pin contribute more significantly to load transfer into the rock, and some deformation is observed on these flanks, as illustrated in Figure 7b. It is important to note that the deformations shown in Figure 7 are elastic in nature and therefore do not directly correspond to real pin wear, which is primarily a result of plastic deformation. Nevertheless, the findings provide valuable insights into the capabilities of the hybrid numerical modeling approach in simulating the complex interaction between steel tools and rock materials.

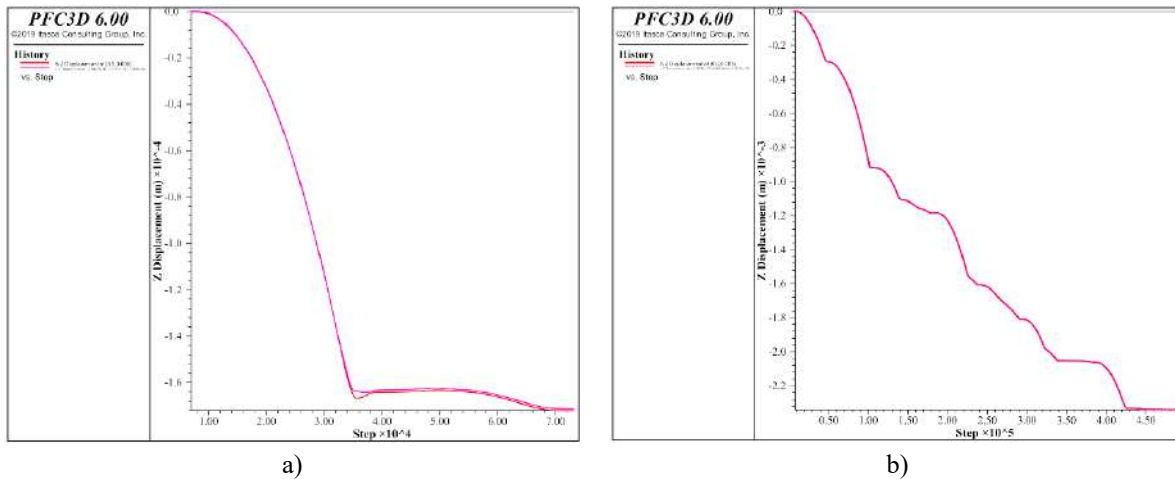


Figure 6. Histories of vertical (z-direction) displacements recorded at the pin tip (red line) and the base of the conical section (blue line) during the indentation process for (a) granite and (b) syenite specimens

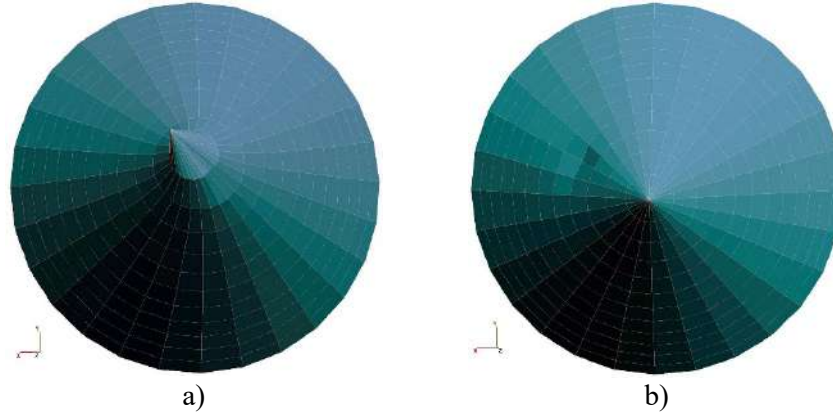


Figure 7. Deformed pin tips on (a) granite and (b) syenite

Figure 8 presents the contours of the vertical normal stress component (σ_z) on a vertical cross-sectional plane intersecting the steel pin tip. In the case of the granite specimen (Figure 8a), the stress level significantly intensifies at the pin tip, where the entire applied normal force is concentrated and transferred to the rock surface. Conversely, for the syenite specimen (Figure 8b), the highest stress does not occur at the tip but rather along the pin's side flank, where notable deformation is observed (Figure 7b). This stress redistribution corresponds with the deeper penetration of the pin into the weaker syenite, allowing the 70-N load to be distributed across a larger contact area, as also illustrated in Figure 4. A comparison between Figures 8a and 8b shows that the peak stress magnitude is higher in the granite case. This indicates that, under identical loading conditions, the pin experiences more severe stress concentration when interacting with the stronger granite, which could result in greater damage to the pin made of the same material.

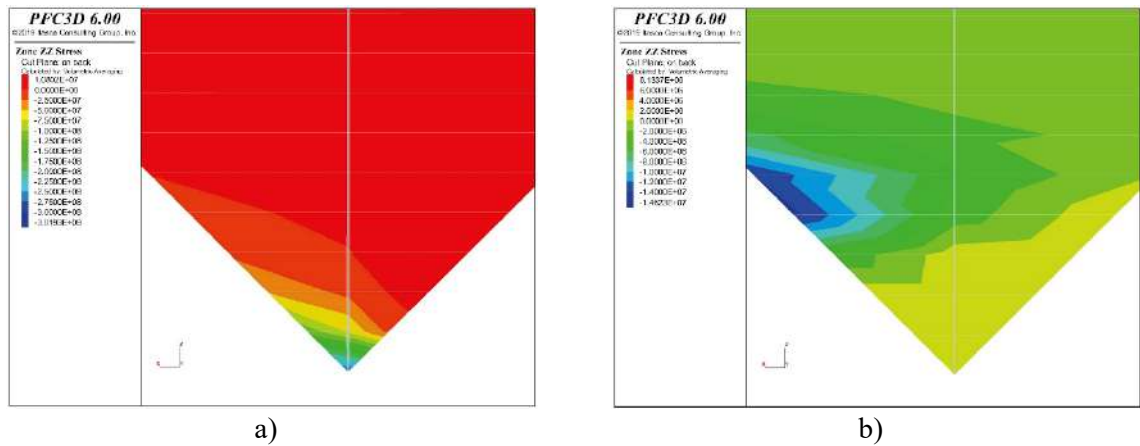


Figure 8. Contours of the vertical normal stress component (σ_z) on a cross-section of the steel pin during indentation on (a) granite and (b) syenite specimens

CONCLUSIONS

This study highlights the effectiveness of a coupled PFC3D-FLAC3D numerical framework for simulating rock indentation processes, with particular focus on the initial stage of the Cerchar Abrasion Test. By integrating a bonded-particle model for the rock and a deformable continuum model for the steel pin, the hybrid approach captures both rock fragmentation and tool stress-strain evolution. Simulations conducted on granite and syenite reveal that rock strength significantly influences penetration depth, fracture extent, and the stress experienced by the tool. The granular heterogeneity inherent in BPM modeling leads to asymmetrical damage patterns that align with field observations. The results underscore the importance of accounting for tool deformation in rock interaction models, especially in hard rock environments where stress concentrations can lead to premature tool wear. The proposed modeling framework offers a valuable tool for improving the predictive accuracy of rock cuttability and tool wear behavior, supporting the advancement of mechanical excavation technologies in abrasive geological conditions.

REFERENCES

- Alber, M., Yaralı, O., Dahl, F., Bruland, A., Käsling, H., Michalakopoulos, T. N., Cardu, M., Hagan, P., Aydın, H., Özarslan, A. (2015). ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the CERCHAR abrasivity test. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014 (s. 101-106).
- Callister Jr, W. D., Rethwisch, D. G. (2020). Materials science and engineering: an introduction. John Wiley & Sons.
- Cundall, P. A. (1971). A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system. Proceedings of the international symposium on rock mechanics (p. 129-136).
- Cundall, P. A., Hart, R. D. (1993). Numerical modeling of discontinua. Elsevier.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, 29, 47-65.
- D'Addetta, G. A., Kun, F., Ramm, E. (2002). On the application of a discrete model to the fracture process of cohesive granular materials. Granular Matter, 4, 77-90.
- Fowell, R. J. (1993). The mechanics of rock cutting. Excavation, Support and Monitoring (p. 155-176).
- Hamzaban, M.-T., Memarian, H., Rostami, J., Ghasemi-Monfared, H. (2014a). Study of rock–pin interaction in Cerchar abrasivity test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 72, 100-108.
- Hamzaban, M.-T., Memarian, H., Rostami, J. (2014b). Continuous monitoring of pin tip wear and penetration into rock surface using a new Cerchar abrasivity testing device. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, 689-701.
- Hamzaban, M.-T., Karami, B., Rostami, J. (2019). Effect of pin speed on Cerchar Abrasion test results. Journal of Testing and Evaluation, 47, 121-139.
- Huang, H. (1999). Discrete element modeling of tool-rock interaction, PhD Thesis, University of Minnesota.

Huang, X., Tang, M., Wang, S., Zhai, Y., Zhuang, Q., Zhang, C., Lei, Q. (2024). Assessing cutter-rock interaction during TBM tunnelling in granite: Large-scale standing rotary cutting tests and 3D DEM simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16, 3595-3615.

ITASCA. (2018). *Contacts and Contact Models in PFC3D*. Itasca Consulting Group, Inc.

Kaitkay, P. V. (2002). *Modeling of rock cutting using distinct element methods*. Master Thesis, Kansas State University.

Liu, J., Wang, J. (2018). The effect of indentation sequence on rock breakages: a study based on laboratory and numerical tests. *Comptes Rendus. Mécanique*, 346, 26-38.

Liu, J., Wang, J., Wan, W. (2018). Numerical study of crack propagation in an indented rock specimen. *Computers and Geotechnics*, 96, 1-11.

Ma, H., Yin, L., Ji, H. (2011). Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 1021-1033.

Martin, J., Fowell, R. (1997). Factors governing the onset of severe drag tool wear in rock cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 59-69.

Packulak, T. R., Day, J. J., McDonald, M. R., Jacksteit, A. C., Diederichs, M. S. (2024). Measurement of true tensile strength from Brazilian tensile strength laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 62, 1-14.

Park, N. (2006). *Discrete element modeling of rock fracture behavior: fracture toughness and time-dependent fracture growth*, The University of Texas at Austin.

Potyondy, D. O., Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 1329-1364.

Potyondy, D. (2017). Simulating perforation damage with a flat-jointed bonded-particle material. *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (ARMA-2017-0223)*. ARMA.

Rojek, J., Oñate, E., Labra, C., Kargl, H. (2011). Discrete element simulation of rock cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 996-1010.

Su, O., Akcin, N. A. (2011). Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 434-442.

Zhang, X.-P., Ji, P.-Q., Liu, Q.-s., Liu, Q., Zhang, Q., Peng, Z.-H. (2018). Physical and numerical studies of rock fragmentation subject to wedge cutter indentation in the mixed ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 354-365.

Zhang, Z., Zhang, F. (2019). Three Dimensional DEM Simulation of Rock Indentation by Flat-joint Model. *ARMA-CUPB Geothermal International Conference (ARMA-CUPB-19-7375)*. ARMA.

Zhu, X., Liu, W., He, X. (2016). The investigation of rock indentation simulation based on discrete element method. *KSCE J Civ Eng*.

Zhu, X., Liu, W., He, X. (2017). The investigation of rock indentation simulation based on discrete element method. KSCE Journal of Civil Engineering, 21, 1201-1212.

PIROKLASTİK KAYAÇLARIN SUDA DAĞILMAYA KARŞI DAYANIKLILIK İNDEKSİNİN DOLAYLI DENEYLERDEN TAHMİN EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE RESISTANCE INDEX OF PYROCLASTIC ROCKS TO DISSOLUTION IN WATER FROM INDIRECT TESTS

S. Kahraman^{1, *}, M. Fener², O. Günaydın³

¹ Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

² Ankara Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

³ Adıyaman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adıyaman

*Sorumlu yazar: sairkahraman@yahoo.com

ÖZ

Piroklastik kayaçların işlenmesi ve kesilmesi oldukça kolaydır. Ayrıca bu kayaçlar iyi bir ısı ve ses yalıtımına sahiptirler. Bu nedenlerden dolayı uygun piroklastik kayaçlar eski çağlardan beri yapı taşı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Piroklastik kayaçlar genel olarak yumuşak kayaçlar olduğundan yapı taşı olarak uygunluklarının değerlendirilmesinde suda dağılmaya karşı dayanıklılık indeksi (SDI) değerlerinin belirlenmesi önemlidir. SDI deneyi zor ve zaman alıcı bir deney olup; Brazilian çekme dayanımı (BTS) ve P-dalga hızı (V_p) testi gibi dolaylı yöntemlerden SDI değerlerinin tahmin edilmesi için ampirik modellerin türetilmesi yararlı olacaktır. Bazı araştırmacılar SDI ile BTS ve V_p arasındaki korelasyonları araştırmışlardır. Ancak, bu çalışmaların hiçbiri piroklastik kayaçlar üzerinde yapılmamıştır. Bu çalışmada, piroklastik kayaçların SDI değerlerinin BTS ve V_p değerlerinden tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. Kapadokya yöresine ait 31 ayrı lokasyondan toplanan piroklastik kayaç örnekleri üzerinde SDI, BTS ve V_p testleri yapılmış ve SDI ile BTS ve V_p değerleri arasındaki korelasyonlar araştırılmıştır. Basit ve çoklu regresyon analizleriyle iyi veya yüksek korelasyonlu modeller geliştirilmiştir. Sonuç olarak, özellikle projelerin ön araştırma aşamalarında piroklastik kayaçların SDI değerlerinin BTS ve V_p değerlerinden tahmin edilebileceği söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Suda dağılmaya karşı dayanıklılık, Brazilian çekme dayanımı, P-dalga hızı

ABSTRACT

Pyroclastic rocks are quite easy to process and cut. These rocks have also good heat and sound insulation. Therefore, suitable pyroclastic rocks have been widely used as building stones since ancient times. Since pyroclastic rocks are generally soft rocks, it is important to determine slake durability index (SDI) values in evaluating their suitability as building stones. The SDI test is a difficult and time-consuming test; it would be useful to derive empirical models for estimating SDI values from indirect methods such as Brazilian tensile strength (BTS) and P-wave velocity (V_p) tests. Some researchers have investigated the correlations between SDI, BTS and V_p . However, none of these studies have been conducted on pyroclastic rocks. In this study, the predictability of SDI values of pyroclastic rocks from BTS and V_p values was investigated. SDI, BTS and V_p tests were performed on pyroclastic rock samples collected from 31 different locations in the Cappadocia region and the correlations between SDI, BTS and V_p values were investigated. Good or highly correlated models were developed with simple and

multiple regression analyses. As a result, it can be said that SDI values of pyroclastic rocks can be estimated from BTS and V_p values, especially in the preliminary research stages of projects.

Keywords: Slake durability index, Brazilian tensile strength, P-wave velocity

GİRİŞ

Kesilmeleri ve işlenmeleri çok kolay olan; aynı zamanda iyi bir termal ve ses yalıtımına sahip olan piroklastik kayaçlar ilk çağlardan beri yapı taşı olarak kullanılmıştır. Günümüzde de kullanıma devam edilmekte olan bu kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin mühendisler veya sektör çalışanları tarafından bilinmesi önemlidir. Piroklastik kayaçlar yumuşak kaya sınıfına girdiğinden ve suya karşı duyarlı olduğundan yapı taşı olarak uygunluklarını değerlendirmek veya kullanım alanlarına karar vermek için suda dağılmaya karşı dayanıklılık indeksi (SDI) değerlerini belirlemek gerekmektedir. Ancak, SDI deneyi zaman alıcı ve zahmetlidir. Bu nedenle SDI değerinin daha kolay ve pratik dolaylı deney yöntemlerinden tahmin edilmesi önem arz etmektedir. Birçok araştırmacı tarafından çeşitli kayaçları kullanarak SDI tahminine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Fakat piroklastik kayaçların SDI değerinin Brazilian çekme dayanımı (BTS) ve P-dalga hızı (V_p) yardımıyla tahmini ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmada, Kapadokya yöresine ait 31 farklı lokasyondan toplanan piroklastik kayaçların SDI değerlerinin BTS ve V_p ’den tahmin edilebilirliği araştırılmaktadır.

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Birçok araştırmacı, SDI ile bazı kayaç özellikleri arasındaki korelasyonları incelemiştir. Bu çalışmaların özetleri aşağıda verilmektedir:

Cargill ve Shakoor (1990), kumtaşı, kireçtaşı, mermer, dolomit ve siyenit numuneleri üzerinde tek eksenli basınç dayanımı UCS ve SDI deneyleri gerçekleştirmiştir. İki değişken arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur:

$$UCS = 60.34I_{d2} - 5822 \quad r = 0.74 \quad (1)$$

Burada, UCS = Tek eksenli basınç dayanımı (MPa), I_{d2} = İki çevrim SDI (%).

Koncagul ve Santi (1999), Breathitt şeyl örneklerini test etmiş ve UCS ile SDI arasındaki korelasyonları araştırmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki denklem türetilmiştir:

$$UCS = 0.658I_{d2} + 9.081 \quad r = 0.63 \quad (2)$$

Gökçeoğlu vd. (2000), mineralojinin yumuşak ve killi kayaların SDI üzerindeki etkisini araştırmış ve marınlar için UCS ve SDI arasında doğrusal bir ilişki geliştirmiştir:

$$UCS = 2.54I_{d4} - 202 \quad r = 0.76 \quad (3)$$

Burada, UCS = Tek eksenli basınç dayanımı (MPa), I_{d4} = Dört çevrim SDI (%).

Dinçer vd. (2008), SDI yardımıyla UCS değerinin tahmin etmek amacıyla denklemler türetmek için kalıç örneklerini test etmiş ve doğrusal ve doğrusal olmayan denklemler geliştirmişlerdir:

$$UCS = 0.211I_{d2} - 13.815 \quad r = 0.68 \quad (4)$$

$$UCS = 13.636 \ln I_{d2} - 69.552 \quad r = 0.65 \quad (5)$$

$$UCS = 4.9 \cdot 10^{-7} I_{d2}^{3.578} \quad r = 0.74 \quad (6)$$

$$UCS = 0.084 e^{0.45I_{d2}} \quad r = 0.76 \quad (7)$$

Sharma ve Singh (2008), farklı kayaçlar üzerinde SDI ve Vp testlerini gerçekleştirmiş ve iki parametre arasında aşağıdaki denklemi geliştirmişlerdir:

$$Id2 = 0.0069Vp + 79.58 \quad r = 0.88 \quad (8)$$

Burada, Id2 = İki çevrim SDI (%), Vp = P dalga hızı (m/sn).

Yağız (2011), SDI ve kayaç özellikleri arasında bazı korelasyonlar geliştirmek için traverten ve kireçtaşı örneklerini deneye tabi tutmuşlardır. Türetilen denklemler aşağıda verilmiştir:

$$UCS = 29.63Id4 - 2858 \quad r = 0.94 \quad (9)$$

$$UCS = 13.09Id4 - 1249.9 \quad r = 0.89 \quad (10)$$

$$Id4 = 1.131Vp + 93.26 \quad r = 0.73 \quad (11)$$

$$Id4 = 98.27w - 0.004 \quad r = 0.81 \quad (12)$$

$$Id4 = 98.65n - 0.04 \quad r = 0.79 \quad (13)$$

$$Id4 = 0.051N - 96.91 \quad r = 0.99 \quad (14)$$

$$Id4 = 16\gamma_{dry} + 95.35 \quad r = 0.89 \quad (15)$$

Burada, Id4 = Dört çevrim SDI (%), UCS = Tek eksenli basınç dayanımı (MPa), E = Elastik modül (MPa), Vp = P dalga hızı (km/sn), w = Ağırlıkça su emme oranı (%), n = Porozite (%), N = Schmidt sertliği, γ = Kuru birim hacim ağırlık (kN/m³).

Sarkar vd. (2012), farklı kayaçlar için SDI ile Vp arasındaki korelasyonu incelemiş ve aşağıdaki ilişkiyi geliştirmiştir:

$$Id2 = 0.0014Vp + 92.98 \quad r = 0.95 \quad (16)$$

Khandelwal (2013), farklı kayaçlar üzerinde SDI ve Vp deneyleri gerçekleştirmiş ve iki parametre arasında aşağıdaki ilişkiyi bulmuştur:

$$Id2 = 0.001Vp + 94.84 \quad r = 0.96 \quad (17)$$

Azimian ve Ajalloeian (2015), marnlar için SDI ile Vp arasındaki ilişkiyi araştırmış ve aşağıdaki denklemi türetmiştir:

$$Id2 = 0.0021Vp + 82.80 \quad r = 0.79 \quad (18)$$

Kahraman vd. (2017), piroklastik kayaçların UCS değerinin SDI' den tahmin edilebilirliğini incelemiş ve iki parametre arasında aşağıdaki ilişkiyi türetmiştir:

$$UCS = 0.047e0.065Id4 \quad r = 0.92 \quad (19)$$

Fereidooni ve Khajevand (2018), travertenlerin SDI ile fiziksel-mekanik özellikleri arasındaki korelasyonu incelemiş ve aşağıdaki denklemleri bulmuştur:

$$Id10 = 7.68 \gamma_d + 78.52 \quad r = 0.93 \quad (20)$$

$$Id10 = 0.58n + 98.72 \quad r = 0.92 \quad (21)$$

$$Id10 = 0.0008Vp + 91.81 \quad r = 0.93 \quad (22)$$

$$Id10 = 0.17R_n + 91.60 \quad r = 0.89 \quad (23)$$

$$Id10 = 0.52I_s + 91.98 \quad r = 0.91 \quad (24)$$

$$Id10 = 0.57BTS + 92.28 \quad r = 0.95 \quad (25)$$

$$I_{d10} = 0.70BPI + 92.16 \quad r = 0.88 \quad (26)$$

$$I_{d10} = 0.15UCS + 92.20 \quad r = 0.86 \quad (27)$$

Burada, I_{d10} = On çevrim SDI (%), γ_d = Kuru birim hacim ağırlık (g/cm³), n = Porozite (%), V_p = P dalga hızı (m/sn), R_n = Schmidt çekici değeri, I_s = Nokta Yük dayanımı (MPa), BTS = Brazilian çekme dayanımı (MPa), BPI = Disk makaslama indeksi (MPa), UCS = Tek eksenli basınç dayanımı (MPa).

Kahraman vd. (2017), piroklastik kayaçların SDI değerlerinin nokta yük ve disk makaslama indeksi değerlerinden tahmin edilebilirliğini araştırmış ve aşağıdaki denklemleri türetmişlerdir:

$$I_{d4} = 9.93 \ln I_s + 91.24 \quad r = 0.90 \quad (28)$$

$$I_{d14} = 9.98 \ln I_s + 91.24 \quad r = 0.83 \quad (29)$$

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kapadokya bölgesinde Niğde, Nevşehir, Kayseri ve Aksaray il sınırlarında halen işletilmekte olan yapıtaşı ocaklarından ve mostralardan 31 farklı lokasyondan piroklastik kayaçlara ait blok numuneler toplanmıştır. Numunelere ait lokasyonlar Çizelge 1’ de görülmektedir.

Bloklardan hazırlanan deney numuneleri üzerinde SDI (dört çevrim), BTS (doygun), V_p (doygun), birim hacim ağırlık (doygun) (γ) ve porozite (n) deneyleri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır. Deney sonuçlarına ait özet değerler Çizelge 1’ de görülmektedir. SDI değerleri %61,2 ile % 97,9 arasında, BTS değerleri 0,31 MPa ile 3,96 MPa ve V_p değerleri ise 0,75 km/sn ile 3,70 km/sn arasında değişmektedir. Parametrelerin değişim aralıkları oldukça geniş olup; bu durum istatistiksel değerlendirme bakımından önemlidir.

Çizelge 1. Numunelere ait lokasyonlar ve deney sonuçları.

Lokasyon	SDI(%)	V_p (km/sn)	BTS (MPa)	γ (g/cm ³)	n (%)
Derbent-1/Niğde (Bej)	81,3	1,19	1,28	1,78	34,1
Dere Mah.-1/Niğde	79,7	2,19	0,88	1,79	26,6
Dere Mah.-2/Niğde	91,9	3,07	2,64	1,72	29,4
Kızılören/Niğde	95,9	1,99	1,94	1,99	24,6
Özbelde/Niğde	94,2	3,33	2,86	1,90	25,1
Aktaş-1/Niğde	78,2	1,26	0,79	1,59	41,8
Derinkuyu/Nevşehir	63,6	1,53	0,88	1,79	35,1
Nevşehir (Gül kuruşu)	83,0	1,79	0,79	1,83	27,6
Akkaya Göleti/Niğde	88,4	2,57	2,64	1,75	27,5
Bahçeli/Niğde	88,3	1,49	2,03	1,95	14,7
Gümüşler/Niğde	79,7	1,60	0,69	1,73	28,9
Tomarza/Kayseri (Sarı)	95,4	1,63	1,81	1,81	26,0
Tomarza/Kayser (Siyah)	89,0	1,70	1,76	1,69	35,8
Avanos/Nevşehir (Pembe)	90,8	1,81	1,59	1,71	25,3
Derbent-2/Niğde (Gri)	92,7	1,66	1,63	1,88	27,6

Güllüce/Niğde	96,3	2,67	3,52	1,83	15,0
Araplı/Yahyalı/Kayseri	90,2	1,51	1,23	1,85	23,8
Mustafapaşa/Nevşehir	69,4	1,06	0,26	1,50	39,1
İncesu/Kayseri	90,3	2,11	1,23	1,84	31,9
Avanos/Nevşehir (Beyaz)	61,2	0,75	0,31	1,31	40,0
Nevşehir (Vişne)	78,0	1,55	0,53	1,84	25,4
Nevşehir (Devetüyü)	83,9	1,90	0,57	1,70	28,9
Nevşehir (Beyaz)	78,8	1,72	0,35	1,68	26,1
Nevşehir (Formika)	73,9	1,40	0,31	1,66	27,6
Nevşehir (Sarı)	82,9	1,79	0,57	1,70	29,3
Tomarza/Kayseri (Gri)	96,4	1,62	3,08	1,83	20,3
Selime/Ihlara/Aksaray	95,0	1,99	2,20	1,91	26,2
Taşpınar/Aksaray	92,8	3,59	1,81	1,91	16,0
Altunhisar/Niğde	95,2	2,15	1,76	2,04	19,0
Persek/Kayseri	97,9	3,70	3,96	1,94	18,5
Başakpınar/Kayseri	97,7	3,07	3,96	2,07	12,2

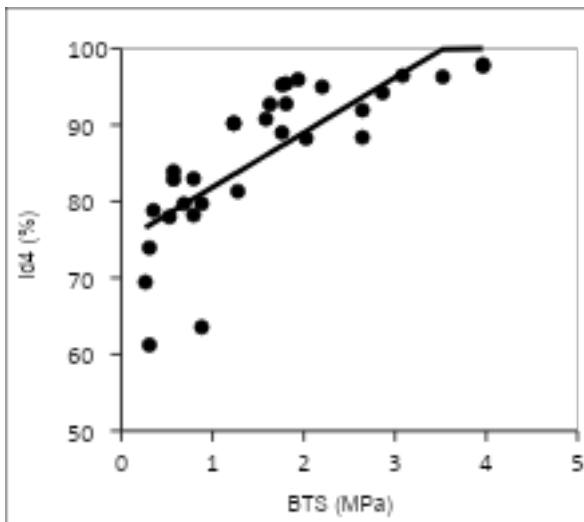
BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

SDI değerini tahmin etmeye yönelik eşitlikler geliştirmek amacıyla önce korelasyon ve basit regresyon analizleri yapılmıştır. Şekil 1’ de görüldüğü gibi SDI ile BTS arasında çok iyi bir logaritmik korelasyon bulunmuştur. BTS değeri arttıkça SDI değeri de artmaktadır. SDI ile V_p arasındaki da logaritmik bir ilişki olup; korelasyon katsayısı iyi derecededir (Şekil 2). Korelasyonlara ait regresyon eşitlikleri aşağıda verilmektedir:

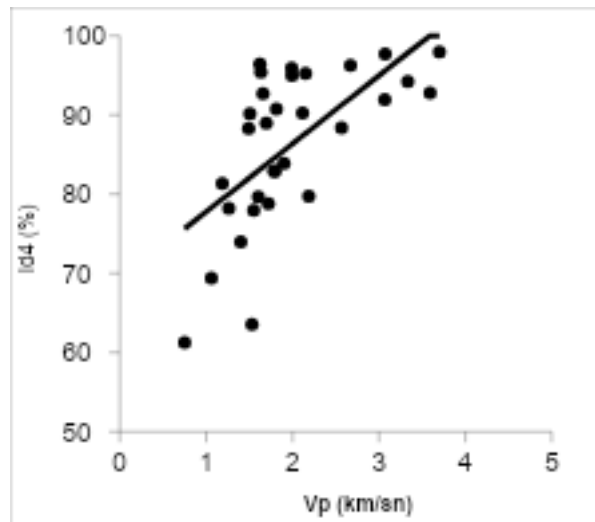
$$I_{d4} = 10.71 \ln BTS + 83.90 \quad r = 0.85 \quad (30)$$

$$I_{d4} = 19.45 \ln V_p + 74.12 \quad r = 0.70 \quad (31)$$

Burada, Burada, I_{d4} = Dört çevrim SDI (%), BTS = Brazilian çekme dayanımı (MPa), V_p = P dalgı hızı (km/sn).



Şekil 1. SDI ile BTS korelasyonu



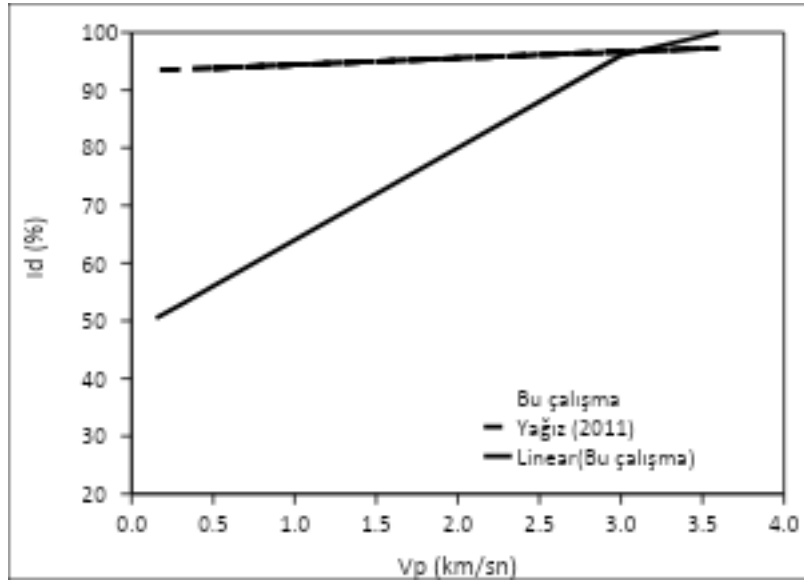
Şekil 2. SDI ile V_p korelasyonu

Daha yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler elde edilip-edilmeyeceğini görmek için γ ve n parametrelerini de dâhil ederek çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Türetilen çoklu regresyon eşitlikleri ve korelasyon katsayıları Çizelge 2’ de verilmiştir. BTS ile birlikte γ ve n içeren çoklu regresyon modellerinin korelasyon katsayıları Eşitlik (30)’ ten daha yüksek korelasyon katsayısına sahip olmadığı görülmektedir. Ancak, V_p ile birlikte γ ve n içeren çoklu regresyon modellerinin korelasyon katsayıları Eşitlik (31)’ ten daha yüksektir. V_p ile tahmin yapılacağı zaman çoklu regresyon modellerinin kullanılması tahmin gücünü artıracaktır.

Çizelge 2. Türetilen çoklu regresyon eşitlikleri ve korelasyon katsayıları

Eşitlik	Korelasyon katsayısı (r)
$Id_4=4.7BTS+27.9+28.6$	0.85
$Id_4=5.2BTS-0.4n+89.6$	0.82
$Id_4=4.2V_p+36.7+12.1$	0.79
$Id_4=4.6V_p-0.7n+94.9$	0.75

Literatürde V_p veya BTS’ den SDI değerini tahmin etmek için yapılan çalışmalarda (Sharma and Singh, 2008; Yağız, 2011; Sarkar et al., 2012; Khandelwal, 2013; Azimian and Ajalloeian, 2015, Fereidooni and Khajevand, 2018) piroklastik olmayan ve hep SDI değeri çok yüksek (> 85) kayalar kullanılmıştır. Bu nedenle bu çalışmaların mevcut çalışmayla karşılaştırılması anlamsızdır. Yine de, bir fikir vermesi bakımından Yağız (2011) tarafından dört çevrimlik SDI için (Bu çalışmada da dört çevrim uygulanmıştır) türetilen Eşitlik (11) ile yapılan karşılaştırma Şekil 3’ te verilmiştir. Yağız (2011) tarafından geliştirilen eşitliğin piroklastik kayalar için uygun olmadığı burada açıkça görülmektedir. Aynı durum diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen eşitlikler için de geçerlidir.



Şekil 3. Eşitlik (11) ile (19)’ un karşılaştırması.

SONUÇLAR

Piroklastik kayaların SDI değerlerinin BTS ve V_p ’ den tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada, Kapadokya yöresine ait 31 farklı lokasyondan toplanan ve fiziko-mekanik özellikler bakımından geniş bir aralığa sahip numune seti kullanılmıştır. Yapılan basit regresyon analizleriyle SDI ile BTS arasında yüksek korelasyon ($r = 0.85$), SDI ile V_p arasında ise iyi bir korelasyon ($r = 0.70$)

bulunmuştur. SDI değerinin BTS ile yoğunluk veya poroziteden tahmini için geliştirilen çoklu regresyon modellerinin basit regresyon modelinden daha yüksek korelasyon katsayılarına sahip olmadıkları görülmüştür. Ancak, SDI değerinin Vp ile yoğunluk veya poroziteden tahmini için geliştirilen çoklu regresyon modellerinin basit regresyon modelinden daha yüksek korelasyon katsayılarına ($r = 0.75$ ve 0.79) sahip oldukları ortaya konulmuştur. Geliştirilen tahmin modellerinin özellikle fizibilite çalışmalarında kolaylıkla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Türetilen modellerin başka yörelere ait piroklastik kayalar için de geçerli olup-olmadığının ileride araştırılması yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

Azimian, A., Ajalloeian, R. (2015). Empirical correlation of physical and mechanical properties of marly rocks with P wave velocity. Arab. Journal of Geosciences, 8, 2069–2079.

Cargill, J. S., Shakoor, A. (1990). Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 27, 495-503.

Davood, F., Khajevand, R. (2018). Correlations between slake-durability index and engineering properties of some travertine samples under wetting–drying cycles. Geotechnical and Geological Engineering, 36, 1071-1089.

Dincer, I., Acar, A., Ural, S. (2008). Estimation of strength and deformation properties of Quaternary caliche deposits. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67, 353–366.

Fereidooni, D., Khajevand, R. (2018). Correlations Between Slake-Durability Index and Engineering Properties of Some Travertine Samples Under Wetting–Drying Cycles. Geotechnical and Geological Engineering, 36, 1071–1089.

Gokceoglu, C., Ulusay, R., Sonmez, H. (2000). Factors affecting the durability of selected weak and claybearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. Engineering Geology, 57, 215-237.

ISRM. (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. R. Ulusay & J. A. Hudson (Eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics. Kozan Ofset.

Kahraman, S., Fener, M., Günaydın, O. (2017). Piroklastik kayaların suda dağılmaya karşı duraylılıklarının dolaylı deneylerden tahmini. **Türkiye 9. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi ve sergisi** (s. 337-341). Antalya.

Khandelwal, M. (2013). Correlating P-wave Velocity with the Physico-Mechanical Properties of Different Rocks. Pure and Applied Geophysics, 170, 507–514.

Koncagul, E. C., Santi, P. M. (1999). Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, 39-153.

Sarkar, K., Vishal, V., Singh, T. (2012). An empirical correlation of index geomechanical parameters with the compressional wave velocity. Geotechnical and Geological Engineering, 30, 469–479.

Sharma, P., Singh, T. (2008). A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 17–22.

Yağız, S. (2011). Correlation between slake durability and rock properties for some carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 377–383.

DOĞALTAŞ OCAKLARININ ETKİNLİĞİNİN VERİ ZARFLAMA ANALİZİ YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF NATURAL STONE QUARRIES BY USING DATA ENVELOPMENT ANALYSIS

Ş. A. Koç ^{1*}, E. Özkan ²

¹*Tria Mermer Madencilik San. Ve Tic. Ltd. Şti*

²*Afyonkocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü*

*Sorumlu yazar: serifahmetkoc@gmail.com

ÖZ

Bu çalışmada doğaltaş ocaklarının çalışma etkinliklerinin ha analizi yöntemi ile belirlenerek, etkin ocakların tespit edilmesi hedeflenmektedir. Veri zarflama analizi uygulaması yapılırken Isparta Sütçüler bölgesindeki gri dolomitik bej ocakları ve Afyonkarahisar Emirdağ bölgesindeki gümüş traverten ocakları olmak üzere iki ayrı bölge belirlenmiştir. Emirdağ bölgesinde on iki adet Isparta bölgesinde ise on üç adet doğaltaş ocağından veriler toplanmış ve “DEA Frontier” programında etkinlik analizleri yapılmıştır. Girdi olarak iş makinesi, delme ve kesim makineleri, çalışan sayısı temel alınırken, çıktı olarak ciro ve üretim miktarı dikkate alınmıştır. Bu veriler ile “DEA Frontier” adlı program kullanarak ocakların etkinlikleri hesaplanmıştır. Girdi odaklı BCC (Banker Charnes Cooper) ile CCR (Charnes Cooper Rhodes) yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda etkin ocakların tespiti ile girdi odaklı sonuçların yorumlaması yapılmıştır. En etkin değere bağlı olarak girdi değerlerindeki değişiklikler ile ocaklardaki performans iyileştirmeleri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karar verme birimleri, Doğaltaş ocakları, Veri Zarflama Analizi

ABSTRACT

In this study, it is aimed to determine the effective quarries by determining the working efficiency of natural quarries by data envelopment analysis method. While data envelopment analysis was performed, two separate zones were formed as gray dolomitic beige quarries in Isparta Sütçüler region and silver travertine quarries in Afyonkarahisar Emirdağ region. Data were collected from twelve quarries in Emirdağ and thirteen quarries in Isparta and then efficiency analyzes were conducted in the “DEA Frontier” program. As input, construction machinery, drilling and cutting machines, number of employees are taken as basis, output and turnover and production amount are taken into consideration. These data were calculated by using the program A DEA Frontier. Input-oriented BCC (Banker Charnes Cooper) and CCR (Charnes Cooper Rhodes) method were applied. As a result of this study, determination of effective quarries and interpretation of input oriented results were made. Depending on the most effective value, changes in input values and performance improvements in the quarries were determined.

Keywords: Decision Making Units, Natural Stone Quarries, Data Envelopment Analysis

GİRİŞ

Veri Zarflama Analizi, birbirine benzeyen girdilerin birden fazla birbirine benzer çıktılar üreten karar verme birimlerinin temelinde parametresiz yöntemlerde belirtilen matematiksel programlama ilkeleri ile çalışan ve etkinlikleri tespit eden bir yöntemdir (Akal, 1993).

Karar verme birimi, bir liman, okul, banka, hastane vb. kurumlar olabilir. Veri zarflama analizi birden çok girdinin bulunduğu ve çıktı sayısının fazla olduğu, hastaneler, okullar bankalar, toptancı mağazaları, silahlı kuvvetler gibi yerlerde oldukça yaygın kullanılmaktadır.

Veri Zarflama Analizi (VZA) 1978 yılında Charnes, Cooper ve Rhodos tarafından ortaya konulmuştur. Veri Zarflama Analizi karar verme birimlerinin göreceli etkinliklerini inceleyen ve ölçen teknik bir çalışmadır (Üte, 2002).

Her türlü üretim işlevli şirketlerin en karlı veya en düşük maliyetli üretim bileşimini belirleme fonksiyonu, doğrusal programlamanın en yaygın kullanıldığı alanlardan birisidir (Öztürk, 2009).

VZA'nın temelinde benzer türden karar verme birimlerinin üretim etkinliklerinin değerlendirmesi yer alır. Analize konu olacak karar verme birimlerinin belirli ortak özelliklerinin olması gerekmektedir. Tüm karar verme birimlerinin aynı hedefe yönelik, benzer işlevler görmesi önemlidir. Öte yandan pazar şartlarının benzer olması ve gruptaki bütün birimlerin verimliliklerini nitelendiren etmenlerin yoğunluk ve büyüklüklerindeki farklılıklar hariç, aynı olması şartları aranır (Kayalıdere ve Kargın, 2004).

Yapılan çalışmada VZA ile Isparta ili, Sütçüler ilçesinde bulunan doğaltaş ocakları ile Afyonkarahisar ili, Emirdağ ilçesinde bulunan traverten ocaklarının etkinliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Etkinlik ölçümü yapılırken üç adet girdi ve iki adet çıktı belirlenmiştir. Girdiler iş makinesi, kesim makineleri ve çalışan sayıları iken çıktılar ise üretim ve ciro olarak belirlenmiştir.

Doğaltaş ocaklarında girdi faktörleri işletmeler tarafından kontrol edilebilmektedir. Buna karşın doğaltaş ocaklarındaki jeolojik süreksizlikler, renk dağılımı, desen farklılıkları gibi doğal etmenler işletmeler tarafından kontrol edilememektedir. Bu nedenle bu çalışmada çıktı odaklı yerine, kontrol edilebilen girdi odaklı bir yöntem kurgulanmıştır. VZA için girdi odaklı olmak üzere iki ayrı bölgede etkin ocaklar tespit edilmiş, referans kümeleri oluşturulmuş, karar verme birimlerinin artık değerleri tespit edilmiş, hedefler belirlenerek performans iyileştirmeleri tespit edilmiştir.

VERİ ZARFLAMA ANALİZİ

Veri Zarflama Analizi, karar verme birimleri arasından girdi ve çıktı miktarlarının en iyi bileşimini referans alarak sınır tespit eder ve karar verme birimlerinin bu sınıra olan uzaklıklarını göreceli olarak analiz eder. Karar verme birimleri en az girdi miktarını kullanarak en çok çıktı üreten sınırını belirler diğer karar verme birimleri için bir referans oluşturur. Diğer karar verme birimleri bunu referans alır ve etkinlik derecelerini bu referansa olan uzaklıklarına göre belirler (Bakırcı, 2006).

Performans değerlendirmelerinde ortaya konan sonuçlara göre girdilerde meydana getirilen belirli bir miktar artış sonuçlarında, çıktılarda meydana gelmesi beklenen artış, bu artışa oranlı bir şekilde gerçekleşebilir veya gerçekleşmeyebilir. Eğer çıktılar, girdilerdeki artışla orantılı bir şekilde artarsa, bu durumda ölçeğe göre sabit getiri (Constant Returns of Scale-CRS) halinde söz edilir. Aynı şekilde eğer çıktılar girdilerle aynı oranda değil de farklı bir oranda artıyorsa, bu durumda ölçeğe göre değişken getiri (Variable Return of Scale-VRS) durumundan söz edilir (Bakırcı, 2006).

VZA'nın uygulanması ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır (Öztürk, 2009):

1. Etkinlik sonuçları,
2. Etkin olmayan karar verme birimleri,
3. Karar verme birimlerinin artık miktarları,
4. Karar verme birimlerindeki hedeflenen girdiler,
5. Karar verme birimlerin etkin olabilmesi için referans aldıkları karar verme birimleri,

Veri Zarflama Analizi Uygulamasının Avantajları

Veri zarflama analizi çok girdi ve çıktılarının olduğu sistemlerde etkinlik ölçmede doğru kullanıldığı zaman çok faydalı bir yöntemdir (İnan, 2000). VZA'nın avantajları şöyle sıralanabilir:

1. Veriler aynı bölgelerden seçildiği için homojen bir yapıdadır.
2. Çok fazla girdi ve çıktı etkinlik ölçümünde kullanılabilir.
3. Girdi ve çıktılar farklı birimlerde olabilir.
4. Doğrusal programlama mantığı ile çalıştığı için bilgisayar programları ile rahatlıkla uygulanabilir.
5. Referans kümeleri oluşturarak, etkin karar verme birimlerinin, etkin olabilmesi için referans olabilecekleri yerlerinin olması.
6. Hedef değerlerinin öğrenilebilmesi mümkündür.

Veri Zarflama Analizi Uygulamasının Dezavantajları

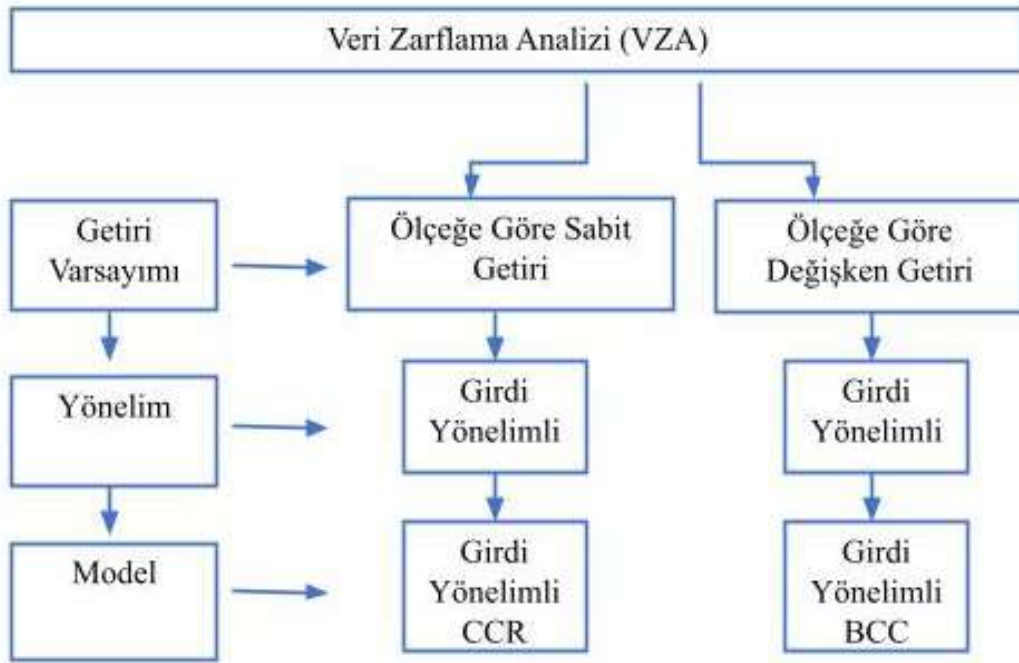
VZA'nın dezavantajları ise şu şekilde ifade edilebilir (Karasoy, 2000):

1. Karar verme birimleri kendi aralarındaki ağırlık değerleri arasından en iyi sonucu seçerek etkin noktayı tespit ettiğinden kesin mutlak etkinlik noktasında ipucu vermez.
2. Bilgisayar programı olmaması durumunda çözümü zor ve zaman almaktadır
3. Girdilerde çok yüksek veya çok düşük değerler aldığında etkinlik sınırının belirlenmesinde sıkıntılar çıkabilir.
4. Homojen veri elde edilmesi gerekmektedir.

Veri Zarflama Analizinin Uygulama Aşamaları

Veri Zarflama Analizi uygulama aşamaları:

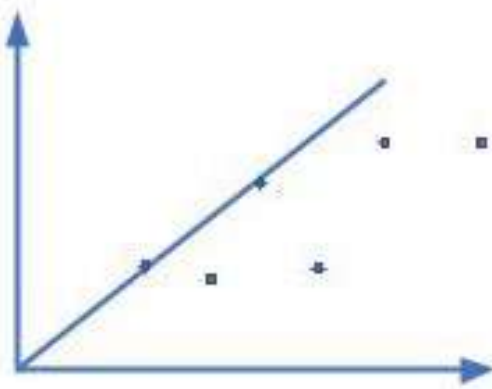
1. Karar verme birimlerinin seçilmesi
 2. Girdi ve çıktılarının belirlenmesi
 3. Verileri ulaşma ve güvenilirliği
 4. VZA modelinin belirlenmesi ve etkinliğin bulunması
 5. Etkinlik değerleri
 6. Referans gruplarının oluşturulması
 7. Stratejinin belirlenmesi
 8. Sonuçların yorumlanması
- şeklinde ifade edilebilir (Depren, 2008).



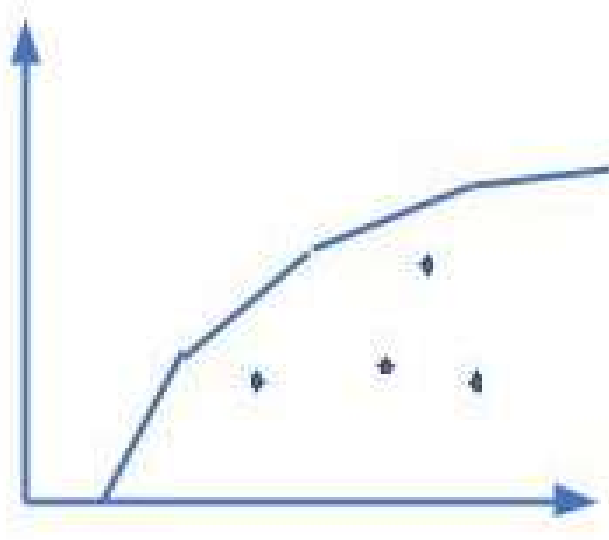
Şekil 1. VZA'nın girdiye yönelik işlem aşamaları (Özden 2008).

Bu çalışmada Şekil 1'de görüldüğü üzere VZA'nın CCR ve BCC ye göre girdi odaklı yaklaşımı kurgulanmıştır.

Şekil 2'de CCR modeli için üretim sınırına ve üretim olanakları kümesine yer verirken, Şekil 3'te ise BCC modeline ait bir üretim sınırı ve üretim olanakları kümesi gösterilmiştir (Cooper, 2011).



Şekil 2. CCR modeline ait örnek üretim olanakları kümesi (Cooper, 2011).



Şekil 3. BCC modeline ait örnek üretim olanakları kümesi (Cooper, 2011).

CCR ile BCC arasındaki fark Şekil 2 ve 3'te daha kolay anlaşılmaktadır. CCR'de etkinlik sınırı değeri orijinden geçen doğru biçimde iken BCC modelinde ise iç bükey ve doğrusal biçimdedir (Cooper, 2011).

CCR ve BCC modelleri uygulama olarak girdi ve çıktıya yönelik olmak üzere iki ayrı şekilde uygulanmaktadır. Girdiye yönelik VZA modeli belirli bir çıktı bileşimini en etkin şekilde üretebilmek amacıyla kullanılacak en uygun girdi bileşiminin nasıl olması gerektiğini araştırırken, çıktıya yönelik VZA modelleri belirli bir girdi bileşimi ile en fazla ne kadar çıktı bileşimi elde edebileceğini araştırmaktadır (Charnes et al. 2011).

Doğaltaş işletmelerinde yapılan veri zarflama analizi çalışmaları literatürde çok yer almamıştır. Mevcut yapılan çalışmalar ise;

Oruç ve vd. (2014) yaptıkları çalışmada; Afyonkarahisar ilindeki 48 fabrikada 2012 yılındaki verileri kullanarak CCR ve BCC göre etkinlikleri tespit etmişlerdir. Girdi olarak, fabrikanın toplam oturma alanı, personel sayısı, istenilen hammadde miktarı, makine kapasitesi dikkate alınırken 2012 yılı cirosu ve ürün miktarlarını çıktı olarak dikkate almışlardır.

Aras ve Gencer (2011) yaptıkları çalışmada; 2005 ile 2009 yılları arasındaki verileri kullanarak CCR ve BCC'ye göre girdi yönlü etkinlik değerlerini tespit etmişlerdir. Muğla bölgesinden 12 işletmeden verileri toplamışlar ve girdi olarak genel gideri, enerji gideri ve personel gideri temel alınırken çıktı olarak gelir kalemini dikkate almışlardır.

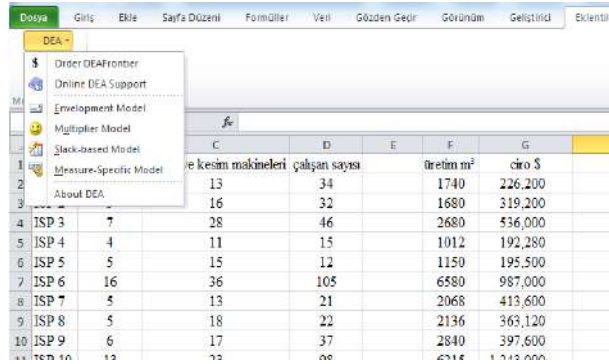
Saraçlı et al. (2013) yaptıkları çalışmada; Afyonkarahisar ilindeki 64 adet fabrikanın verilerini toplayarak etkinliklerini belirlemişlerdir. Girdi olarak fabrika çalışan sayısı, mühendis sayısı, makine sayısı, mermer ocağı sayısı, iç piyasa satışlarının oranı, işçilerin aylık maliyeti, elektrik maliyeti, aylık su maliyeti, aylık bakım maliyeti, yakıt maliyeti, aylık ortalama piriz maliyeti olmak üzere toplamda 11 adet girdi belirlenmişken, çıktı olarak aylık işlenmiş mermer miktarı ve üretilen ürün çeşidi sayısını almışlardır.

Uygulamada Kullanılan Programın Tanıtımı

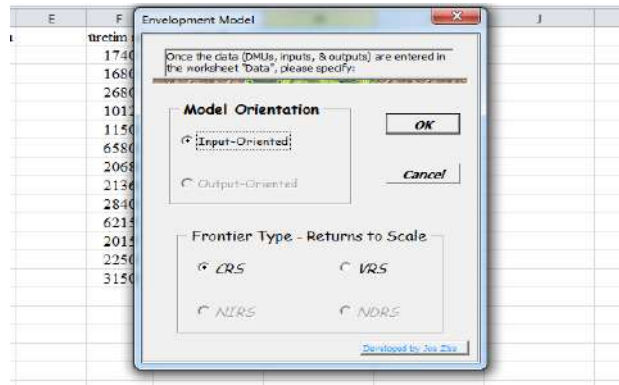
DEA Frontier Freee” Excel tabanlı bir yazılımdır. Elde edilen veriler Şekil 4’te belirtilen şekilde programa giriş yapılarak, Şekil 5 ve Şekil 6’da model seçimi yapılarak şekil 7’de görüldüğü üzere hedef, artık ve etkinlik sonuçları elde edilmektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	ocaklar	iş makinesi	delme ve kesim makineleri	çalışan sayısı	üretim m ²	ciro \$		
2	ISP 1	6	13	34	1740	226,200		
3	ISP 2	5	16	32	1680	319,200		
4	ISP 3	7	28	46	2680	536,000		
5	ISP 4	4	11	15	1012	192,280		
6	ISP 5	5	15	12	1150	195,500		
7	ISP 6	16	36	105	6580	987,000		
8	ISP 7	5	13	21	2068	413,600		
9	ISP 8	5	18	22	2136	363,120		
10	ISP 9	6	17	37	2840	397,600		
11	ISP 10	13	23	98	6215	1,243,000		
12	ISP 11	7	19	16	2015	302,250		
13	ISP 12	7	15	30	2250	360,000		
14	ISP 13	8	27	53	3150	472,500		

Şekil 4. “DEA Frontier Freee” programına verilerin girişi



Şekil 5. DEA ve Excel ara yüzünün görünümü



Şekil 6. Model ara yüzünün görünümü ve model seçimi

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Inputs		Outputs												
2	iş makinesi		üretim m ³												
3	delme ve kesim makineleri		ciro \$												
4	çalışan sayısı														
5															
6	Input-Oriented														
7	CRS														
8	DMU No.	DMU Name	Efficiency	Sum of	RTS	Optimal Lambdas									
9	1	ISP 1	0.66561	0.556	Increasing	0.414	ISP 7	0.142	ISP 10						
10	2	ISP 2	0.73106	0.458	Increasing	0.201	ISP 7	0.099	ISP 9	0.158	ISP 10				
11	3	ISP 3	0.83338	0.657	Increasing	0.338	ISP 7	0.319	ISP 10						
12	4	ISP 4	0.65876	0.491	Increasing	0.385	ISP 7	0.017	ISP 8	0.090	ISP 11				
13	5	ISP 5	0.84584	0.565	Increasing	0.222	ISP 7	0.342	ISP 11						
14	6	ISP 6	0.88178	1.775	Decreasing	0.443	ISP 7	0.774	ISP 9	0.558	ISP 10				
15	7	ISP 7	1.00000	1.000	Constant	1.000	ISP 7								
16	8	ISP 8	1.00000	1.000	Constant	1.000	ISP 8								
17	9	ISP 9	1.00000	1.000	Constant	1.000	ISP 9								
18	10	ISP 10	1.00000	1.000	Constant	1.000	ISP 10								
19	11	ISP 11	1.00000	1.000	Constant	1.000	ISP 11								
20	12	ISP 12	0.85599	0.925	Increasing	0.844	ISP 7	0.081	ISP 10						
21	13	ISP 13	0.82909	0.907	Increasing	0.736	ISP 9	0.170	ISP 10						
22															
23															
24															
25															
26															
27															
28															
29															
30															
31															
32															
33															
34															
35															
36															
37															

Şekil 7. Programın hesapladığı sonuçlar

BULGULAR

Bu çalışmada Isparta İli, Sütçüler İlçesi bölgesinde bulunan gri bej ocakları ile Afyonkarahisar İli, Emirdağ İlçesi, traverten ocaklarının CCR ve BCC'ye göre etkinlikleri tespit edilmiştir. Girdi olarak büyük iş makineleri (ekskavatör, lastik tekerlekli yükleyici, kaya kamyonu), tel kesme ve delik delme makineleri (sayalama, elmas tel kesme, delici) ve ocak içerisinde çalışan işçi sayıları kullanılırken, çıktı olarak üretim miktarı ve ciro verileri kullanılmıştır. Ocaklardan elde edilen veriler "DEA Frontier Free" adlı programa girilerek etkin ocaklar belirlenmiş, belirli bir miktardaki çıktı için minimum kaynak kullanımı tespit edilmiş ve potansiyel iyileştirmeleri irdelenmiştir.

Çizelge 1'de görüldüğü gibi Isparta ili, Sütçüler ilçesindeki ocaklardan ISP 7, ISP 8, ISP 9, ISP 10 ve ISP 11, CCR ye göre 5 adet etkin doğaltaş ocağı tespit edilmiştir. Diğerleri etkin olmayan ocaklar olarak görülmektedir. Bu doğaltaş ocaklarının girdilerinde ve çıktılarında fazlalık ya da azlık yoktur. Kaynaklarını israf etmeyen etkin ocaklar olup etkinlik sonuçları 1'dir. Etkin olmayan ocaklar ISP 1, ISP 2, ISP 3, ISP 4, ISP 5, ISP 6, ISP 12, ISP 13 olmak üzere 8 adet olup etkinlik sonuçları 1'in altındadır. Yani girdilerinde fazlalık veya eksiklik bulunmaktadır.

BCC etkinlik sonuçlarında ise ISP 4, ISP 5, ISP 6, ISP 7, ISP 8, ISP 9, ISP 10, ISP 11, etkin ocaklar olarak görülürken, ISP 1, ISP 2, ISP 3, ISP 12, ISP 13, etkin olmayan ocaklar olarak görülmektedir. Değişken getiri varsayımı altında 8 doğaltaş ocağının etkin, 5 doğaltaş ocağının ise etkin olmadığı görülmektedir.

Çizelge 1. Isparta ili, Sütçüler ilçesindeki ocakların BCC ve CCR'ye göre etkin ve etkin olmayan ocakların değerleri

Sıra Numarası	Karar Verme Birimi	CCR Etkinlik Sonucu	BCC Etkinlik Sonucu
1	ISP 1	0,67	0,95
2	ISP 2	0,73	0,92
3	ISP 3	0,83	0,88
4	ISP 4	0,66	1,00
5	ISP 5	0,85	1,00
6	ISP 6	0,88	1,00
7	ISP 7	1,00	1,00
8	ISP 8	1,00	1,00
9	ISP 9	1,00	1,00
10	ISP 10	1,00	1,00
11	ISP 11	1,00	1,00
12	ISP 12	0,86	0,90
13	ISP 13	0,83	0,83
ORTALAMA		0,87	0,96

Çizelge 2' de görüleceği üzere Afyonkarahisar İli, Emirdağ İlçesindeki ocaklarından EMR 5, EMR 9, olmak üzere 2 adet ocak CCR'ye göre etkin doğaltaş ocakları iken diğerleri etkin olmayan ocaklar olarak görülmektedir. Bu doğaltaş ocaklarının girdilerinde ve çıktılarında fazlalık ya da azlık olmayan, kaynaklarını israf etmeden kullanan, etkin ocaklardır. Etkinlik değeri 1 olup girdilerinde fazlalık veya çıktılarında azlık yoktur. Etkin olmayan ocak sayısı ise 10 adettir.

BCC'ye göre EMR 2, EMR 5, EMR 6, EMR 9, EMR 12 olmak üzere 5 adet ocak etkin görülürken, EMR 1, EMR 3, EMR 4, EMR 7, EMR 8, EMR 10, EMR11 olmak üzere 7 adet ocağın etkin olmadığı görülmektedir. Yani değişken getiri varsayımı altında 5 ocağın etkin, 7 ocağın ise, etkin olmadığı görülmektedir.

Çizelge 2. Afyonkarahisar İli, Emirdağ İlçesindeki ocakların CCR ve BCC' ye göre etkin ve etkin olmayan ocakların değerleri.

Sıra Numarası	Karar Verme Birimi	CCR Etkinlik Sonucu	BCC Etkinlik Sonucu
1	EMR1	0,65	0,78
2	EMR2	0,95	1,00
3	EMR3	0,59	0,91
4	EMR4	0,57	0,79
5	EMR5	1,00	1,00
6	EMR6	0,79	1,00
7	EMR7	0,61	0,91
8	EMR8	0,61	0,71

9	EMR9	1,00	1,00
10	EMR10	0,59	0,73
11	EMR11	0,56	0,80
12	EMR12	0,51	1,00
ORTALAMA		0,70	0,88

CCR modeli ölçeğe göre sabit getiri varsayımına dayandığı için etkinlik sınırı orijinden geçen doğru biçimindedir. BCC modelindeyse ölçeğe göre değişken getiri varsayımına dayandığı için parçalı doğrusal ve iç bükeydir. BCC modelinde bir bölge etkin bir bölge, CCR'nin bir alt kümesi olduğu için, CCR modelinde etkin bir karar verme birimi BCC modelinde de etkindir.

Potansiyel İyileştirmeler

Burada sadece BCC ye göre potansiyel iyileştirmeler belirtilmiş olup Isparta ili, Sütçüler ilçesindeki ocakların yapılabilecek iyileştirmeler Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 3 incelendiğinde; ISP 1 için iş makinesi sayısında 1 birimlik azalma ile %16,7'lik bir iyileşme sağlarken, kesim makinelerinde 1 birimlik azalma ile %7,7'lik değişim, çalışan sayısında ise 15 birimlik azaltma sonucunda %44,1'lik değişim sağlanmıştır. Bu faydalar sağlanırken etkin karar verme birimlerinden ISP 4'ü ve ISP 7'yi, kendine referans alarak aynı üretim hacminde etkili ocak haline gelmişlerdir. Dolayısıyla buradaki artık girdiler ile fazlalıklar yok edilerek kaynak israfı önlenmiştir. Azaltmalar sonucunda etkinlik sağlanmış ve girdiler en uygun noktayı bulmuştur. Diğer karar verme birimleri incelendiğinde de benzer sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 3. BCC'ye göre Isparta ili, Sütçüler ilçesindeki ocakların yapılabilecek iyileştirmeler ve referans kümeleri

KVB	Açıklama	İş Makinesi	Delme ve Kesim Makineleri	Çalışan Sayısı	Üretim m ³ /ay	Ciro	Referans Kümesi
ISP 1	M.D	6	13	34	1 740	226 200	ISP 4- ISP 7
	H. D	5	12	19	1 740	344 857	
	P. İ	16,7%	7,7%	44,1%	0,0%	52,5%	
ISP 2	M.D	5	16	32	1 680	319 200	ISP4-ISP7-ISP 8
	H. D	5	13	19	1 680	319 200	
	P. İ	0,0%	18,8%	40,6%	0,0%	0,0%	
ISP 3	M.D	7	28	46	2 680	536 000	ISP 7- ISP 10
	H. D	6	14	32	2 680	536 000	
	P. İ	14,3%	50,0%	30,4%	0,0%	0,0%	
ISP 12	M.D	7	15	30	2 250	360 000	ISP 7- ISP 10
	H. D	5	13	24	2 250	450 000	
	P. İ	28,6%	13,3%	20,0%	0,0%	25,0%	
ISP 13	M.D	8	27	53	3 150	472 500	ISP 9- ISP 10
	H. D	7	18	43	3 150	475 252	
	P. İ	12,5%	33,3%	18,9%	0,0%	0,6%	

M.D: Mevcut durum, H.D: Hedeflenen durum, P.İ: Potansiyel iyileştirme

Çizelge 4'te BCC'ye göre Afyonkarahisar ili, Emirdağ ilçesindeki ocakların yapılabilecek iyileştirmeler ve referans kümeleri görülmektedir. EMR 1 için iş makinesi sayısında 1 birimlik azalma

ile %22,50'lik bir iyileşme sağlanırken, kesim makinelerinde 3 birimlik azalma ile %24,11'lik değişim, çalışan sayısında ise 4 birimlik azaltma sonucunda %25'lik iyileşme sağlanmıştır. Aynı üretim hacminde etkin ocak haline gelmektedir. Dolayısı ile buradaki artık girdiler yok edilerek kaynak israfı engellenmektedir. Azaltmalar sonucunda etkinlik sağlanmış ve girdiler en uygun noktayı sağlamış olacaktır. Bu fayda sağlanırken EMR 1, etkin karar verme birimlerinden EMR 9'u ve EMR 12'yi, referans almaktadır. Diğer karar verme birimleri incelendiğinde de benzer sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 4. BCC'ye göre Afyonkarahisar ili, Emirdağ ilçesindeki ocakların yapılabilecek iyileştirmeler ve referans kümeleri.

KVB	Açıklama	İş Makinesi	Delme ve Kesim Makinesi	Çalışan Sayısı	Üretim m³/ay	Ciro	Referans Kümesi
EMR1	M, D	5	14	17	1250	625 000	EMR9-EMR12
	H, D	4	11	13	1250	835 469	
	P, İ	22,50%	24,11%	25,00%	0,00%	33,68%	
EMR3	M, D,	3	11	11	700	245 000	EMR9- EMR12
	H, D,	3	7	9	700	415 807	
	P, İ	0,00%	34,66%	21,59%	0,00%	69,72%	
EMR4	M, D,	4	16	15	900	342 000	EMR9- EMR12
	H, D,	3	8	10	900	568 411	
	P,İ	21,35%	47,27%	32,50%	0,00%	66,20%	
EMR7	M.D	3	9	10	700	266 000	EMR9-EMR12
	H. D	3	7	9	700	415 807	
	P. İ	0,0%	20,14%	13,75%	0,00%	56,32%	
EMR8	M.D	5	12	10	700	280 000	EMR 6- EMR 9
	H. D	3	8	7	700	335 543	
	P. İ	31,30%	37,32%	29,35%	0,00%	19,84%	
EMR10	M.D	6	13	14	950	617 500	EMR6-EMR9-EMR 12
	H. D	4	9	10	1 027	617 500	
	P. İ	36,22%	27,49%	27,49%	8,06%	0,00%	
EMR11	M.D	4	9	11	700	420 000	EMR9-EMR12
	H. D	3	7	9	705	420 000	
	P. İ	31,48%	19,76%	21,22%	0,78%	0,00%	

M.D: Mevcut durum, H.D: Hedeflenen durum, P.İ: Potansiyel iyileştirme

SONUÇLAR

Bu çalışmada Isparta ili, Sütçüler ilçesindeki doğaltaş ocaklarının veri toplama aşamasında yapılan yerinde incelemeler ve bu inceleme sonucunda toplanan veriler, program sonuçları ile beraber değerlendirildiğinde ISP 4, ISP 5, ISP 6, ISP 7, ISP 8, ISP 9, ISP 10 ve ISP 11 numaralı karar verme birimlerinin çalışma alanlarını 30,000- 90,000 m² gibi geniş bir alanda çalıştığı tespit edilmiştir. Basamak genişliklerini 14 – 20 m gibi uzun tuttıkları, kesim boylarının basamak genişliklerine bağlı olarak (8m x 15m x 3m) gibi uzun planladıkları, ocak verimlerinin ise yüksek olduğu görülmüştür.

Emirdağ ilçesindeki traverten ocaklarından toplanan veriler, saha incelemesi ve program sonuçları ile genel olarak değerlendirildiğinde ise Sütçüler ilçesindeki değerlendirmelere benzer sonuçlar ortaya çıkmaktadır. EMR 2, EMR 5, EMR 6, EMR 9 ve EMR 12'nin çalışma alanlarına bakıldığında 25000-95000 m²'lik geniş bir alanda üretim yaptıkları, basamak genişliklerini 20 – 30 m gibi diğer ocaklara

göre geniş tuttıkları görülmüştür. Kesim boylarını genel olarak (7m x 15 m x 3m) şeklinde uzun planladıkları ve ocak verimlerinin arasında değiştiği görülmüştür.

Traverten veya bej doğaltaş ocakları, çalışma alanlarını geniş tutmaları, kademe genişlik ve kesim boylarının uzun tutmaları performanslarını artırmaktadır. Zira kısa kesimlerde kesimin çabuk bitmesine müteakip yıkım işlemlerinde makinelerin atıl olarak çok fazla süreler beklediği görülmüştür. Bu işlemler her seferinde tekrar yapılmakta ve üretim kapasitesini düşürmektedir. Geniş çalışma alanlarında kesim hazırlama ve kesim sürelerinde, alanda bir kısıtlama olmadığından, daha rahat plan yapılabilmektedir. Bir bölgede kesim bitmeden diğer bölgede kesim hazırlıkları ve organizasyonları yapılabilmektedir ve bu işlemler alana bağlı olarak birbirini engellememekte ve makineler atıl kalmamaktadır. İş makineleri geniş çalışma alanlarında, aynalardan söküm, yıkım, yıkılan kütlelerin çekilmesi, blok taşıma gibi işlemlerde manevra kabiliyetlerini arttırmakta ve verimli olarak çalışmaktadır. Kısa kademe genişliklerindeki çalışmalarda makine ve ekipmanların çalışması, yıkım, söküm, taşıma gibi işlemlerde üretimi aksatmaktadır. İki makinenin yan yana çalışmasını engellediğinden dolayı iş makineleri de atıl kalmaktadır.

Etkin olmayan doğaltaş ocakları için girdilerinin azaltılması gerektiği ortaya çıkmış olup kaynak israfı bulunmaktadır. Etkinliğin sağlanabilmesi için doğaltaş ocaklarındaki girdilerin azaltılması konusunda performans iyileştirmelerini yapılmalıdır. Uygun makine ekipman, işçi vb, girdiler ile maksimum faydalar sağlanması amaçlanmalıdır. Üretim yapan ocaklar, kaynaklarını nasıl kullandıklarını şu anki mevcut durumlarını, buradaki potansiyellerini fark edebilmeli ve buna göre strateji belirlemelidir.

KAYNAKLAR

Akal, Z. (1993). İşletmelerde Performans Ölçüm ve Denetimi: Çok Yönlü Performans Göstergeleri. MPM Yayınları.

Aras, G. Gencer, C. (2011). Muğla İlindeki Mermer İşletmelerine Yönelik Veri Zarflama Analizi Örnek Olayı. İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik Dergisi, (12), 139–153.

Bakırcı, F. (2006). Üretimde Etkinlik ve Verimlilik Ölçümü, Veri Zarflama Analizi, Teori ve Uygulama. Atlas Yayınları.

Charnes, A., Cooper, W. W. Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units. European Journal of Operation Research, 2(3), 429–444.

Cooper, W. W., Seiford, L. M. Zhu, J. (2011). Handbook On Data Envelopment Analysis. Springer Science + Business Media.

Depren, Ö. (2008). Veri Zarflama Analizi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

İnan, A. (2000). Banka Etkinliğinin Ölçülmesi ve Düşük Enflasyon Sürecinde Bankacılıkta Etkinlik. Bankacılar Dergisi, (34), 82–97.

Karasoy, H. (2000). Veri Zarflama Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kayalıdere, K. Kargın, S. (2004). Çimento ve Tekstil Sektörlerinde Etkinlik Çalışması ve Veri Zarflama Analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 6(1), 196–219.

Oruç, K. O., Çuhadar, M., Kılınç, M. Osmancık, S. (2014). Veri Zarflama Analizi ile Mermer İşletmelerinin Etkinli Ölçümü. 15. Uluslararası Ekonomi Sempozyumu, 22-24 Mayıs Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Özden Ü.H. (2008). Veri zarflama analizi (VZA) ile Türkiye’deki vakıf üniversitelerinin etkinliğinin ölçülmesi. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 37(1), 167–185.

Öztürk, A. (2009). Yöneylem Araştırması. Ekin Yayınevi.

Saraçlı, S., Kılınç, İ. Gazeloğlu, C. (2013). An Application Of Data Envelopment Analysis An Marble Factories. Journal Of Inequalities And Applications, (139), 1–8.

Üte, E. (2002). Veri Zarflama Analizi Tekniği ile Sağlık Sektörünün Operasyonel Etkinliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE DOĞALTAŞ SELEKSİYONUNDA YÖNTEM ÖNERİSİ

NEW METHOD PROPOSAL FOR NATURAL STONE SELECTION BY USING IMAGE PROCESSING

Ö. Akkoyun*, Y. Fırat

**Dicle Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü*

oakkoyun@gmail.com

ÖZ

Yapay zekâ (YZ) her geçen gün hayatımızın içerisine biraz daha girmektedir. YZ'nin uygulandığı alanlardan birisi de görüntü işlemedir. Görüntü işleme birçok alanda olduğu gibi doğaltaş sektöründe de kullanılmaktadır. Yıllar önce mermer renklerini bilgisayar ortamına aktarmak ile başlayan çalışmalar önemli ilerlemeler kat ederek mermer kalite seleksiyonunda uygulanma aşamasına gelmiştir. Bu çalışmada mermer renk seleksiyonunda görüntü işleme süresinin kısaltılması ve mermer fabrikaları işlem hızına uydurulması için çalışmalar ve öneriler yapılmıştır. Bu hedef kapsamında önce YSA destekli seleksiyon yapan bir model oluşturulmuş, ardından, işlem süresini kısaltmak için iki farklı yöntem önerilmiş ve denenmiştir. Çalışma sonucunda, önerilen yöntem ile örnek doğaltaşa ait üç farklı seleksiyonun ayırma işlem sürelerinin ortalama %70 oranında kısaltıldığı ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Yapay zekâ, Görüntü işleme, Doğaltaş seleksiyonu

ABSTRACT

Artificial intelligence (AI) is increasingly becoming a part of our daily lives. One of the fields where AI is applied is image processing. Like in many other sectors, image processing is also used in the natural stone industry. What began years ago with transferring marble colors to digital environments has made significant progress and has now reached the stage of being applied to marble quality selection. In this study, efforts and suggestions have been made to shorten the image processing time in marble color selection and to adapt it to the processing speed of marble factories. Within this scope, first, a model supported by artificial neural networks (ANN) for selection was developed. Then, two different methods were proposed and tested to reduce the processing time. As a result of the study, it was demonstrated that the proposed method reduced the processing time for distinguishing three different selections of a sample natural stone by an average of 70%.

Keywords: Artificial Intelligence, Image processing, Natural stone selection

GİRİŞ

Görüntü işleme son zamanlarda oldukça hızlı bir şekilde hayatımızın her alanına giren yapay zekanın farklı uygulama bir alanı olup telefonlarımızın yüz tanıma özelliklerinden trafikte araç tanıma sistemlerine, tıpta hastalıklı hücrelerin erken teşhisine kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Sadece madencilik ve doğaltaş alanında yapılan çalışmaların bazıları şunlardır; Alandaki ilk çalışmalardan birisinde (Martinez-Alajarin Juan et al., 2005) doğaltaş işleme hattında plakaların sınıflandırılması için gerçek zamanlı otomatik bir sistem önerisinde bulunulmuştur. Bir başka çalışmada araştırmacılar, hemen bütün esnek hesaplama yöntemlerini mermer numuneleri üzerinde denedikten sonra genetik

algoritma yöntemi kullanarak bulanık sınıflayıcıları eğittikleri çalışmada başarılı sonuçları elde ettiklerini ifade etmişlerdir (Sousa and Pinto, 2004). Bir başka çalışmada üç gruba ayrılan mermer grupları bir YSA modeli ile başarılı bir şekilde sınıflandırılabilmiştir (Luis Delgado et al., 2003).

Bir başka çalışmada mermer bloklarının otomatik sınıflandırılması için farklı görüntü işleme ve YSA teknikleri incelenmiş ve uygulanan farklı tekniklerin karşılaştırmaları yapılmıştır (Ardalı, 2008) başka bir çalışmada ise karo mermerler YSA destekli olarak sınıflandırılmıştır (Selver ve Akay, 2009). Başka bir çalışmada granit verileri spektrometre yardımı ile elde edilmiş ve destek vektör makineleri ile sınıflandırılmıştır (Araújo et al., 2010). Yeni bir hiyerarşik sınıflandırma yöntemi mermer bloklarını kalite bazlı sınıflandırmak için önerilmiş, önerilen yöntem YSA ile karşılaştırılarak sınıflama başarısının daha yüksek olduğu ifade edilmiştir (Doğan and Akay, 2010). Başka bir çalışmada, görüntü işleme teknikleri mermer kalite sınıflaması için kullanılabilir mi sorusuna cevap aranmış ve mermer kalite sınıflaması işleminin düşünüldüğünden karmaşık bir süreç olduğunu ve tam bir kalite seleksiyonu için sadece renk ayırmasına dayanan tekniklerden daha fazlasına ihtiyaç olduğu ifade edilmiştir (Akkoyun, 2010). Ayrıca mermerlerin özel farklılıkları ve görüntülerin eldesi sırasında yaşanan sorunların (gölge parlama vb.) görüntü işleme tabanlı seleksiyon çalışmalarına olumsuz etkileri tartışılmıştır (Yaman, 2015).

Görüntü işleme ve YSA, tek eksenli basınç dayanım değerlerini tahmin etmek için küp şeklindeki mermer numunelerinde denenmiş (Bişkin, 2011), traverten numunelerini sınıflandırmak için (Abadi ve Banihashemi 2015), mermerleri sınıflandırmak için (Türkmen, 2017), mermer yüzey pürüzlülüğünün tespiti için (Turhal vd., 2015) ve Graffiti (duvar yazısı) ile kirletilen mermerden yapılmış heykel, tarihi yapı ve diğer sanat yapılarının temizlenmesinde kullanılan water-jet (su jeti) teknolojisinin optimum çalışma parametrelerini belirlemek için kullanılmıştır (Careddu and Akkoyun, 2016). Bir çalışmada doğaltaşların üzerindeki damar desenleri incelenmiş ve bir sınıflandırma yöntemi geliştirilmiştir. Bu çalışmada damar desenleri ile benzer özellikler gösteren kırıkların tespiti için de ayrıca algoritma geliştirildiği ifade edilmiştir (Kemaloğlu, 2017).

Bir çalışmada YSA ile sınıflamanın en iyi sonucu verdiği sonucuna varılmış (Temiz, 2018), buna benzer bir çalışmada 600 numune görseli YSA kullanarak sınıflandırılmıştır (Torun et al., 2019). Başka bir çalışmada YSA yerine derin öğrenme yöntemi tercih edilmiş (Pençe and Çeşmeli, 2019; Karaali ve Eminağaoğlu, 2020) ancak bu çalışmaların hiçbirinde çalışma süresi, sınıflandırma süresi ya da mermer üretim süresindeki hız ile uyumunun tartışılması gibi bir değerlendirme yapılmamıştır.

Turan (2018) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, mermer görüntülerinin sınıflandırılmasında çeşitli alt teknikler kullanılmış ve en başarılı sonucun karar ağacı yöntemiyle elde edildiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada, geliştirilen ara yüzün sanayiye entegrasyonu açısından gömülü sistem tabanlı bir çözümün daha verimli olacağı da vurgulanmıştır. Önder (2019) ise mermer seleksiyonunda makine öğrenmesi tekniklerini kullanmış, işlem süresine değinmiş ancak bu süreyi yalnızca bilgisayar işlemcilerinin performansı üzerinden değerlendirmiştir; farklı işlemciler karşılaştırılmış olmasına rağmen, bir mermer işleme tesisindeki işlem sürati ve seleksiyon süresi dikkate alınmamıştır. Öte yandan, Topalova ve Tzokev (2010) diğer çalışmalardan farklı olarak, gerçek zamanlı ve işlem süresini de içeren bir uygulama gerçekleştirmişlerdir.

Bunların dışında bazı çalışmalarda farklı kökene (bu nedenle de farklı renk ve desene) sahip doğaltaşların görüntü analizi ile seleksiyonu yapılmış ancak seleksiyon masalarında farklı türden doğaltaşların ayrılması gibi bir durum olmadığı için bu çalışmaların uygulamada bir karşılığı olmadığından bu çalışmalara burada değinilmemiştir.

Yukarıda sunulan literatürden de anlaşılacağı üzere, doğaltaşların görüntü işleme ile sınıflandırılması süreci tarihsel olarak şu aşamalardan geçmiştir: Görsellerin sayısallaştırılması, renkli görsellerin gri tonlamaya dönüştürülmesi, farklı kökenlere sahip doğaltaşların sınıflandırılması üzerine yapılan ilk denemeler ve son olarak aynı kökene sahip taşların yapay sinir ağları (YSA) tabanlı olarak

sınıflandırılması. Bu gelişmelere rağmen, “görüntü işleme ile mermer seleksiyonu” çalışmalarının sahada yaygın biçimde uygulanabilmesi için iki temel sorunun aşılması gerekmektedir. Bunlardan ilki, YSA destekli yazılımların genellikle Matlab gibi pahalı ve kullanımı karmaşık lisanslı programlara ihtiyaç duymasındır. Bu tür yazılımlar, ortalama bir mermer fabrikası çalışanı tarafından kolaylıkla kullanılamamaktadır. Bu sorunun çözümü, daha sade ara yüzlere sahip gömülü sistemlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. İkinci sorun ise, literatürde başarıyla raporlanan çalışmaların çoğunun mermer fabrikalarının belirli bir üretim hızına sahip iş akışını yakalayamamış olmasıdır. Mevcut çalışmaların neredeyse tamamı başarı kriteri olarak doğru sınıflandırmayı esas almış, ancak bu sınıflandırmanın ne kadar sürede gerçekleştirildiği konusunda değerlendirme yapmamıştır. Oysa ki, bu tür sistemlerin sektörde uygulanabilirliğini belirleyen en önemli faktörlerden biri de işlem süresidir. YSA destekli seleksiyon yöntemlerinin doğruluk oranı giderek artsa da bu işlemlerin fabrika iş akışına uygun sürede tamamlanıp tamamlanmadığı ve ortalama ne kadar zaman aldığı soruları hâlâ net bir şekilde yanıtlanabilmiş değildir.

Bu çalışmada, işlem süresine odaklanılmış, YSA tabanlı görüntü işleme teknikleri ile mermer seleksiyonu yapan çalışmalarda işlem süresini kısaltacak ve bu yolla onları daha uygulanabilir kılacak yöntem önerilmiş ve denenmişlerdir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Görüntü işleme aşamaları kabaca, görüntünün elde edilmesi, yani görselin sayısal ortama (digital) aktarılması ve bu sayısal verinin çeşitli matematiksel, istatistiksel ya da esnek hesaplama yöntemleriyle (YSA gibi) işlenerek sonuçların elde edilmesi aşamalarından oluşur. En önemli aşama olan verinin sağlıklı şekilde elde edilmesi hedef cismin ve ondan elde edilen görselin boyutlarıyla doğrudan ilişkilidir ve bu işlem, her bir pikselin konum ve renk değerlerinin elde edilip kaydedilmesini kapsar.

Görsel veriler, her bir piksel için üç adet renk değeri ile iki adet konum bilgisi (koordinat) olmak üzere toplam beş veri ögesinin okunması ve kaydedilmesi sürecini kapsamaktadır. Yalnızca 10x10 cm boyutlarında ve ortalama çözünürlükte bir görüntü kaydedici ile elde edilen bir görselin yaklaşık 90.000 piksel içerdiği göz önünde bulundurulduğunda, bu boyuttaki bir mermer el numunesinin görsel verisi yaklaşık 450.000 ayrı veriyi içermektedir. Bu durum, görüntü işleme sürecinde piksel verilerinin elde edilmesi ve kaydedilmesi adımının toplam süre içerisinde kayda değer bir yer tuttuğunu göstermektedir. Görüntü işleme uygulamalarında genel yaklaşım, görsele ait tüm piksellerin bir veri seti olarak değerlendirilmesi ve işlemlerin bu bütünlük üzerinden gerçekleştirilmesidir.

Bu çalışmada, sürenin azaltılması için, tüm piksellerinin taranıp veri toplanması yerine, belli sayıdaki piksellerin temsili olarak alınması önerilmiştir. Temsili piksellerin seçiminde iki farklı yol izlenmiştir; tüm görseli temsil edecek şekilde rastgele pikseller seçilmesi ve alternatif olarak belli bir hat üzerinden veri seçilmesi diğer piksellerin işleme katılmaması. Bu aşamadan sonra, karşımıza şu soru çıkmaktadır; rastgele kaç tane piksel alırsak tüm görseli temsil etmiş olur? Ya da kaç tane hat üzerinden veri toplarsak tüm görseli temsil etmiş olur? Bu sorulara cevap verebilmek şu adımlar izlenmiştir;

1. Çalışmanın yapılacağı doğaltaşın seçilmesi,
2. Seçilen doğaltaşa ait seleksiyonların tespiti ve uygun numunelerin elde edilmesi,
3. Literatürde yapılanlara benzer şekilde YSA modelinin oluşturulması,
4. Doğaltaş numunelerinin YSA modeli ile seleksiyonunun gerçekleştirilmesi,
5. Aynı numunelerden farklı oranlarda rastgele veri toplanması ile temsili verinin elde edilmesi,
6. Aynı numunelerden farklı sayıdaki hatlardan veri toplanması ile temsili verinin elde edilmesi,
7. Rastgele toplanan veriler ile YSA modellerinin ayrı ayrı çalıştırılıp seleksiyon yapılması,
8. Hatlardan toplanan veriler ile YSA modellerinin ayrı ayrı çalıştırılıp seleksiyon yapılması,

9. Sonuçların değerlendirilmesi,

Çalışmada kullanılmak üzere, aynı boyutlarda toplam 36 adet doğaltaş numunesi hazırlanmıştır. Numuneler, 10x10 cm ölçülerinde el numunesi şeklinde kesilmiş olup tamamı fayans hattında cilalanmış son ürün formundadır. Seçilen doğaltaşın üç farklı seleksiyonu bulunmaktadır: açık, orta ve koyu (Şekil 1). Numunelere ait görseller, bu mermeri uzun yıllardır işleyen bir fabrikanın kalite kontrol uzmanlarına gösterilmiş ve kendilerinden bu görselleri sınıflandırmaları istenmiştir. Böylece, numuneler uzman değerlendirmesine göre üç ayrı sınıfa ayrılmıştır.



Şekil 1. Çalışmanın yapıldığı doğaltaşın açık, orta ve koyu renk seleksiyonları

Numune hazırlama ve uzman değerlendirmesiyle sınıflandırma işlemleri tamamlandıktan sonra, literatürde sıklıkla kullanılan ve doğaltaş seleksiyonunda başarılı sonuçlar verdiği bildirilen YSA yöntemi tercih edilmiştir. Model oluşturma sürecinde, her bir numuneye ait görseller 300x300 piksel boyutlarında elde edilerek bilgisayar ortamına aktarılmış; ardından, yazar tarafından geliştirilen görüntü işleme yazılımı aracılığıyla işlenerek her bir görsel için toplam 90.000 piksel verisi elde edilmiştir. Bu çalışmaya özel olarak yazılıma ek fonksiyonlar eklenmiş ve görüntü tarama ile veri toplama süresi hassas şekilde hesaplanıp kayıt altına alınacak biçimde yazılım yeniden derlenmiştir. Daha sonra, her bir görsel için veriler işlenerek YSA modelinde kullanılacak öznitelik vektörünün belirlenmesi amacıyla korelasyon analizi yapılmıştır. Bu analiz ile amaçlanan, elde edilen parametrelerden hangilerinin seleksiyon sınıflaması üzerinde olumlu ya da olumsuz etkiye sahip olduğunu belirleyerek, yalnızca anlamlı olanların YSA'ya girdi olarak alınmasını sağlamaktır. Yapılan korelasyon hesaplamaları sonucunda; ortalama, medyan ve mod parametrelerinin çıktı değişkeniyle olan korelasyon katsayıları sırasıyla 0,77, 0,81 ve 0,84 olarak bulunmuş ve bu üç parametrenin öznitelik vektöründe yer almasına karar verilmiştir. Literatürde doğaltaş seleksiyonu konusunda yapılan birçok başarılı çalışmanın YSA tabanlı olduğu ve çoğunlukla Matlab arayüzü kullanılarak gerçekleştirildiği görülmektedir (Ershad, 2011; Kemaloğlu, 2017; Temiz, 2018; Turan, 2018; Torun et al., 2019; Önder, 2019; Ökten vd., 2021; Karaali, 2021; Elmas, 2022).

Bu çalışmada da Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli, öznitelik vektöründen elde edilen üç girdi parametresi (ortalama, mod ve medyan) ile bir çıktı parametresi (renk sınıfı) kullanılarak oluşturulmuş ve çalıştırılmıştır. Girdi verileri, 36 adet numunenin yüzeylerinin tamamının taranması sonucu elde edilen veri setinden oluşturulmuştur. Bu veri setinin %70'i modelin eğitimi (training), %15'i doğrulama (validation) ve kalan %15'i ise sinama (testing) sürecinde kullanılmıştır. Modelin çıktıların, uzmanlar tarafından belirlenen gerçek değerlerle olan uyumunu değerlendirmek amacıyla regresyon katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen korelasyon değerleri sırasıyla eğitim için 0.99, doğrulama için 0.94, test için 0.97 ve tüm model için 0.99 olarak bulunmuştur. Model çıktıları; 1, 2 ve 3 sayısal ifadeleriyle sırasıyla koyu, orta ve açık seleksiyon sınıflarını temsil etmektedir (Çizelge 1).

Çizelge1. Model Sonuçları ve Korelasyon Değerleri

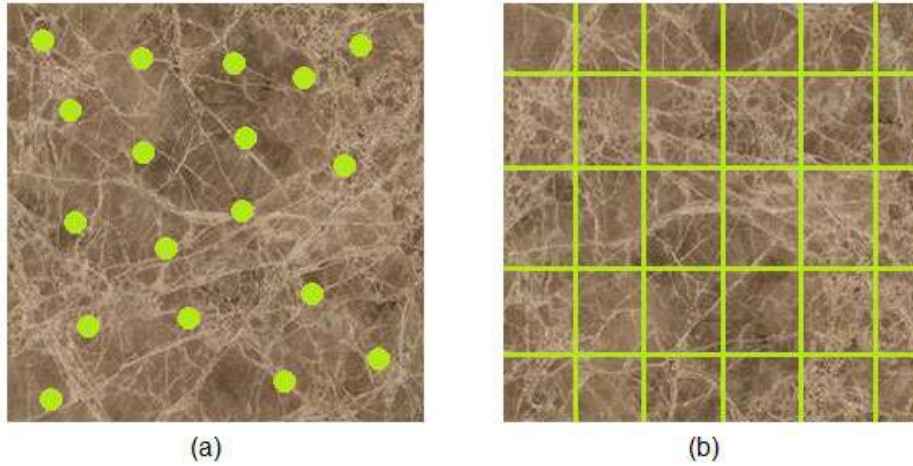
Girdiler			Gerçek Değer	YSA-model Çıktısı
Ort.	Mod	Medyan		
112	99	106	1	1,05
88	77	86	1	1,00
76	62	71	1	1,00
120	95	114	1	1,02
115	98	108	1	1,03
116	121	117	2	2,31
136	135	135	2	2,04
158	151	155	2	2,12
113	111	114	2	1,83
123	127	123	2	2,02
161	181	163	3	2,99
144	130	141	3	2,87
169	161	166	3	2,97
161	182	163	3	2,99
161	187	165	3	2,99

Temsili Veriler ve YSA Modelleri

Doğaltaş numunelerinin tüm yüzeylerinin taranarak veri olarak kullanıldığı YSA modeli teorik olarak başarılı sonuçlar üretmiştir ki bu sonuç literatür ile uyumludur. Ancak sadece 10 cm x10cm

boyutundaki el numuneleri için bu işlem ortalama 105 saniye (yaklaşık iki dakika) süre almıştır. İki boyutlu numunelerden bahsettiğimiz için numune iki katına çıkınca veri sayısı dört katına, numune boyutu 4 katına çıkınca veri sayısı 16 katına çıkmaktadır ki bu da 40 cm x 40 cm boyutlarındaki doğaltaş numunesi için 1680 saniye ya da 28 dakika yani yaklaşık yarım saat demektir.

Bu süreleri kısaltmak amacıyla, tüm yüzeyin taranması yerine, doğaltaş numunesi yüzeyinden rastgele seçilen piksellerden temsili veri toplanması ya da belirli hatlar üzerinden veri alınması şeklinde iki alternatif yöntem önerilmiştir. Bu yaklaşımlar doğrultusunda uygun veriler toplanmış ve ilgili modeller oluşturulmuştur. Rastgele veri oranlarının, tüm yüzey taramasıyla elde edilen model sonuçlarına ne kadar yakın olduğunu belirlemek için görüntü işleme yazılımı, istenen oranlarda rastgele veri toplayacak şekilde yeniden yapılandırılmıştır. Bu kapsamda %1 ile %90 arasında değişen 14 farklı rastgele veri oranında veri toplanmıştır. Örneğin, Rs-1 yalnızca tüm piksellerin %1'ini temsil ederken, Rs-30 tüm piksellerin %30'una denk gelen rastgele veriyi ifade etmektedir. Benzer şekilde, tüm pikseller yerine, görsel üzerinde tanımlanacak belirli hatlar üzerinden veri alınması yöntemi de değerlendirilmiştir. Bu amaçla, görselin yalnızca iki hatla dört bölgeye ayrıldığı (Kr-2) durumdan başlayarak, 90 hatla yüzlerce küçük kareye bölündüğü (Kr-90) duruma kadar uzanan 15 farklı alternatif için yazılım yeniden kodlanmış ve bu doğrultuda veri toplanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Doğaltaş yüzeyinden rastgele (a) ve hat üzerinden (b) veri toplama (temsili)

Tüm numune yüzeylerinden rastgele veri toplanması ile ilgili olarak 14 farklı şekilde, hatlar üzerinden veri toplanması ile ilgili olarak da 15 numune üzerinden 29 (14+15) değişik biçimde veri toplanmıştır. Her bir 29 farklı alternatif veri toplama şekli için yeniden 29 farklı YSA modeli oluşturulmuş ve çalıştırılmış ve veriler elde edilmiştir. Çalışmanın en önemli sonuçları işlem süreleri ile ilgili olanlardır. Bu nedenle geliştirdiğimiz yazılım, her bir 29 işlem için hassas bir şekilde süre tutmuş ve kayıt altına almıştır.

Çizelge 2. Rastgele veriler ile gerçek veri korelasyonu

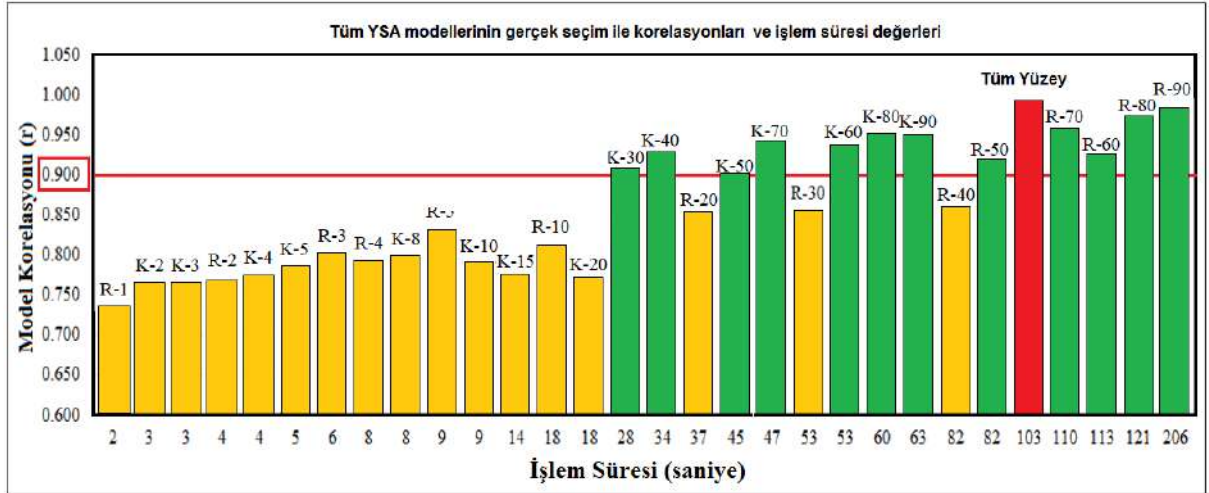
Numune	Rastgele veriler YSA modelleri ile gerçek seleksiyon korelasyonu (r)
RS-01	0,74

Çizelge 3. Hat verileri ile gerçek veri korelasyonu

Numune	Hat verileri YSA modelleri ile gerçek seleksiyon korelasyonu (r)
KR-2	0,77

RS-02	0,77	KR-3	0,77
RS-03	0,80	KR-4	0,78
RS-04	0,79	KR-5	0,79
RS-05	0,83	KR-8	0,80
RS-10	0,81	KR-10	0,79
RS-20	0,86	KR-15	0,78
RS-30	0,86	KR-20	0,77
RS-40	0,86	KR-30	0,91
RS-50	0,92	KR-40	0,93
RS-60	0,93	KR-50	0,90
RS-70	0,96	KR-60	0,94
RS-80	0,98	KR-70	0,94
RS-90	0,99	KR-80	0,95
		KR-90	0,95

Literatürde birçok çalışmada ifade edildiği gibi doğaltaş numunelerinin yüzeylerinin tümünden veri toplanarak YSA modeli oluşturulmuştur. Çalışma bu aşamada literatürde yapılan çalışmaları doğrulamıştır. Ardından tüm yüzey taraması yerine 14 değişik oranda rastgele veri toplanarak modeller oluşturulmuş, daha sonra 15 değişik şekilde karelerden hatlardan veri toplanmış ve modeller oluşturulmuştur. Toplam 30 modele ait işlem süresi ve tam yüzey taramasına göre elde edilen benzerlik düzeyini ifade eden korelasyon değerleri grafiksel olarak sunulmuş ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu grafikte, hem üretim hattından alınan veriler (Kr kodlu) hem de rastgele seçilerek toplanan veriler (Rs kodlu) birlikte değerlendirilmiştir. Grafikte yatay eksen, model ile gerçek seleksiyon sonuçları arasındaki korelasyon katsayısını göstermekte olup referans olması açısından $r=0,9$ düzeyinde bir çizgi eklenmiştir. Dikey eksen ise işlem süreleri saniye cinsinden belirtilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Önerilen Tüm Modellerin Gerçek Seleksiyon ile İlişkisi ve İşlem Süreleri

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'te mermer numunelerinin tüm yüzeyinin tarandığı numune kırmızı ile verilmiştir. Literatürde mermer seleksiyonunun YSA ile ya da benzer araçlarla yapıldığı çalışmaların tümünde numunelerin tüm yüzeyleri taranmıştır ve Şekil3'deki kırmızı sütun bu numuneyi temsil etmektedir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

1. Çalışmada kullanılan istatistik parametrelerinden olan standart sapma, renk farkı, dağılımın çarpıklığı, dağılımın basıklığı, en büyük renk değeri ve en küçük renk değeri parametrelerinin seleksiyonda ciddi bir katkısının olmadığı bulunmuştur.
2. Yine önemli istatistik verilerden olan mod, medyan ve ortalama değerlerinin seleksiyonda etkili olduğu sonucuna varılmıştır.
3. Literatürde yapıldığı gibi numune yüzeyinin tüm yüzeyinin taranması işlemi 10x10cm numuneler için 103 saniye sürmüştür. Bu değer Pentium(R) Dual-Core CPU 2.50GHz, 3GB RAM, 64bit donanıma sahip bilgisayarda ölçülmüştür.
4. YSA modelleri çalıştırıldığında çok yüksek korelasyon değerleri (0.9921) ile sonuçlar elde edilmiş ve modelin başarı sağladığı sonucuna varılmıştır. Model test edildiğinde de gerçek sonuçlara çok yakın sonuçlar elde edilerek modelin güvenilirliği kanıtlanmıştır.
5. Çalışma sonucunda en iyi korelasyon değerleri RS-90 (0,987), RS-80 (0,975), RS-70 (0,959), ardından KR-80 (0,954) ve neredeyse aynı korelasyon değeri ile KR-90 (0,953) veri toplama işlemlerinden elde edilmiştir. Numune yüzeyinin %90 gibi neredeyse tamamından veri toplayan bu işlemlerde yüksek korelasyon elde edilmesi beklenen bir sonuçtur.
6. İşlem süresi tüm yüzey taramasından daha uzun olan işlemlerin de olması başlangıçta garip gibi görünebilir (Şekil3 kırmızı sütunun sağ tarafındaki veriler). Bir yüzeyin belli bir miktarının taranması aynı yüzeyin tamamının taranmasından nasıl daha uzun sürebilir diye düşünülebilir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; Numune yüzeyinin tümünün taranması satır ve sütunları belli bir matriste sıralı bir şekilde yapılırken rastgele veri toplam işlemi rastgele seçilen piksellerden veri alınması şeklinde yapılmaktadır. Tüm yüzeyin taranması süresinden daha fazla süre alan numuneler numune yüzeylerinden %70 ve %80 oranında rastgele veri toplamak için kodlanmıştır. Bu veri toplama işlemi rastgele seçilen verilerden alınırken daha önce verisi alınmış piksele denk geldiğinde aynı veriyi ikinci kez almamak için bir alt yordam yazılarak piksel koordinatları eşleştğinde veri silinip rastgele veri toplama işlemi yeniden başlamaktadır. Bu nedenle de rastgele oranı arttıkça aynı piksele yeniden uğrama olasılığı da arttığı için yazılım, verisi alınmamış pikselleri ararken uzun

- süreler harcamak zorunda kalmıştır. Sürelerin tüm yüzeyin taranması süresinden fazla çıkmasının nedeni budur.
7. KR-40 yöntemi ile veri toplama işlemi 34 saniyede gerçekleştirilmiş ve 0,93 korelasyon ile neredeyse aynı sonuçları üretmiş, başka bir deyişle, %67 oranında süre tasarrufu sağlamıştır.
 8. Kr-30 veri toplama yönteminde korelasyon +0,9 bulunmuş ve veri toplama işlemi sadece 28 saniyede tamamlanmıştır (süre tasarrufu %72).
 9. Rs-5 veri toplama yönteminde korelasyon + 0,8 olarak gerçekleşmiş ve sadece 9 saniye sürmüştür (süre tasarrufu %91).
 10. Bu çalışmada, 10x10 cm boyutlarında görsel numuneler kullanılmıştır. Ancak doğaltaş işleme tesislerinde kullanılan ürünlerin gerçek boyutları, bu numunelere kıyasla oldukça büyüktür. Önerilen yöntemin gerçek çalışma koşullarında uygulanması durumunda, daha büyük yüzey alanlarına sahip örneklerde süre tasarrufunun orantılı olarak daha da artacağı öngörülmektedir. Bu bağlamda, geliştirilen yöntem sayesinde görüntü işleme temelli renk seleksiyonu uygulamasının, süre kısıtlarının bulunduğu ve sürekli akan bant sistemlerinin kullanıldığı doğaltaş işleme tesislerinde etkin biçimde çalışmasına yönelik önemli bir ilerleme kaydedildiği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abadi, M. S. E., Banihashemi, N. (2015). Automatic Classification of Travertine Stones Based On Sum And Difference Histograms Algorithm. 2015 9th Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP).
- Akkoyun, Ö. (2010). An Evaluation of Image Processing Methods Applied To Marble Quality Classification. 2010 2nd International Conference on Computer Technology and Development (ICCTD 2010).
- Araújo, M., Martínez, J., Ordóñez, C., Vilán, J. A. (2020). Identification of Granite Varieties from Colour Spectrum Data. *Sensors*, 10(9), 8572–8584. <https://doi.org/10.3390/s100908572>
- Ardalı, E. (2008). Classification Of Marble Textures Using Neural Networks and Image Processing Methods, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bişkin, O. T. (2011). Determination Of Qualitative And Quantitative Properties Of Natural Stones Using Signal and Image Processing Techniques, Master Thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Careddu, N., Akkoyun, Ö. (2016). An investigation on the efficiency of water-jet technology for graffiti cleaning. *Journal of Cultural Heritage*, 19, 426–434.
- Doğan, H., Akay, O. (2010). Using AdaBoost classifiers in a hierarchical framework for classifying surface images of marble slabs. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 8814–8821.
- Elmas, B. (2022). Classification varieties of marble and granite by convolutional neural networks with transfer learning method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(2), 985–1001.
- Ershad, S. F. (2011). Color Texture Classification Approach Based on Combination of Primitive Pattern Units and Statistical Features. *The International Journal of Multimedia & Its Applications*, 3(3), 1–13.

Karaali, İ. (2021). A Deep Learning Model for Marble Quality Classification, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karaali, İ., Eminağaoğlu, M. (2020). A convolutional neural network model for marble quality classification. SN Applied Sciences, 2(1733).

Kemaloğlu, N. (2017). Traverten Plakaların Damar Yapılarına Göre Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Sınıflandırılması ve Kalite Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Luis-Delgado, J. D., Martinez-Alajarin, J., Tomás-Balibrea, L.-M. (2003). Classification of marble surfaces using wavelets. Electronics Letters, 39(9), 714–715.

Martinez-Alajarin, J., Luis-Delgado, J. D., Tomás-Balibrea, L.-M. (2005). Automatic system for quality-based classification of marble textures. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 35(4), 488–497.

Ökten, M., Akosman, Ş. A., Mora, Ö. T., Kılıç, V. (2021). Derin Öğrenme Tabanlı Mermer Yüzeylerinin Otomatik Sınıflandırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (Özel Sayı 26), 73–77.

Önder, A. S. (2019). OpenGL ile Gerçek Zamanlı Doğaltaş Tasnifi ve Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Pençe, İ., Çeşmeli Şişeci, M. (2019). Deep Learning in Marble Slabs Classification. Techno-Science-Scientific Journal of Mehmet Akif Ersoy University, 2(1), 21–26.

Selver, M. A., Akay, O. (2009). Evaluating clustering methods for classification of marble slabs in an automated industrial marble inspection system. IEEE Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on, II–115.

Sousa, J. M. C., Pinto, J. R. C. (2004). Comparison of Intelligent Classification Techniques Applied to Marble Classification. Image Analysis and Recognition, 802–9.

Temiz, M. (2018). Doğaltaş Karolarının Görüntü İşleme ve Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Sınıflandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Topalova, I., Tzokev, A. (2010). Automated Texture Classification of Marble Shades with Real-time PLC Neural Network Implementation. The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 1–8.

Torun, Y., Akbaş, M. R., Çelik, M. A., Kaynar, O. (2019). Development a Machine Vision System For Marble Classification. IEEE 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU).

Turan, E. (2018). Yerel İkili Örüntü Tabanlı Uç Öğrenme Yaklaşımı Kullanan Akıllı Örüntü Tanıma Sistemi ile Mermer Sınıflandırma Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Turhal, Ü. Ç., Aydın, S., Dener, G. (2015). Mermer Plakalarında Görüntü İşleme Teknikleri ile Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1).

Türkmen, M. (2017). Mermer Levhaların Sınıflandırılmasında Başarımın İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yaman, Ö. (2015). Mermer Fabrikalarında Ürün Kalite Kontrolünün Görüntü Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

ÇOKLU İNCE TELLİ KATRAKLAR VE ÇOKLU ELMAS TELLİ KATRAKLARIN VERİMLİLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF THE EFFICIENCIES OF MULTIPLE FINE WIRE GANG DRILLS AND MULTIPLE DIAMOND WIRE GANG DRILLS

O. Öz ^{1*} A. Gürel², E. Özkan ¹

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

² Gürmas Gürel Makina Sanayi Anonim Şirketi

*Sorumlu yazar: erkanozkan@gmail.com

ÖZ

Doğaltaş sektöründe son dönemlerde, bloklardan levha üretiminde vakumla sert sentetik elmasların lehimlendiği ince tellere (0,55mm) sahip sonsuz kesim yapabilen çoklu ince telli katarlar (ÇİTK) ile çoklu elmas tel ile kesim yapan katarlar (ÇETK) tercih edilmektedir. Dünya genelinde ÇETK makinesi yaklaşık 20 yıldır kullanılırken, ÇİTK makinesi ise son 4 yıldır kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışmada, Burdur bej mermer için ÇETK ve ÇİTK makinelerinin verimlilikleri karşılaştırılmıştır. ÇİTK makinesi ile ÇETK makinesine karşılaştırıldığında ÇİTK makinesinde üretilen levha sayısı %67,5 daha fazladır. ÇİTK makinesi ile bloktan %1,77 oranında atık çıkarken, ÇETK makinesinde bu oran %16,27'ye yükselmektedir. Ayrıca ince telli katarlar %30 daha yavaş kesim yapmasına rağmen, bloktan alınan levha sayısını %30 artırarak daha yüksek verimlilik sunduğu için Türkiye'de kullanılmaya başlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Çoklu elmas telli katar (ÇETK), çoklu ince telli katar (ÇİTK), mermer kesme maliyeti, malzeme verimliliği

ABSTRACT

In the natural stone sector, multi-wire gang saws with thin wires (0,55mm) to which hard synthetic diamonds are brazed by vacuum for endless cutting (ÇİTK), and multi-diamond wire cutting machines (ÇETK) have recently been preferred for slab production from blocks. While ÇETK has been used globally for approximately 20 years, ÇİTK has started to be used in the last 4 years. The purpose of this study was to compare the efficiencies of ÇETK and ÇİTK for Burdur beige marble. It was determined that ÇİTK increased the number of cut slabs by 67,5% compared to ÇETK. With ÇİTK, 4% of the block emerges as waste, whereas this rate increases to 35% with the ÇETK method. Furthermore, although thin-wire gang saws cut 30% slower, they have started to be used in Turkey because they offer higher efficiency by increasing the number of slabs obtained from the block by 30%.

Keywords: Multi-wire diamond gang saw, Multi-thin wire gang saw, Marble cutting cost, Material efficiency

GİRİŞ

Ocaklardan çıkarılan bloklar, doğaltaş işleme tesislerinde dairesel testereli blok kesme makineleri (S/T) ve katarlar aracılığıyla kesilmektedir. Katarlar, fabrikalarda blokları keserek genellikle 2-3 metre uzunluğunda ve 1-2 metre genişliğinde plakalar üretmek için kullanılır. S/T'ler ise, plakalara göre

çok daha küçük boyutlarda (örneğin 30x30 cm, 60x60 cm, 30x60 cm, 40x80 cm gibi) standart veya özel ölçülerde “levha” (tile/cut-to-size) olarak adlandırılan parçaların kesiminde kullanılmaktadır. Klasik ketraklar, İngilizcede “cut rock”, “gangsaw”, “frame saw” veya “gangsaw mill” gibi teknik terimlerle ifade edilmektedir. Ketrak makineleri, ocaklardan gelen doğaltaş bloklarının kesim işlemi tamamlandığında, birden fazla plaka elde edilmesini sağlayan makinelerdir. Mermer fabrikalarında yaygın olarak kullanılan bu makinelerde, blok bir vagon üzerinde yer alır ve lamalardan oluşan çerçeve bloğun üzerine inerek kesim işlemi gerçekleştirir ya da blok yukarı hareket ederek sabit çerçevenin içerisinden geçer. Lamalar üzerine lehimlenmiş elmas soketlerin blok üzerinde hareketine bağlı olarak kesim işlemi tamamlanır. Ketrak makinelerindeki lama sayısı, makinenin kapasitesine göre 10 ila 120 arasında değişebilmektedir. Günümüzde, blokların sağlamlaştırılarak ketrakla kesilebilmesi ve ketrakların daha yüksek verimlilik sağlaması nedeniyle, ketraklar S/T’ye göre daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca, plakaların yapılarda kullanılması, doğaltaşların renk, desen ve çekiciliğinin daha etkili şekilde sergilenmesine olanak tanıdığı için ketrakla kesilmiş plakalar özellikle tercih edilmektedir. Bu çalışmanın amacı, lama çerçeveden oluşan klasik ketraklardan farklı olarak, son yıllarda doğaltaş sektöründe kullanımı giderek artan ÇETK (Çoklu Elmas Tel Kesme) ve ÇİTK (Çoklu İnce Elmas Tel Kesme) makinelerinin teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırmasını yapmaktır (Onargan vd., 2006; Büyüksağış, 2013; Eken, 2013; Ersöz, 2014; Sakcalı vd., 2015; Satı vd., 2023).

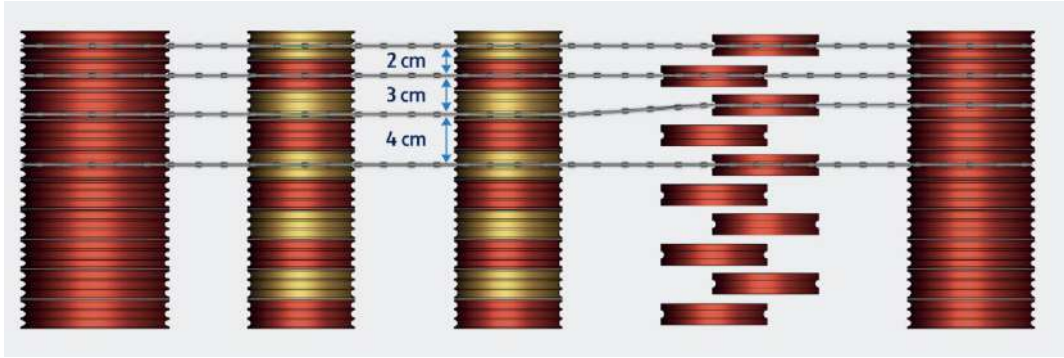
Çok Telli Elmas Tel ile Kesim Yapan Ketrak

Çok telli elmas boncuklu tel ile kesim yapan ketraklar, doğaltaş işleme verimliliğini ve hassasiyetini artıran yeni nesil ketrak makineleridir. Bu makinelerin nihai performansını belirleyen temel faktörler; yapısal tasarım, kesme mekanizması, hareket kontrolü ve otomasyon teknolojileridir. Yüksek rijitliğe sahip gövdeler ve elmas telin üçgen bir yörüngede hareket etmesini sağlayan, Şekil 1’de gösterilen kesme sistemi sayesinde, titreşim minimuma indirilerek düzgün ve hassas kesimler elde edilmektedir. Güçlü yapısal tasarım, elmas boncuklu tellerin optimum performansla çalışabilmesi için gerekli stabiliteyi sağlayarak kesme mekanizmasının etkinliğini artırmaktadır. Kesme mekanizması ise senkronize çekiş ve hareketli tel gruplarının her bir telinin gerginliğini ayrı ayrı ayarlayan pnömomatik veya hidrolik gergi sistemlerini içermektedir. Bu gergi sistemleri, tel ömrünü uzatmanın yanı sıra yüksek kesim kalitesinin elde edilmesinde de kritik bir rol üstlenmektedir. Mekanik düzenin bu hassasiyeti, trapezoidal mil-somun ve servo motorlar gibi hassas hareket kontrol sistemleriyle desteklenmektedir. Bu sistemler, makinenin dikey ve yatay eksenlerindeki hareketlerinde yüksek stabilite sağlayarak kesim performansının tutarlılığını ve hassasiyetini güvence altına almaktadır. Tüm bu bileşenlerin uyumlu çalışması ise, ileri düzey PLC tabanlı kontrol üniteleri ve Endüstri 4.0 uyumlu IoT entegrasyonları ile mümkün olmaktadır (Mert 2021; Yang, 2022; Kundal ve Yurdakal 2023; Varol, 2023; Özdoğan, 2025).



Şekil 1. Elmas Telle Kesim Yapan Ketrakların Çalışma Sistemi (Hedel, 2024)

Kesim kalınlığının ayarlanması işlemi, yüksek hızda ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu işlevsellik, elmas kaplı tellerin üzerinde hareket ettiği, özel olarak tasarlanmış kılavuz yivlere sahip bir dizi makara (veya tekerlek) aracılığıyla sağlanmaktadır. Farklı bir kesim kalınlığına geçiş yapmak için, tellerin hizalama sürecini optimize etmek ve kolaylaştırmak amacıyla çeşitli renklerde üretilmiş poliüretan profiller üzerindeki mevcut yivler (kanallar) arasında yeniden konumlandırılması yeterli olmaktadır. Plaka kalınlıklarının nasıl değiştirilebildiğini gösteren sistem Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir (Mert, 2021; Yang, 2022; Kundal ve Yurdakal, 2023; Varol, 2023; Hedel 2024, Özdoğan 2025,).



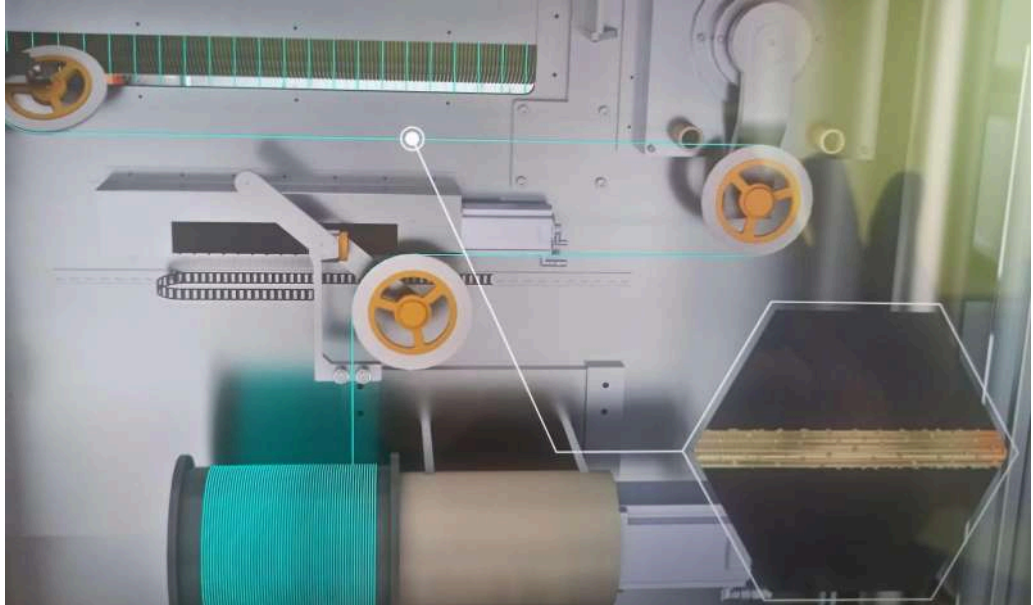
Şekil 2. Elmas Telle Kesim Yapan Katrağın Kesme Genişliğimin Ayarlanması (Hedel, 2024)



Şekil 3. Elmas Telle Kesim Yapan Katrak (Hedel, 2024)

Çok Telli Vakum ile Lehimlenmiş Elmas İnce Tel ile Kesim Yapan Katrak

İnce tel ile kesim yapan katrak makinesi, yapısal bütünlüğü ve çalışma verimliliğini ön planda tutan gelişmiş bir tasarıma sahiptir. Makinenin mekanik dengesi (stabilitesi), ana parçaların ayrı ayrı monte edildiği sağlam bir beton temel ve kesim sırasında oluşan titreşimleri en aza indirerek boyutsal hassasiyeti artıran yüksek dayanımlı tek parça (monoblok) döküm bir gövde ile sağlanmaktadır. Bu ana yapı, blokların yüklenmesi ve kesilmiş plakaların boşaltılması için özel, birbirinden ayrı giriş ve çıkış kanalları bulunan ve %30'a varan alan tasarrufu sağlayan çift kanallı bir düzenlemeye sahiptir (Şekil 4). Makinenin çalışma prensibi; 0,3 mm ile 1,2 mm arasında değişen çaplara sahip, vakumla lehimlenmiş özel elmas kaplamalı kesici tellerin (Şekil 4, 5), 12 adet yüksek hassasiyetli servo motor ve 10 adet özel geliştirilmiş mil içeren bir tel germe ve hareket sistemi ile en uygun gerginlikte tutulmasıyla, Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) komutlarıyla blok içinde ileri-geri (resiprokal) hareket ettirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu ileri-geri hareketle yapılan aşındırarak kesme işlemi sırasında, yüksek dayanımlı polietilen alaşımdan yapılmış kılavuz kasnaklar elmas tellere yataklık eder ve otomatik tel takma mekanizması da çalışma verimliliğini artırmaktadır. Son olarak, kesim sırasında oluşan ısının ve kesim artıklarının (talaş) uzaklaştırılması için kapalı devre bir soğutma sıvısı dolaşım sistemi kullanılmakta ve böylece hassas ve verimli bir boyutlandırma işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4. Vakumla lehimlenmiş ince telle kesim yapan katrağın sürekli kesme sistemi (İnt. Kayn. 2)



Şekil 5. Vakumla lehimlenmiş ince telle kesim yapan katarak. (İnt. Kayn.1)



Şekil 6. Vakumla lehimlenmiş elmasın mermeri kesmesi (İnt. Kayn.1)

KATRAKLARIN TEKNİK VE EKONOMİK OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışma, doğaltaş işleme sektöründe yaygın olarak kullanılan iki farklı kesim teknolojisi olan ÇETK ve ÇİTK makinelerinin teknik performanslarını ve maliyet etkinliklerini karşılaştırmalı olarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. Analizler, sağlanan teknik veri tablosuna dayanmaktadır. Karşılaştırma kapsamında; tel kalınlığı, kesim hızı, toplam kesilen alan, atık miktarı ve birim alan başına düşen çeşitli maliyet kalemleri gibi kritik parametreler ele alınmıştır.

Teknik Performans Karşılaştırması

300x300x200 cm (12 m³) boyutlarındaki Burdur Bej bloktan, 2 cm kalınlığında ve 300x200 cm ebatlarında plakaların kesilmesi durumunda, iki farklı katrak makinesinin temel teknik özellikleri ve maliyet bileşenleri çizelge 1’de ayrıntılı olarak verilmiş olup; blok fiyatı 100 \$/ton, plaka satış fiyatı ise 50 \$/m² olarak dikkate alınarak yapılan analizler, bu verilerin doğrudan karşılaştırılması ve yorumlanması yoluyla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. ÇETK ve ÇİTK makinelerinin teknik özellikleri ve maliyet bileşenleri

Çoklu Elmas Telli Kesim	Çalışma Değerleri	Çoklu İnce Telli Kesim	Çalışma Değerleri
Elmas telin kalınlığı (mm)	6,5	Telin Kalınlığı (mm)	0,55
Toplam plaka (adet)	75	Toplam plaka (adet)	97
Toplam kesilen alan (m ²)	450	Toplam kesilen alan (m ²)	582
Telin maliyeti (\$/m)	19	Telin Maliyeti (\$/m)	0,04
Toplam tel uzunluğu (m)	1520	Toplam tel uzunluğu (m)	30000
Elektrik tükütimi (kw)	280	Elektrik tükütimi (kwh)	75
Kesim hızı (cm/sa)	70	Kesim hızı (cm/sa)	25
Kesme süresi (sa)	2,86	Kesme süresi (sa)	8
Kesme Hızı (m ² /sa)	157,50	Kesme Hızı (m ² /sa)	72,75
Toplam atık (m ³)	2,93	Toplam atık (m ³)	0,32

ÇETK makinesi 6,5 mm tel kalınlığı ile çalışırken, ÇİTK makinesi ise 0,55 mm gibi çok daha ince bir tel kullanmaktadır. Kesim hızı açısından ÇETK makinesi (70 cm/sa), ÇİTK makinesine (25 cm/sa) kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olup bu durum ÇETK makinesinin metrekare başına kesme hızının (157,50 m²/sa) da ÇİTK makinesiden (72,75 m²/sa) üstün olmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, ÇETK makinesinin kesme süresi (2,86 saat), ÇİTK makinesine (8 saat) göre daha kısa zamanda gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, ÇİTK makinesi 0,32 m³ ile ÇETK makinesine göre 2,93 m³ ürettiği atık miktarından belirgin şekilde daha az atık üretmektedir. Elektrik tüketimi ÇETK makinesi için 280 kW olarak belirtilirken, ÇİTK makinesi için bu değer 75 kWh'dir. Yapılan saha gözlemlerine göre, ÇİTK ve ÇETK sistemlerinin çalışma mekanizmaları ile kullandıkları kesici takımları birbirinden farklıdır. Bu farklılık nedeniyle, ÇİTK makinesi ile yapılan kesimlerde daha düzgün yüzeyli ve eşit kalınlıkta plakalar elde edilmektedir. Ancak, çoklu elmas telli katraklarda telin kopması durumunda, elmas telin çıkarılarak yeniden dizilmesi ve kaplanması gerekmekte, özellikle kaplama malzemesinin yenilenmesi süreci, bu sistemler için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Buna karşılık, ince telli katraklarda tel kopması halinde, telin kaynatılarak tekrar kullanılabilmesi mümkündür; fakat tel genellikle kaynatılan noktadan tekrar kopmakta, bu durumda tel kopan yerden yeniden sarılarak kesim işlemine devam edilmektedir.

Maliyet Analizi Karşılaştırması

Birim başına toplam maliyetler incelendiğinde, ÇETK makinesi (1,536 \$/m²) ile ÇİTK makinesi (1,597 \$/m²) arasında yakın değerler gözlenmektedir; ancak ÇETK makinesi bir miktar daha düşük

maliyetlidir. Tel maliyeti açısından da ÇETK makinesinin birim maliyeti (1,00 \$/m²), ÇİTK makinesine (1,20 \$/m²) göre daha düşüktür. Buna karşılık, metrekaşe başına elektrik maliyeti ise ÇİTK’de (0,13 \$/m²), ÇETK’ye (0,23 \$/m²) kıyasla daha avantajlıdır. Maliyet etkinliği açısından iki teknolojinin karşılaştırması çizelge 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. ÇETK ile ÇİTK makinelerinin maliyet analizi

Parametreler	Çoklu Elmas Telli Kesim	Çoklu İnce telli kesim
Tel maliyeti (\$/m ²)	1,00	1,20
Silindir maliyeti (\$/m ²)	0,04	0,21
Klavuz maliyeti (\$/m ²)	0,27	0,06
Elektrik maliyeti (\$/m ²)	0,23	0,13
Toplam maliyet (\$/m ²)	1,536	1,597

SONUÇ

Elde edilen bulgular, her iki kesim teknolojisinin de kendine özgü avantaj ve dezavantajlara sahip olduğunu ortaya koymaktadır. ÇETK makinesi, daha yüksek kesim hızı ve buna bağlı olarak daha kısa operasyon süresiyle üretim verimliliğini artırma potansiyeli sunmaktadır. Ancak, daha kalın tel kullanımı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan daha yüksek atık miktarı, malzeme kaybı ve çevresel etki açısından göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörlerdir.

Öte yandan, ÇİTK sistemi özellikle ince tel kullanımı sayesinde önemli ölçüde daha az atık üreterek malzeme verimliliği sağlamaktadır. Ayrıca, metrekaşe başına daha düşük elektrik maliyeti de işletme giderleri açısından bir avantaj sunmaktadır. Ancak, kesim hızının düşük olması, yüksek üretim hacmi gerektiren uygulamalarda bu teknolojinin kullanımını kısıtlayıcı bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Toplam maliyet açısından iki teknoloji arasında büyük bir fark bulunmamakla birlikte (1,536 \$/m² ve 1,597 \$/m²), yatırım ve işletme kararları alınırken üretim öncelikleri (hız, malzeme tasarrufu, enerji tüketimi vb.) ile işlenecek malzemenin özellikleri gibi faktörlerin detaylı şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle ince tel teknolojisinin daha az atık üretmesi, değerli malzemelerin işlenmesi söz konusu olduğunda hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır.

Sonuç olarak, ideal kesim teknolojisinin seçimi, spesifik uygulama gereksinimlerine ve işletmenin önceliklerine bağlı olarak değişmektedir. Hızlı üretim ve yüksek hacim ön plandaysa ÇETK makinesi tercih edilebilirken, malzeme tasarrufu ve düşük çevresel etki öncelikli olduğunda ise ÇİTK makinesi daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

Ali, K. Ö. (2025). Doğaltaş Kesiminde Kullanılan Klasik ve Telli Katrakların Kesim Performanslarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bilal, M. (2001). Mermer, İşleme Teknolojisi ve Katrak, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Büyüksağış, İ. S., Aslantaş, K., Eken, M. S., Uzun, İ., Taşgetiren, S. (2013, Mayıs). Model Lamalı Mermer Blok Kesme Makinesinde Performans Analizi. 4. Maden Makinaları Sempozyumu, İzmir, Türkiye.

Eken, M. S. (2013). Doğaltaşlar İçin Elmas Lamalı Model Makine Tasarımı, İmalatı ve Performans Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.

Ersöz, M. İ. (2014). Katrak Makinelerinde Kullanılan Elmas Soketlerin Kırılma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.

Hedel. (2024). Hadel Çok Telli Blok Kesme Makinesi Broşürü. <https://www.hedel.com.tr/teknoloji.html> (Erişim Tarihi: 08.05.2024).

Kundak, E., Yurdakul, M. (2023). New Technology In Natural Stone Block Cutting Processes: Multiwire Machines Doğaltaş Blok Kesme Proseslerinde Yeni Teknoloji: Tel Katraklar. IMCET 2023-Turkey 28th International Mining Congress and Exhibition, Antalya.

Onargan, T., Köse, H., Deliormanlı, A. H. (2006). Mermer Kitabı. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları.

Sakcalı, A. H., Yavuz, Ş. (2015, Nisan). Mermer, Bej ve Traverten Bloklarında Plaka Veriminin Ultrasonik Ölçümlerle Analizi. Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Antalya.

Satı, Y. E., Tumaç, D., Shaterpour-Mamaghani, A. (2023). Sedimanter ve Metamorfik Kökenli Doğaltaşların Üretiminde Kullanılan Blok Kesme (S/T) ve Katrak Makinelerinin Kesilebilirliğin Değerlendirilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(3), 895–904.

Varol, M. K. (2023). Performance Evaluation To Measure Production Equipment Effectiveness In Block Cutting Machine (Gang Saw). Mining Science, 30, 157–169.

Yang, Z., Huang, H., Liao, X. (2022). Influence of Cutting Parameters on Wear of Diamond Wire During Multi-Wire Rocking Sawing With Reciprocating Motion. Frontiers In Mechanical Engineering. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.978714>

<https://www.hualongstonemachines.com/multi-wire-saw-machine/ultra-thin-multi-wire-saw-machine/diamond-wire-saw-machine.html>

İnt. Kayn. 2. https://www.youtube.com/watch?v=zhSBnX7X7c4&ab_channel=rainbowyang (Erişim Tarihi: 03.05.2025)

YÜKSEK GÖZENEKLİ DOĞALTAŞLARDA NUMUNE YÜKSEKLİĞİNİN KILCAL SU EMME KATSAYISINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SAMPLE HEIGHT ON THE COEFFICIENT OF CAPILLARY WATER ABSORPTION IN HIGHLY POROUS NATURAL STONES

M. Sert¹, G. Ekincioglu², D. Akbay^{3*}

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mermer ve Doğaltaş Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi

²Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kaman Meslek Yüksek Okulu, Madencilik ve Maden Çıkarma
Bölümü

³Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çan Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma
Bölümü

*Sorumlu yazar: denizakbay@comu.edu.tr

ÖZ

Tüf ve andezitler yüksek gözenekli doğal yapı taşlarıdır. Estetik görünümünün yanı sıra dayanıklı olmaları, kolay işlenmeleri ve uzun ömürlü olmalarından dolayı geçmişten günümüze hala yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak atmosferik etkenler doğaltaşların hem fiziksel hem mekanik özelliklerinde hem de dış görünümünde olumsuz değişimler meydana getirerek bozulmalara neden olmaktadır. Doğaltaşlardaki bozulmaların en önemli sebeplerinden birisi bünyelerine nüfuz eden sudur. Termal şok, donma-çözülme ve tuz kristallenmesine bağlı bozulmaların nedeni de suyun kılcal su emilimi yoluyla doğaltaşların bünyesine nüfuz etmesidir. Bu çalışma kapsamında TS EN 1925 standardında belirtilen 50×50×50 mm boyutlarındaki küp numuneler ile 50×50×300 mm boyutundaki prizmatik numuneler üzerinde kılcal etkiye bağlı su emme katsayıları belirlenmiş olup iki farklı numune boyutundan elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Kübik tüf numunelerde kılcal su emme su katsayısı 2880 dk sonunda 50,71 g/m²s^{0,5} iken prizmatik numunelerde bu değer 138,77 g/m²s^{0,5} olarak belirlenmiştir. Kübik andezit numunelerinde kılcal su emme katsayısı 2880 dk sonunda 12,22 g/m²s^{0,5} iken prizmatik numunelerde bu değer 15,01 g/m²s^{0,5} olarak ölçülmüştür. Her iki kayaç çeşidi için de numune yüksekliğinin kılcal su emme katsayısını etkilediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kılcal su emme, doğal yapı taşları, numune boyutu

ABSTRACT

Tuff and andesite are highly porous natural building stones. In addition to their aesthetic appearance, they are still used extensively from past to present due to their durability, easy processing and long life. However, atmospheric factors cause deterioration by causing negative changes in both the physical and mechanical properties and appearance of natural stones. One of the most important causes of deterioration in natural stones is water penetrating into their structure. The cause of deterioration due to thermal shock, freeze-thaw and salt crystallization is the penetration of water into the structure of natural stones through capillary water absorption. Within the scope of this study, water absorption coefficients due to capillary effect were determined on cube samples with dimensions of 50×50×50 mm and prismatic samples with dimensions of 50×50×300 mm specified in TS EN 1925 standard and the results obtained from two different sample sizes were analyzed. While the capillary water absorption

water coefficient in cubic tuff samples was $50.71 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ at the end of 2880 min, this value was determined as $138.77 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ in prismatic samples. While the capillary water absorption coefficient of cubic andesite samples was $12.22 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ at the end of 2880 min, this value was $15.01 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ in prismatic samples. For both rock types, it was observed that the specimen height affected the capillary water absorption coefficient.

Keywords: Capillary water absorption, natural building stones, sample size

GİRİŞ

Doğaltaşların kılcal su emme özellikleri, yapıların dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu özellik, taşın gözenek yapısı ve suyun taş içindeki hareket mekanizmalarıyla doğrudan ilişkilidir. Özellikle andezit ve tuf gibi yüksek gözenekli volkanik kökenli taşlarda, kılcal su emme davranışının detaylı incelenmesi, bu malzemelerin yapı sektöründeki performanslarının değerlendirilmesi açısından önemlidir (Çelik ve Sert, 2019).

Kılcal su emme, taşın gözenekli yapısı nedeniyle suyun kılcal kuvvetler yardımıyla taşın bünyesine nüfuz etmesi sürecidir. Bu süreç, su molekülleri arasındaki kohezyon kuvvetleri ile su molekülleri ve taşın gözenek duvarları arasındaki adezyon kuvvetlerinin etkileşimi sonucunda gerçekleşmektedir. Suyun taş içindeki hareketi, gözenek boyutu, şekli ve dağılımı gibi mikro yapısal özelliklere bağlıdır. Gözenek çapı küçüldükçe, kılcal kuvvetlerin etkisi artmakta ve suyun taş içinde yükselme hızı ile miktarı da buna bağlı olarak değişmektedir (Türk Standartları Enstitüsü, 2009).

Suyun taş içindeki hareketi sadece kılcal kuvvetlerle sınırlı değildir; yerçekimi ve kohezyon gibi diğer kuvvetler de bu süreçte önemli rol oynamaktadır. Yerçekimi, suyun aşağı yönlü hareketini teşvik ederken, kılcal kuvvetler suyu yukarı doğru çekebilir. Bu iki kuvvet arasındaki denge, suyun taş içindeki dağılımını belirlemektedir. Kohezyon kuvvetleri ise su moleküllerinin birbirine bağlılığını sağlayarak, suyun taş içinde sürekli bir film halinde hareket etmesine katkıda bulunmaktadır. Bu etkileşimler, suyun taşın yüzeyinden iç kısımlarına doğru ilerlemesini ve gözenekler arası geçişini etkilemektedir (Çelik ve Sert, 2019).

Andezit ve tuf gibi doğaltaşlar, farklı mineralojik ve petrografik özelliklere sahip olmaları nedeniyle kılcal su emme davranışlarında da farklılıklar göstermektedir. Andezit, genellikle daha düşük gözeneklilik ve su emme kapasitesine sahipken, tüfler daha yüksek gözeneklilik ve su emme oranlarına sahiptir (Çelik vd., 2019). Bu farklılıklar, her iki taşın suyla etkileşiminde ve dolayısıyla yapı malzemesi olarak performanslarının değerlendirilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Tuf ve andezit gibi yüksek emişli taşlarda kılcal etkiyi doğru tespit edebilmek için deneylerde kullanılacak numune boyutlarının doğru belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda incelenen literatür çalışmalarında aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

İnce vd. (2021) çalışmalarında, yapı taşlarının kılcal su emme kapasitesi, kuru yoğunluk, gözeneklilik, ağırlığa göre su emme ve P dalga hızı gibi fiziksel özellikler kullanılarak regresyon ve yapay sinir ağları yöntemiyle tahmin edilmiştir. Özellikle, P dalga hızı ölçümleri, kayaların akustik emisyon benzeri tepkilerini yansıtarak iç yapısal değişikliklere işaret etmiştir. Sonuçlar, ANN yönteminin yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir. Li vd. (2024) çalışmalarında, çeşitli kaya tiplerinden elde edilen $20 \times 30 \times 30$ cm boyutlarındaki örneklerle hibrit modeller kullanılarak kılcal su emme katsayısı tahmini yapılmıştır. Önerilen ICA-SVR ve ICA-ANFIS modelleri, kılcal su emme katsayısı değerlerini yüksek doğrulukla öngörölmüştür. Qian vd. (2022) çalışmalarında, Türkiye ve Anadolu'dan elde edilen $200 \times 300 \times 300$ mm boyutlarındaki taş örnekleri üzerinde hibrit MVO-SVR ve MVO-ANFIS modelleri geliştirilerek CWA tahmini gerçekleştirilmiştir. Elde edilen modeller, kılcal su emme değerlerini yüksek R^2 ile öngörürken, tüm örneklerin sabit boyutta olması nedeniyle numune

boyutunun etkisi kontrol altına alınmış ve bu etkinin ayrıntılı incelenmesine yer verilmemiştir. Huang vd. (2023) çalışmalarında, merkezi Sichuan'daki kırmızı katmanlı çamurtaşının gözenek-mikroçatlak yapısı ile kılcal su emme mekanizması incelenmiştir. X-ray difraksiyonu, SEM, MIP, NP ve WVP yöntemleriyle elde edilen veriler, yüksek hidrofilite ve belirgin su emme özelliklerini ortaya koymuştur. Bu çalışmada da numune boyutu 50×50×50 mm küp olarak sabit tutulmuş olup numune boyutunun etkisine dair ayrı bir değerlendirme yapılmamıştır. Yang vd. (2023) çalışmasında, elektriksel rezistivite yöntemi kullanılarak gözenekli taşlarda iç kılcal su göç mekanizması incelenmiştir. Kılcal su emme testleriyle, suyun hızlı, geçiş ve yavaş yükseliş evreleri tespit edilmiş; ayrıca, tuz kristalleşmesinin mikroyapısal etkileri de modellenmiştir. Örnek boyutları 50 mm küp olarak sabit tutulmuştur. Çelik ve Güven (2024) çalışmalarında Döğer tuf örnekleri üzerinde kılcal su emme testleri gerçekleştirmiştir. Su emme kapasitesi, ağırlık kaybı, ultra ses hızı ilerlemesi (USH) ve tek eksenli basınç dayanımı (TBD) ölçüm değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Bu çalışmada örnek boyutu 50×50×50 mm olarak sabit tutulmuş olup numune boyutunun etkisi ayrı olarak ele alınmamıştır. Çelik ve Kaçmaz (2016) çalışmalarında Afyonkarahisar bölgesinden temin edilen tuf ve andezit gibi gözenekli yapı taşlarının statik ve dinamik kılcal su emme davranışları, normal ve tuzlu su koşulları altında TS EN 1925 standardına uygun olarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, tuzlu suyun kılcal emme değerlerini artırdığını ve suyun emilim kinetiğinin taşın porozite ve gözenek dağılımına bağlı olduğunu ortaya koyarken; örnek boyutları 70 mm küp olarak sabit tutulduğundan numune boyutu etkisine dair özel bir bulgu raporlanmamıştır. Dinçer ve Bostancı (2019) çalışmalarında ise Kapadokya bölgesine ait ignimbrit örneklerinin kılcal su emme özellikleri, XRD, cıva porozimetresi ve su emme testleriyle araştırmışlardır. Elde edilen veriler, ignimbritlerde 5–10 µm aralığındaki uniform gözenek boyutu dağılımının kılcal su emme potansiyelini belirlediğini ve bu durumun taşların aşınmasına yol açtığını ortaya koymuştur. Numune boyutları standartlaştırılmış olup numune boyutunun etkisi özel olarak değerlendirilmemiştir. Zhang vd. (2022) çalışmalarında, Çin'deki üç farklı kültürel miras niteliğindeki mağara alanından alınan kumtaşı örneklerinde kılcal su emme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, suyun kılcal yükselme yüksekliği zamanla izlenmiş ve örneklerin gözenek yapısı mikroskobik analizlerle karakterize edilmiştir. Sonuçlar, numune boyutunun su emme kapasitesini etkileyebileceğini göstermiştir. Daha büyük numunelerde suyun yükselme hızı azalırken, gözenek yapısındaki farklılıklar su emme kinetiğinde belirgin rol oynamaktadır. Tsunazawa vd. (2023) çalışmalarında taş malzemelerde kılcal su emme kinetiği üzerine yapılan deneylerde numune boyutunun etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, suyun yükselme hızının gözenek dağılımına bağlı olarak değiştiğini ve daha küçük numunelerin daha hızlı doygun hale geldiğini göstermiştir. Ayrıca, numune boyutunun büyümesiyle birlikte kılcal su yükselme yüksekliğinin sınırlandığı ve taşın yüzey gerilimi ile viskozitesinin önemli faktörler olduğu belirlenmiştir. Yu ve Wei (2023) çalışmalarında yapı taşlarının kılcal su emme kapasitesinin tahmini için destek vektör regresyonu (SVR) modeli, aritmetik optimizasyon algoritması (AOA) ve sinüs-kosinüs algoritması (SCA) ile entegre edilerek geliştirilmiştir. Numune boyutunun etkisine dair özel bir analiz sunulmamış, ancak modelin doğruluk oranının artırılmasında gözenek yapısı ve fiziksel özelliklerin etkili olduğu vurgulanmıştır. AOA-SVR modelinin kılcal su emme katsayısı tahmininde daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Jia vd. (2023) çalışmasında, katmanlı kumtaşı örneklerinde kılcal su emme süreci, su emme yüksekliği, NMR T2 spektrumları ve katmanlı su emilimi dağılımı ölçümleriyle incelenmiştir. Bulgular, yatak düzleminin kılcal su göçünü önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Numune boyutu 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde olacak şekilde belirlenmiştir. Katman yönelimi, suyun ilerleme sürecini değiştirmiş, suyun dikey hareketi gecikmiş ve numune yapısına bağlı olarak farklı dağılım desenleri ortaya çıkmıştır. Jia vd. (2024) araştırmalarında, Na₂SO₄ çözeltileri içeren tuzlu suyun kumtaşı içerisindeki kılcal emme yasaları incelenmiştir. Çalışmada, su emme kütlesi, yükselme yüksekliği, NMR T2 spektrumları ve katmanlı su emilimi dağılımı ölçülmüştür. Sonuçlar, tuz konsantrasyonunun artışıyla birlikte su emme hızının arttığını, ancak toplam su emme miktarının azaldığını göstermiştir. Çalışmada 50×120 mm taban ölçülerine sahip numuneler kullanılmış olup numune boyutunun etkisine dair özel bir analiz sunulmamıştır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde kılcal su emiliminin gözenekli kayalarda numune yüksekliğine bağlı olarak değişimleri ile ilgili detaylı çalışmalara rastlanmamıştır. Mevcut standartta 50 mm ve 70 mm boyutlarındaki küp numunelerin kullanılması önerilmektedir. Bu çalışmada mevcut deney standardında önerilen numune boyutlarının, andezit ve tüf gibi görece su emme hızı yüksek olan doğaltaşların kılcal su emme özelliklerini belirlemek için uygun olup olmadığı incelenmiştir.

KILCAL ETKİYE BAĞLI SU EMME

Kılcal su emme katsayısı (C), gözenekli malzemelerde yüzey gerilimi, adezyon (yüzey ıslanması), ve kohezyon (sıvı molekülleri arası çekim) kuvvetlerinin etkileşimiyle ortaya çıkan bir fenomendir. Doğaltaşlarda bu süreç aşağıda belirtilen Young – Laplace denklemi (Eşitlik 1) ile tanımlanan kılcal basınç (Pc) ile belirlenmektedir (Young, 1805; Laplace, 1808).

$$P_c = 2\gamma \cos\theta r \quad (1)$$

Burada:

γ : Suyun yüzey gerilimi (N/m), θ : Karakteristik ıslatma açısı, r : Gözenek yarıçapı (m).

Islatma açısı ise (θ), adezyon ve kohezyon kuvvetlerinin dengesini yansıtmaktadır. $\theta < 90$ olduğunda, sıvı gözenek yüzeyini ıslatır ve kılcal emme başlar. Gözenek yarıçapı (r) azaldıkça, kılcal basınç artar, ancak gözenek geçirgenliği azalır. Bu durum, Washburn denklemi (Eşitlik 2) ile modellenen su emme kinetiğinde kritik bir rol oynamaktadır (Washburn 1921; Mertz, 1991; Siegesmund, 2002).

$$m = C\sqrt{t} \quad (2)$$

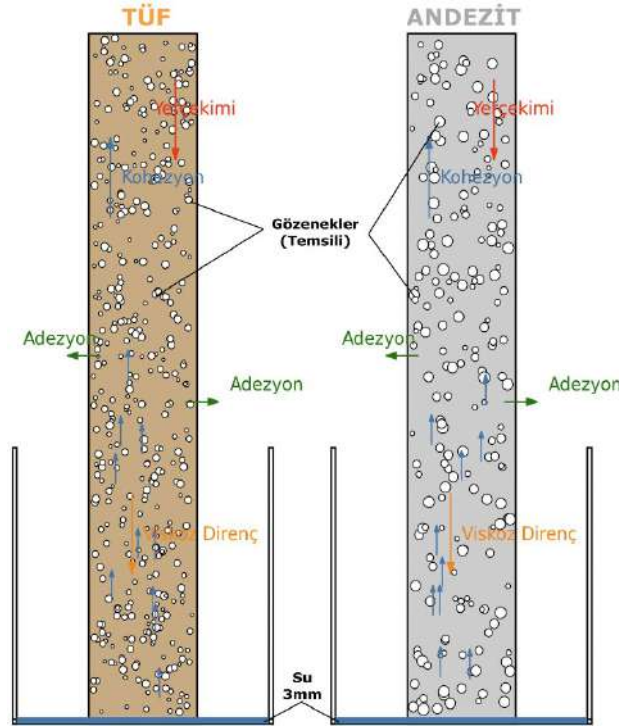
Burada:

m : Birim alana emilen su kütlesi (kg/m^2), C : Kılcal emme katsayısı ($\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$), t : Zaman (s).

C katsayısı, gözenek yapısı ($x=r \cos\theta$), sıvı viskozitesi (η), ve yüzey gerilimi (γ) ile ilişkilidir (Eşitlik 3):

$$C = \frac{\sqrt{2\gamma \cos\theta}}{n} \quad (3)$$

Suyun doğaltaş içindeki ilerlemesi, kılcal basınç, viskoz direnç ve yer çekimi arasındaki dinamik dengeden etkilenmektedir (Şekil 1):



Şekil 1. Kılcal etkiye bağlı su emiliminde suyun tuf ve andezit içindeki hareketi ve etki eden kuvvetler

Yatay Emilim: Yer çekimi etkisi ihmal edilebilir. Su, gözenekler boyunca viskoz dirençle karşılaşır, ancak kılcal basınç dominanttır. Washburn denklemi bu durumu idealize etmektedir.

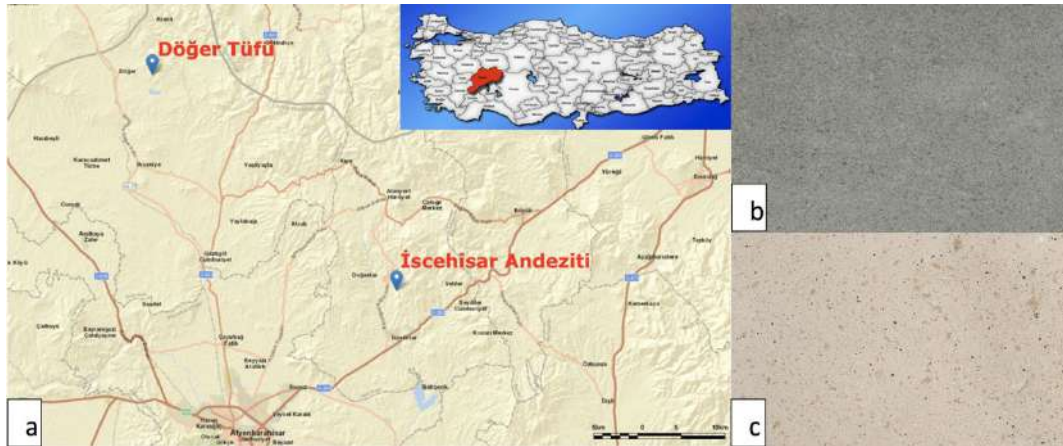
Dikey Emilim: Yer çekimi ($P_g = \rho gh$), kılcal basınca karşı koyar. Maksimum yükselme sınırı (h_{max}), denge durumunda belirlemektedir (Eşitlik 4):

$$h_{max} = \frac{2\gamma \cos\theta \rho g r}{p g r} \quad (4)$$

Burada ρ suyun yoğunluğu, g yer çekimi ivmesidir. Gözenek yarıçapı (r) küçüldükçe, h_{max} artar, ancak suyun ilerleme hızı viskoz direnç nedeniyle düşer. Su molekülleri arasındaki çekim kuvveti (γ) olan kohezyon, yüzey gerilimini destekleyerek kılcal basıncı artırır. Ancak aşırı kohezyon, menisküs stabilitesini bozabilmektedir (Israelachvili, 2011). Su ile taş yüzeyi arasındaki adezyon kuvveti, θ aracılığıyla emme kapasitesini belirler. Yüksek adezyon ($\theta \rightarrow 0$), emilimi maksimize etmektedir (Doehne ve Price, 2011). Suyun viskozitesi (η), gözeneklerdeki akış hızını sınırlar. Darcy yasası ile ilişkilendirilebilen bu etki, Washburn denkleminde zamanın karekökü ilişkisini açıklamaktadır (Darcy 1956; Scherer, 1999).

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada Afyonkarahisar ili sınırları içerisinde çıkartılan Döğer tufu ve İscehisar andeziti kullanılmıştır (Şekil 2). Çalışmada kullanılan doğaltaşlar Afyonkarahisar'da birçok tarihi yapıda kullanılmış olup hala yapı malzemesi olarak kullanımı devam etmektedir. Kılcal su emme deneyleri için $50 \times 50 \times 50$ mm boyutlarında küp $50 \times 50 \times 300$ mm boyutlarında prizmatik tuf ve andezit örnekleri kullanılmıştır.



Şekil 2. (a) Çalışmada kullanılan kayaların üretildiği ocakların yer bulduru haritası, b) andezit, (c) tuf

Çalışmada kullanılan kayaların TS EN 15309'a göre XRF yöntemi ile elementel bileşimleri (Çizelge 1) ve TS EN 12407'ye göre petrografik tanımlamaları yapılmıştır. Ayrıca TS EN 1936'ya göre kayaların görünür yoğunluk, görünür porozite ve ağırlıkça su emme değerleri belirlenmiş olup Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan kayaların elementel bileşimleri

Kimyasal	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	F	SrO	SO ₃	BaO	LOI
İçerik	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Andezit	55,90	16,40	6,95	5,50	5,35	2,90	2,35	2,11	0,75	0,16	0,12	0,03	0,00	1,48
Tuf	70,44	13,49	6,88	1,74	1,62	2,26	0,12	0,04	0,02	-	0,01	0,05	0,02	3,31

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan kayaların bazı fiziksel özellikleri

Kayaç	BHA g/cm ³	GP %	ASE %
Andezit	2,18	12,22	5,60
Tuf	1,50	31,80	21,16

BHA: Görünür yoğunluk; GP: Görünür porozite; ASE: Ağırlıkça su emme

Sonrasında numunelerin kılcal etkiye bağlı su emme deneyleri TS EN 1925 standardına göre 50×50×50 mm ve 50×50×300 mm boyutlarındaki örnekler (her kayaç için 6'şar adet) üzerinde yapılmıştır. Hazırlanan örnekler 70±5°C'de sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutma sonrasında örneklerin 0,01 g yaklaşımla kuru ağırlıkları tartılmıştır. Örnekler 3±1 mm derinliğinde su içine batırılmıştır. Kılcal etkiye bağlı su emmenin ölçülmesi sırasında farklı zaman aralıkları kullanılmıştır. Zaman aralıkları 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 180, 480 (6 saat), 1440 (24 saat) ve 2880 (48

saat) dakika olarak seçilmiştir. Her bir zaman aralığında örnekler sudan çıkartıldıktan sonra, üzerindeki suyun nemli bez kullanılarak yüzeyden uzaklaştırılması sağlanmıştır. Daha sonra her bir örnek 0,01 g hassasiyetle tartılarak zaman aralığına bağlı olarak emdikleri su miktarları belirlenmiştir. Zaman aralıklarında ölçüm alınan her örneğin fotoğrafları çekilmiştir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra kılcal su emme katsayısı (C_1) Denklem 5'e göre hesaplanmıştır.

$$C_1 = \frac{G_1 - G_d}{A\sqrt{t_1}} \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5} \quad (5)$$

Burada:

G_d : Sabit kütleye kadar kurutulmuş doğaltaşın kütlesi (g),

G_1 : Deney örneğinin deneydeki su emmiş kütlesi (g),

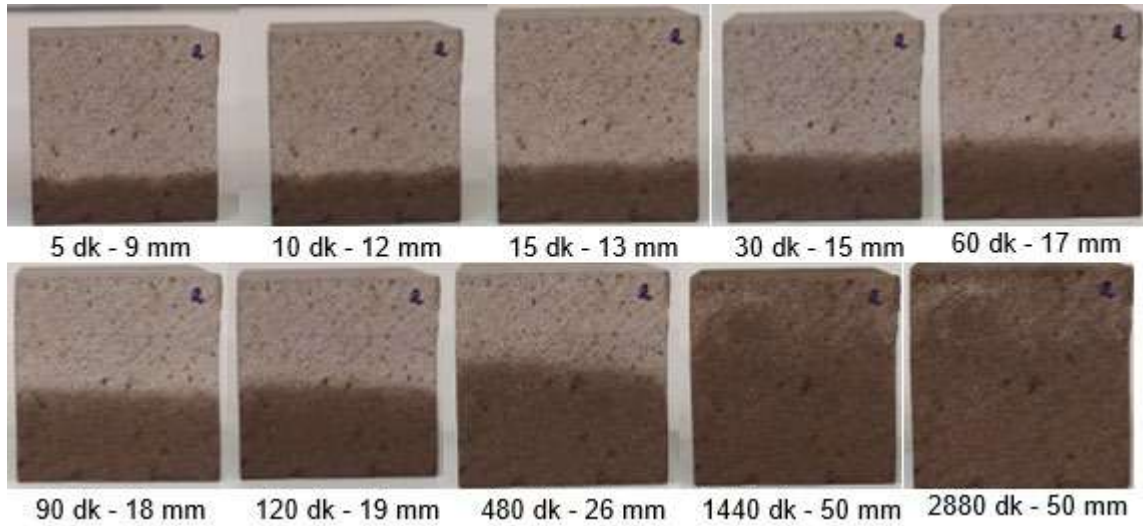
A : Suyu batırılmış yüzeyin alanı, m^2

t_1 : Deney başlangıcından ardışık G_1 kütlelerinin ölçüldüğü süreler (s),

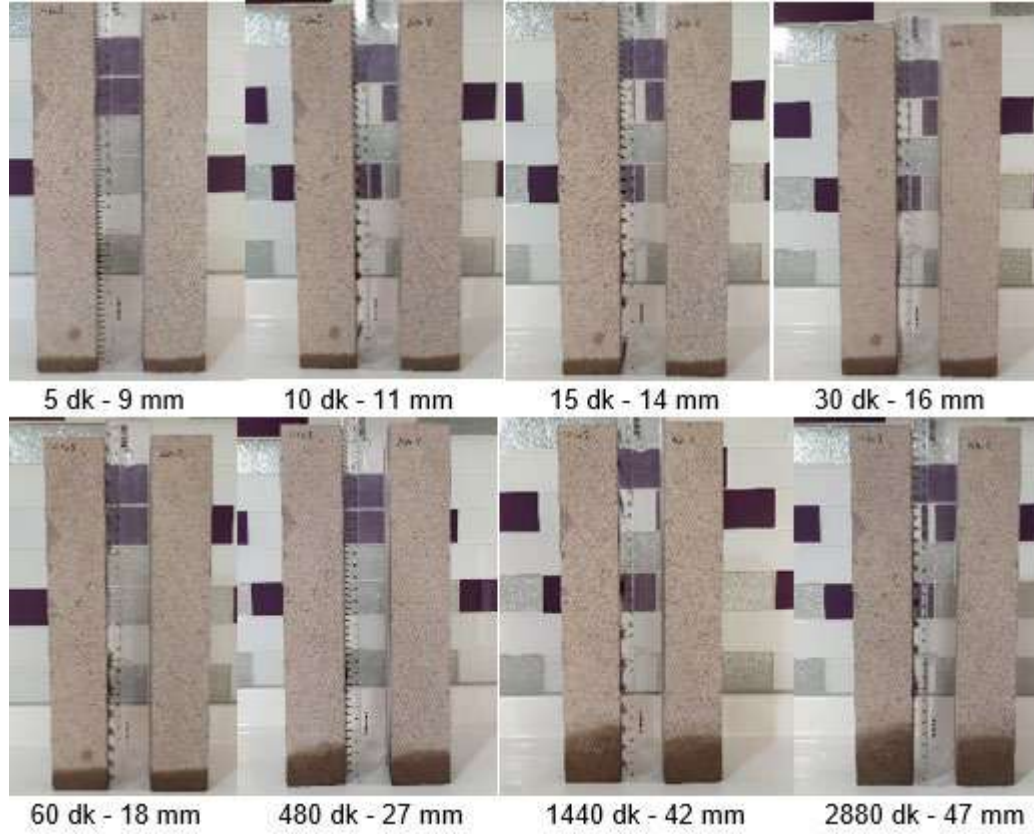
C_1 : Doğaltaşın kılcal etkiye bağlı su emme katsayısı, $\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$.

BULGULAR

Çalışma kapsamında hem $50 \times 50 \times 50$ mm boyutlarında küp hem de $50 \times 50 \times 300$ mm boyutlarında prizmatik örnekler üzerinde kılcal su emme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda andezit için standartta belirlenen sürelerde gerçekleşen su emilim seviyeleri Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. İki farklı numune boyutu için de başlangıç kılcal su emme katsayıları yakın olmasına rağmen (sırasıyla 28,17 ve 27,48 $\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$), ölçüm zamanı arttıkça prizmatik numuneler için daha yüksek kılcal su emme katsayısı değerleri hesaplanmıştır (2880 dakika sonunda sırasıyla 15,01 ve 12,22 $\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$). Andezit numunelerinde yüzeyde su yükselme izi gözlemlendiğinde ilk 480 dakikada için su kayış içerisinde görece hızlı ilerlemiş (prizmatik numunelerde 27 mm), sonraki süreçte azalarak devam etmiş ve 2880'inci dakikada 47 mm'ye ulaşmıştır. Andezitin tüfe göre düşük gözenekliliği ve su emme kapasitesi nedeniyle gözenek içindeki kılcal kuvvetlerin adhezyon ve yerçekimi kuvvetlerinin etkisiyle zamanla azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 3. Küp andezit numuneleri için kılcal su emme süreleri ve emilen suyun kayış yüzeyinde ölçülen yükseklik değeri



Şekil 4. Prizmatik andezit numuneleri için kılcal su emme süreleri ve emilen kayaç yüzeyinde ölçülen yükseklik değeri

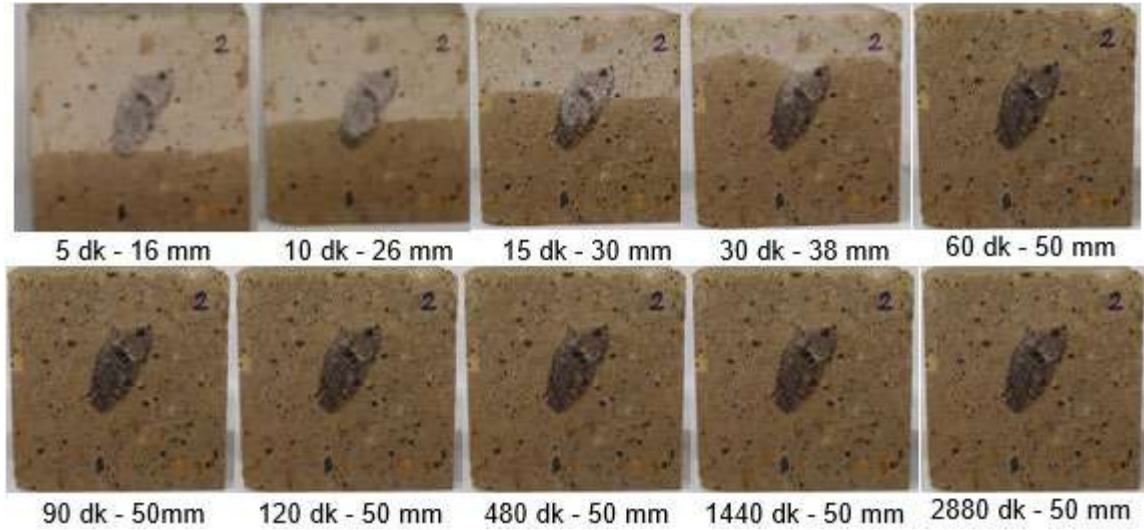
Çizelge 3'teki verilere göre, prizmatik andezit numunelerinin kılcal su emme katsayısı (C) başlangıçta $28,17 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ iken, zamanla azalarak 2880 dakika sonunda $15,01 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ değerine düşmüştür. Küp numunelerde ise başlangıçta $27,48 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ olan katsayı, 2880 dakika sonunda $12,22 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ değerine gerilemiştir.

Çizelge 3. Farklı numune boyutlarında andezit için zamana bağlı kılcal su emme katsayıları

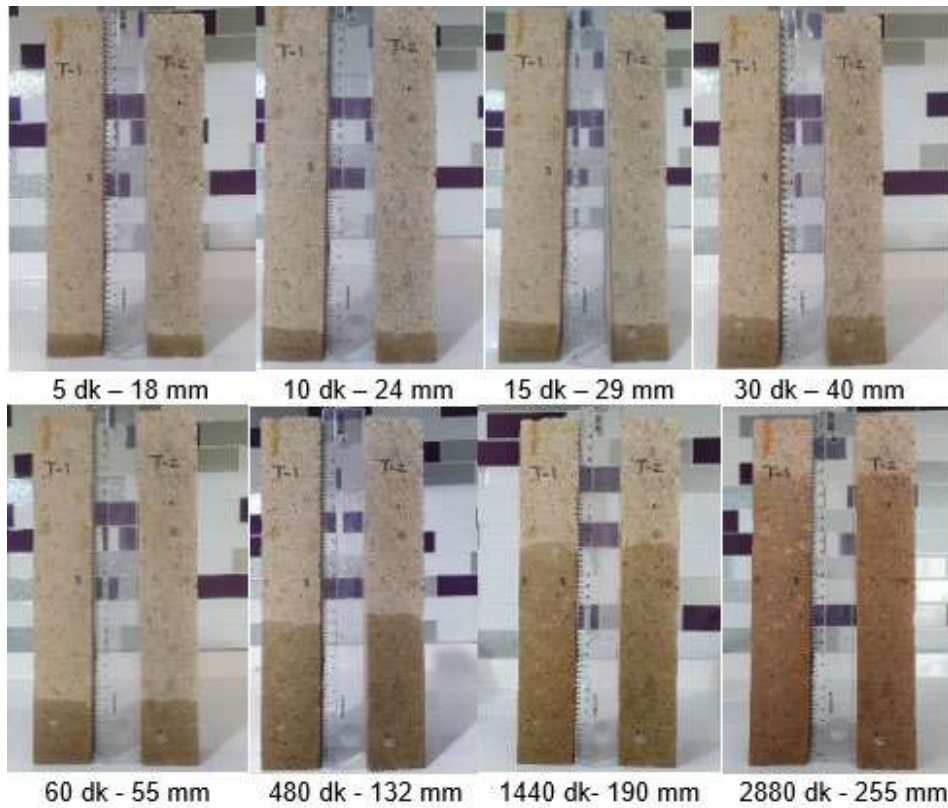
Numune Boyutu	t (dk)	5	10	15	30	60	90	120	480	1440	2880
	$\sqrt{t}$ ($\text{s}^{0.5}$)	17	24	30	42	60	73	85	170	294	416
50×50×50 mm	Kılcal su emme (C) ($\text{g/m}^2\text{s}^{0.5}$)	27,48	24,66	23,20	22,06	19,67	21,01	20,55	16,66	16,22	12,22
50×50×300 mm	Kılcal su emme (C) ($\text{g/m}^2\text{s}^{0.5}$)	28,17	28,25	28,27	27,15	26,27	25,49	24,77	19,68	18,71	15,01

Tüf numunelerinde boyut etkisi daha belirgindir. Prizmatik numunelerde kılcal su emme katsayısı 2880 dakika sonunda $138,77 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ iken, kübik numunelerde bu değer $50,71 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ 'e düşmüştür (Çizelge 4). Küp numunelerin daha hızlı doygunluğa ulaşması (90 dakikada maksimum su yüksekliğine ulaşması), sınırlı hacim nedeniyle su emme kapasitesinin daha erken tükenmesiyle açıklanabilir. Suyun kılcal etkiyle malzeme içinde kat ettiği mesafe (veya emilen su miktarı), ilk etapta zamanın karekökü ile doğru orantılı artmaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde ilk dakikalardaki su yükselme eğrileri bu karakteristiği yansıtmaktadır: Süre (dakika)–su yüksekliği grafiklerinin başlangıç kısmı, yaklaşık olarak kök-zaman şeklinde bir artış göstermiştir. Kılcal etkiye bağlı su emmenin ilk evresinde malzeme tamamen kuru olduğundan, gözenekler arasındaki emici kuvvet (sıvının yüzey

gerilimi ve adezyon etkisi) en yüksek seviyededir. Bu evrede su, malzeme içinde hızlı bir şekilde ilerler (yükselir); grafikte bu durum, eğrinin başlangıçta yüksek bir eğime sahip olmasının nedenidir. Tüf numunelerinde ilk birkaç dakikada suyun kayaç yüzeyinde ölçülen yüksekliği, andezit numunelerinde ölçülen yüksekliklere kıyasla çok daha fazla olmuştur. Bunun sebebini tüfün daha yüksek kılcal su iletkenliğine sahip olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5. Küp tüf numuneleri için kılcal su emme süreleri ve emilen kayaç yüzeyinde ölçülen yükseklik değeri

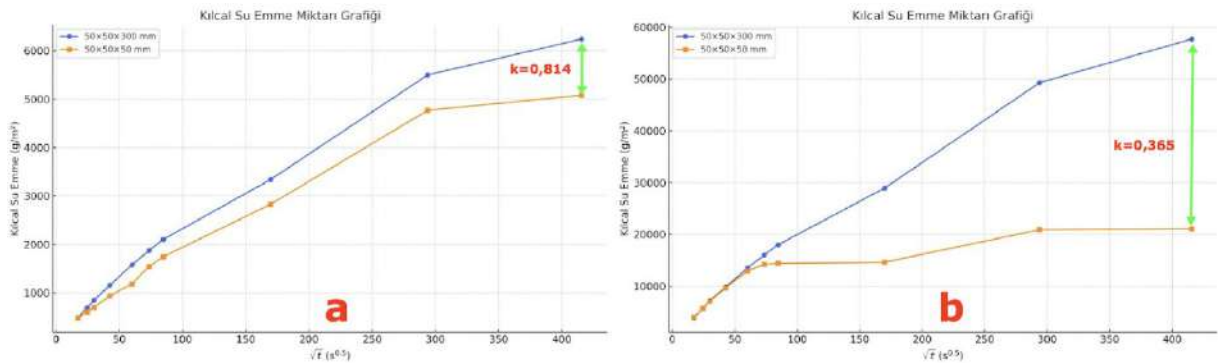


Şekil 6. Prizmatik tüf numuneleri için kılcal su emme süreleri ve emilen kayaç yüzeyinde ölçülen yükseklik değeri

Çizelge 4. Farklı numune boyutlarında tüf için zamana bağlı kılcal su emme katsayıları

Numune Boyutu	t (dk)	5	10	15	30	60	90	120	480	1440	2880
	$\sqrt{t}$ (s ^{0.5})	17	24	30	42	60	73	85	170	294	416
50×50×50 mm	Kılcal su emme (C) (g/m ² s ^{0.5})	234,40	235,80	236,58	227,97	215,13	193,82	170,22	86,35	71,10	50,71
50×50×300 mm	Kılcal su emme (C) (g/m ² s ^{0.5})	223,09	236,62	242,40	231,56	224,87	218,43	212,49	170,39	167,61	138,77

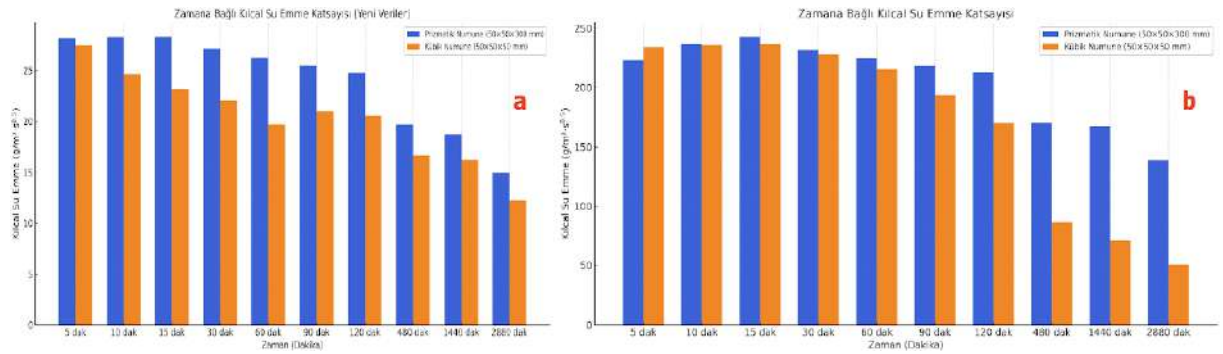
Tüf ve andezit örneklerinde farklı numune boyutunun (numune yüksekliğinin) kılcal su emme davranışına etkisini görebilmek için zamanın kareköküne karşılık kılcal su emme miktarlarının grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 7). Grafikler incelendiğinde, tüf ve andezit numunelerinin kılcal su yükselme eğrilerinin şekilsel olarak da farklılık gösterdiği görülmektedir. Tüf numunelerinde su yükselme eğrisinin eğimi başlangıçta çok yüksektir, özellikle küp numunede yaklaşık 1–2 saat içinde eğri neredeyse tamamen yatay hale gelmiştir (90. dakikada su numunenin tepe noktasına ulaşmıştır). Bu, suyun tüf içerisinde kılcal etkiye bağlı olarak çok hızlı ilerlediğini, görece daha kısa sürede kılcal etkiye bağlı su emme kapasitesini doldurduğunu göstermektedir. Prizmatik tüf numunesinde ise kılcal etkiye bağlı su emiliminin 90. dakikadan sonra da bir miktar devam ettiği, ancak 2880. dakikada eğrinin yatay seviyeye yaklaştığı görülmektedir. Bu noktada dahi prizmatik numunenin üst kısmında tamamen suyun ulaşmadığı bölümler olduğu söylenebilir; kılcal su emme katsayısı sıfır olmasa da oldukça düşük değerlere gerilemiştir. Andezit numunelerinde ise su emilimi daha yavaş ve kademeli gerçekleşmiştir. Başlangıçtaki su emilim ivmesi tüfe göre düşüktür; bu yüzden andezitin dakika-su yüksekliği grafiği eğimi tüf için çizdirilen grafiğin eğiminden daha düşüktür. İlk 30 dakikada andezitte kayaç yüzeyinde gözlenen su izinin yüksekliği yalnızca birkaç santimetre iken, aynı sürede tüf üzerinde gözlenen su izi daha yüksektir. Prizmatik numunelerde andezit için suyun kayaç içinde ilerlemesi/yükselmesi uzun bir süre devam etmiş ve eğri ancak testin ilerleyen saatlerinde belirgin olarak yatay seviyeye geçme eğilimi göstermiştir. Küp numunelerde ise andezit için numune yüksekliği yeterli gözlem için yeterli olmamış, birkaç saat içerisinde su tüm numuneyi ıslatmış ve ardından eğri plato yapmıştır.



Şekil 7. Andezit (a) ve tüf (b) için zamanın kareköküne karşılık kılcal su emme miktarları

Deneyisel bulgular, kılcal su emme mekanizmasının iki aşamalı doğasını ortaya koymaktadır: Birinci evre hızlı su emme evresi ve ikinci evre su emiliminin azaldığı evredir. İlk evrede suyun kayaçlara nüfuz etmesi tamamen kılcal kuvvetlerce kontrol edilmekte ve kayaç içinde suyun ilerleme hızı gözeneklerin boyutu/bağlantısı tarafından belirlenir. Tüfün geniş ve birbirine bağlı gözenekleri bu evrede suyun hızla ilerlemesine olanak tanırken, andezitin dar ve kısıtlı geçişleri suyun kayaç içindeki hareketini yavaşlatmaktadır. İkinci evrede ise malzemenin toplam porozitesi ve difüzyon özellikleri

devreye girmektedir. Artık su, doygunluk sınırına yaklaşmış küçük gözeneklere doğru yavaş yavaş ilerlemektedir. Bu durum literatürde de diğer araştırmacılar tarafından benzer şekilde ifade edilmektedir: Örneğin çimento esaslı malzemeler için yapılan bir çalışmada, su emme sürecinin ilk kısmının kılcal gözeneklerce, ikinci kısmının ise kalan boşlukların dolması (jel gözenekleri/difüzyon) şeklinde olduğu belirtilmiştir (Kabir and Garg, 2023). Bu çalışmada ise numunelerde jel gözenek olmamakla birlikte, benzer şekilde büyük gözeneklerin dolmasının ardından geriye kalan daha küçük ve ulaşılması zor gözeneklerin suyla dolması uzun zaman almıştır. Bomberg vd. (2005), kılcal su emme miktarının zamanın karekökü ile lineer artış gösterdiği dönemin, malzeme tam doygunluğa erişmeden çok önce sonlandığını ve daha sonra bu artışın yavaşladığını ortaya koymuşlardır. Deneylerde elde edilen su yükselmesi eğrileri de tam olarak bunu doğrular niteliktedir. Her iki doğaltaş için de başlangıçta zamanın karekökü ile emilen su miktarı için yakın bir doğrusal artış görülmüş, ancak malzeme suya doymaya başladıkça eğri lineerlikten saparak eğimi azalmaya başlamıştır. Özellikle küp numunelerde bu sapma çok erken gerçekleşmiş (küp numune çabuk doygunluğa ulaştığı için), prizmatik numunelerde ise daha uzun bir süre lineerlik korunmuştur (Şekil 8).

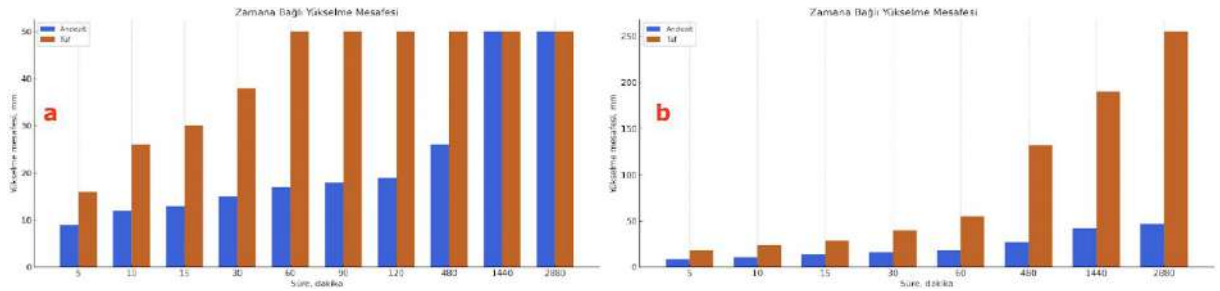


Şekil 8. Andezit (a) ve tuf (b) için zamana bağlı kılcal su emme miktarları

Kılcal su emme katsayısının zamanla değişimi konusunda elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur. Birçok çalışma, kılcal emme testlerinde ilk birkaç saat içinde yüksek olan su emme hızının zaman ilerledikçe azaldığını göstermiştir (Bomberg vd., 2005). Örneğin beton ve harç malzemeleri için yapılan standart sorpsiyon testlerinde, genellikle ilk 6 saat “birincil sorptivite” hesaplanmakta, daha sonra 24 saat ve ötesi için “ikincil sorptivite” tanımlanır–zira bu iki aralıkta su alım eğimi farklılaşmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan doğaltaşlarda da benzer bir ikili davranış mevcuttur. Özellikle andezit örneklerinde kılcal su emme katsayısının 5–60 dakika arası göreceli olarak sabit kalıp sonra düşmeye başlaması, birincil kılcal emme evresine karşılık gelmektedir. Tuf örneklerinde bu evre çok kısa sürmüş, küp numunede neredeyse 15 dakika içinde ikinci evreye geçilmiştir. Bu bulgular, literatürde tanımlanan hızlı kılcal emme+yavaş difüzyon şeklindeki iki aşamalı modeli desteklemektedir (Kabir and Garg, 2023). Ayrıca, malzemenin uzun süre suya maruz kalması durumunda dahi tam doygunluğa ulaşmasının zaman alabileceği, dolayısıyla kılcal su alımının çok uzun bir bekleme davranışı gösterebileceği de hem literatür hem de bu çalışma kapsamında ortaya konulmuştur (Çelik, 2024). Örneğin 48 saat sonunda andezit örnekleri hala su çekebilmektedir; pratikte belki haftalar boyu suyun içinde tutulsaydı tamamen doymun hale gelebilirdi. Bu durum, yapı malzemelerinin uzun dönem kılcal su emilimi davranışları açısından kritik bir bilgidir. Literatürde, doğaltaşların tam doymun hale gelmesi için gerekebilecek sürelerin, gözenek yapılarına bağlı olarak, bazen yüzlerce saate çıkabildiği belirtilir (örn. bazı sıkı kumtaşları için kılcal su emme katsayısı 1–2 haftada ancak plato yapılabilmektedir).

Çalışma kapsamında 48 saat sonunda elde edilen veriler, tuf ve andezitin bu açıdan da farkını gösterir niteliktedir. Tuf nispeten daha erken plato eğilimine girerken, andezit daha uzun sürede suya

doğru hale gelmiştir. Şekil 9’da verilen suyun numuneler üzerindeki yükselme seviyeleri de bu durumu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Andezit ve tuf için 50×50×50 mm (a) ve 50×50×300 mm (b) boyutundaki numunelerde suyun yükselme mesafeleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar literatürdeki bilgi birikimiyle büyük ölçüde uyumludur. Tuf ve andezitin kılcal su emme davranışları arasındaki fark porozite ve gözenek yapısı farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Bulgular da bunu doğrular niteliktedir. Numune boyutunun etkisi, literatürde teorik olarak bilinse de deneysel verilerle çok az incelenmiş bir konudur. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar bu etkinin pratikte ne kadar önemli olabileceğini (özellikle yüksek gözenekli malzemelerde) ortaya koymuştur. Kılcal su emme mekanizmasının zamanla yavaşlaması ve “C” katsayısının düşmesi, hem teorik modeller (Lucas-Washburn ve türevleri) hem de diğer deneysel çalışmalarla tutarlı bir şekilde gözlemlenmiştir. Sonuçlar, doğaltaşların suyla etkileşimini anlamada hem mühendislik hem de koruma (restorasyon) alanlarında kullanılabilecek değerli veriler sunmaktadır. Özellikle yapı malzemesi olarak kullanılan andezit ve tuf için, bu bulgular suya maruz kalma durumlarında beklenen davranışların literatürdeki öngörülerle paralel olduğunu göstermektedir. Örneğin tarihi yapılarda tuf taşlarının suya karşı daha hassas (çünkü daha fazla su alıp tuz biriktirmeye müsait) olduğunu, andezitin ise daha dayanıklı olmakla birlikte uzun süre ıslak kalırsa çatlaklarında su tutabileceğini teyit eder niteliktedir. Literatüre uygunluk, çalışmanın güvenilirliğini artırmakta ve benzer malzemeler için elde edilen parametrelerin genellenebilir olduğunu düşündürmektedir. Sonraki çalışmalarda yüksek su emme hızına sahip ve yüksek gözenekli başka doğaltaşlar üzerinde de hem prizmatik hem de silindirik numuneler üzerinde çalışmaların yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Bomberg, M. T., Pazera, M., Plagge, R. (2005). Analysis of selected water absorption coefficient measurements. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(3), 227–243.

Çelik, M. Y. (2024). Characterization of İscehisar Andesite (Afyonkarahisar-Turkey), Used as a Building Stone Source of Historical Heritages from Ancient Times to the Present. *Geoheritage*, 16(71). <https://doi.org/10.1007/s12371-024-00979-1>

Çelik, M. Y., Kaçmaz, A. U. (2016). The investigation of static and dynamic capillary water absorption in porous building stones under normal and salty water conditions. *Environmental Earth Sciences*, 75(307). <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5132-x>

Çelik, M. Y., Sert, M. (2019). Yüzey Koruyucu Reçinenin Döğer Tufu ve İscehisar Andezitinin Kılcal Su Emme Potansiyeli Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(3), 319–338. <https://doi.org/10.17482/uumfd.476527>

Çelik, M. Y., Sert, M., Arsoy, Z. (2019). Investigation of the effect of salt crystalization on mercury porosimeter data in andesite and tuff (Andezit ve Tüflerde Tuz Kristallenmesinin Cıvalı Porozimetre Verilerine Etkisinin İncelenmesi). Proceedings of the 10th International Marble and Natural Stones Congress and Exhibition of Turkey, 1(10), 79–90.

Çelik, M. Y., Sert, M. (2022). An investigation of the pore size distribution variations with salt crystallization tests of Döğer tuff (Afyonkarahisar-Turkey). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(1), 48.

Çelik, M. Y., Güven, Ö. (2024). Evaluation of the durability of untreated and water-repellent-treated cultural heritage stone (Döğer tuff-Turkey) through capillary water absorption and freeze-thaw tests. Geoheritage, 16(115). <https://doi.org/10.1007/s12371-024-01017-w>

Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont.

Dinçer, İ., Bostancı, M. (2019). Capillary water absorption characteristics of some Cappadocian ignimbrites and the role of capillarity on their deterioration. Environmental Earth Sciences, 78(7). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7993-2>

Doehne, E., Price, C. A. (2011). Stone conservation: an overview of current research (2nd ed.). Getty Conservation Institute.

Huang, K., Yu, F., Zhang, W., Tong, K., Guo, J., Li, S., Chen, S., Dai, Z. (2023). Relationship between capillary water absorption mechanism and pore structure and microfracture of red-layer mudstone in central Sichuan. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(100). <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03115-5>

İnce, İ., Bozdağ, A., Barstuğan, M., Fener, M. (2021). Evaluation of the relationship between the physical properties and capillary water absorption values of building stones by regression analysis and artificial neural networks. Journal of Building Engineering, 42, 103055. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103055>

Israelachvili, J. N. (2011). Intermolecular and surface forces. Academic press.

Jia, H., Dong, B., Wu, D., Shi, Q., & Wei, Y. (2023). Capillary imbibition in layered sandstone. Water, 15(4), 737. <https://doi.org/10.3390/w15040737>

Jia, H., Yang, X., Wei, Y., Sun, Q., Tang, L. (2024). Capillary imbibition laws of fresh–brackish waters in sandstone. Water, 16(8), 1180. <https://doi.org/10.3390/w16081180>

Kabir, H., Garg, N. (2023). Rapid prediction of cementitious initial sorptivity via surface wettability. npj Materials Degradation, 7(52). <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00371-4>

Laplace, P. S. (1808). Traité De Mécanique Céleste: Supplément au dixième livre du traité de mécanique céleste sur l'action capillaire (Vol. 6). Duprat.

Li, G., Fu, Y., Deng, Z., Huang, Y. (2024). Predicting the capillary water absorption values of building stones by hybrid models. Journal of Applied Science and Engineering, 28(6), 1311–1320. [https://doi.org/10.6180/jase.202506_28\(6\).0013](https://doi.org/10.6180/jase.202506_28(6).0013)

Mertz, J. D. (1991). Structures de porosité et propriétés de transport dans les gres. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Starsbourg.

Qian, D., Yang, J., Wang, J. (2022). Novel hybrid models to predict the capillary water absorption values of building stones. *Engineering Research Express*, 4(3), 035012. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac8225>

Scherer, G. W. (1999). Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1347–1358.

Siegesmund, S., Weiss, T., & Vollbrecht, A. (2002). Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies: introduction.

Tsunazawa, T., Nishiyama, T., Naito, T., Hatta, T., Hiyama, N. (2023). Effect of sample size on capillary water absorption in porous materials. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(100). <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03115-5>

Türk Standartları Enstitüsü. (2007). TS EN 1936: Doğaltaşlar- Deney Metotları- Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü. (2008). TS EN 15309: Atıkların ve toprağın nitelendirilmesi-X ışını floresans yöntemi kullanılarak elementel bileşimin tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü. (2009). TS EN 1925: Doğaltaşlar-Deney Metotları-Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Katsayısının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü. (2019). TS EN 12407: Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri-Petrografik İnceleme. Türk Standartları Enstitüsü.

Washburn, E. W. (1921). The dynamics of capillary flow. *Physical Review*, 17(3), 273.

Yang, H., Chen, C., Zhao, G., Zhou, J. (2023). Electrical resistivity analysis for the internal capillary water migration mechanism of porous stone. *Acta Geophysica*, 72, 213–231. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01081-w>

Young, T. (1805). III. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (95), 65–87.

Yu, B., Wei, Y. (2023). A comparison study of regression analysis for estimating the capillary water absorption of construction stones. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 6(4), 685–696. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00168-7>

Zhang, Y., Zhang, Y., Huang, J. (2022). Experimental study on capillary water absorption of sandstones from different grotto heritage sites in China. *Heritage Science*, 10(25). <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00656-y>

LAMALI VE ELMAS TELLİ KATRAKLARDA KESİM KALİTESİNİN DOĞALTAŞLARIN SİLİM PERFORMANSINA ETKİSİ

EFFECT OF CUTTING QUALITY IN BLADE AND MULTI-WIRE GANG SAWS ON THE POLISHING PERFORMANCE OF NATURAL STONES

A.K. Özdoğan^{1*}, M. Karaabat Varol², S. Demirdağ³

¹*Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü*

^{2, 3}*Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği
Bölümü*

*Sorumlu Yazar: akozdogan@gmail.com

ÖZ

Doğaltaş işleme tesislerinde blokların levha haline getirilmesinde yaygın olarak lamalı katarlar kullanılmaktadır. Son yıllarda kullanımı giderek yaygınlaşan elmas telli katarların kesim performansının lamalı katarlara oranla yüksek olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, endüstriyel çalışma koşullarında 76 telli elmas telli katar ve 75 lamalı katar kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşı doğaltaşlarına ait sekiz (8) adet bloktan elde edilen veriler ile kesim performans ve silim performans analizleri yapılmıştır. Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak elmas telli ve lamalı katar makinelerinin kesim performansı blok boyutu ve kesim süresine göre belirlenmiş ve benzer blok boyutlarında elmas telli katarların yaklaşık 3-4 kat daha yüksek kesim performansına sahip olduğu hesaplanmıştır. Bu levhaların yüzey kalitesi açısından silim makinesinde silim işlemi gerçekleştirilen birim yüzey alanı ile abrasiv tüketimi ve zaman arasındaki ilişki incelenmiş ve elmas telli katarlardan çıkan levhaların silim hattında abrasiv ömrünü 2 kat uzattığı tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen veriler Entropi temelli TOPSİS yöntemi ile analiz edilerek elmas telli katar ile kesilen yüzeylerin kesim kalitesinin silim performansında daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: doğaltaş, lamalı katar, elmas telli katar, kesim performansı, silim performansı

ABSTRACT

In natural stone processing facilities, blade gang saws are widely used to turn blocks into slabs. It is evaluated that the cutting performance of multi-wire gang saws, which have become increasingly widespread in recent years, is higher than blade gang saws. In this study, cutting performance and polishing performance analyses will be carried out with data obtained from eight (8) blocks of cutting and polishing process of limestone and dolomitic limestones natural stones in 76-wire diamond wire gang saw and 75-blade gang saw under industrial working conditions. Considering the physical and mechanical properties of the rocks, the cutting performance of the multi-wire and bladed gang saws was determined according to the block size and cutting time, and it was calculated that the multi-wire gang saws approximately had 3-4 times higher cutting performance at similar block sizes. In terms of the surface quality of these boards, the relationship between the unit surface area, abrasive consumption and time was analysed and it was determined that the boards from the multi-wire gang saws increased the abrasive life of the abrasive by 2 times in the polishing line. In addition, the data obtained were analysed with the Entropy-based TOPSIS method and it was determined that the cutting quality of the surfaces cut with multi-wire gang saws was more effective in polishing performance.

Keywords: natural stone, blade gang saw, multi-wire gang saw, cutting performance, polishing performance

GİRİŞ

Türkiye, mevcut doğaltaş potansiyeli ile önemli bir ülke konumundadır. Üretim miktarı ve ihracat değerleri açısından bakıldığında, Türkiye, doğaltaş sektöründe Dünya’da ilk beş ülke arasında yer almaktadır. Türkiye’nin doğaltaş potansiyelinin daha da etkinliğinin artırılması için doğaltaş üretiminde rekabet gücünün artırılması, ihracatta son ürün pazar payının artması gerekmektedir. Böylece başta istihdam olmak üzere ekonomi vb. gibi birçok alanda katkı sağlanmış olacaktır. Yüksek katma değerli doğaltaş üretim faaliyetlerinin sürdürülebilirliği için doğaltaş işleme tesislerinde yürütülen faaliyetlerin verimliliğinin oldukça yüksek olması önem arz etmektedir.

Doğaltaş işleme tesislerinde üretim aşamasında blokların kesilerek levha veya plaka haline getirilmesinde yaygın olarak S/T (dairese testereli) makineleri ve ketraklar kullanılmaktadır. İşlenmiş doğaltaş ürünlerinin verimli bir şekilde üretiminde, ketrakların ayrı ve önemli bir yeri vardır. Ancak literatürde ketraklar ile ilgili yapılmış çalışmaların sınırlı olduğu söylenebilir. Yeni bir teknoloji olarak sektörün kullanımına sunulmuş olan elmas telli ketraklar ile ilgili çalışma sayısının da daha az olması sebebi ile sektörel farkındalık oluşturulması amacı ile geleceğe ışık tutulması için bu teknolojiler hakkında yapılacak çalışmalar önem arz etmektedir. Lamalı ketraklar gibi geleneksel kesim yöntemine alternatif olarak çıkartılmış olan telli ketrakların kesim kapasitesinin lamalı ketraklara oranla daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, enerji sarfıyatı açısından da daha verimli olduğu belirtilmektedir (Özdoğan, 2025). Elmas telli ketrakların lamalı ketraklara göre avantajları ve dezavantajları karşılaştırıldığında işçilik maliyetleri ve piyasa rekabet koşulları anlamında da daha avantajlı olduğu ortaya konulmuştur (Kundak ve Yurdakul, 2023). Elmas telli ketrakların kesim performansı açısından değerlendirildiğinde, lamalı ketraklardan daha yüksek kesim hızına ulaşması sayesinde kesim performansının daha yüksek olduğu belirlenmiş ve kesim hızının optimum değerinin altında olduğu koşullarda dahi lamalı ketraktan daha iyi kesim performansı sergilediği anlaşılmaktadır (Özsarı ve Engin, 2024). Dolomit kayaçların elmas telli ketraklar ve lamalı ketraklarda kesim performanslarının araştırılması sonucunda ise elmas telli ketraklarda levha kesim işlemine tabi tutulan blokların, lamalı ketraklarda levha kesim işlemine tabi tutulan bloklardan yaklaşık 3 kat daha hızlı kestiği bulunmuştur (Özdoğan and Demirdağ, 2024).

Elmas telli ketrakların ilk prototipleri 1990’lı yıllarda İtalya’da ortaya çıkmıştır (Konstanty, 2021). İlk üretilen telli ketraklar granit kesimi için tasarlanmıştır. Sonraki yıllarda elmas telli ketraklar gelişen teknolojiye uygun olarak yeniden tasarlanmış ve tüm doğaltaşların kesilmesine imkân sağlamıştır.

Yapılan bu çalışma ile öncelikli olarak bilimsel olarak verimli çalışma koşullarının oluşmasında yeni nesil elmas telli ketrakların katkısı araştırılması amaçlanmıştır. Bunun yanında sektörel farkındalık oluşturulması amaçlanmış olup söz konusu telli ketrakların ve lamalı ketrakların kesim performanslarının karşılaştırılmasına yönelik çalışmalara ışık tutması hedeflenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Bu çalışma kapsamında sayısal veriler Burdur 2. Organize Sanayi Bölgesinde yer alan 2022 yılında faaliyete geçen doğaltaş işleme tesisinden gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir. Tesis bünyesinde blok kesiminde 14 adet yerli imalat 75 bıçaklı lamalı ketrak makinesi, 2’si 76 telli ve diğeri 44 telli olmak üzere toplam 3 adet yabancı menşeli elmas telli ketrak makinesi bulunmaktadır.

Çalışmada sayısal verilerin alındığı lamalı katrak makinesi, yerli bir makine üreticisi tarafından Afyonkarahisar’da üretilmektedir. Söz konusu makinede lama hareket mesafesi 600 mm olarak tasarlanmış olup kurs mesafesi minimize edilmiştir (Şekil 1). Çalışma kapsamında kullanılan lamalı katrağın teknik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Verilerin alındığı lamalı katrak makinesi

Çizelge 1. Lamalı katrak makinesinin teknik özellikleri (Demmak, 2024)

Kesilebilir Blok Boyu	cm	320
Kesilebilir Blok Yüksekliği	cm	205
Kesilebilir Blok Genişliği	cm	185
Devir Sayısı	d/d	92
Testere Lama Hareketi	mm	600
Su Sarfıyatı	lt/dk	750
Tahrik Kol Uzunluğu	m	7

Gerçek zamanlı sayısal verilerin alındığı Brezilya menşeli yüksek kesim hızına sahip elmas telli katraкта yapılan çalışmada 2,3 m/h kesim hızına kadar ulaşıldığı görülmüştür. 7,3, 6,3 ve 5,3 mm çaplı tellere sahip olacak şekilde 15’den 76’ya kadar farklı tel sayılarında makineler olabilmektedir. Verilerin alındığı elmas telli katrak makinesi ise 6,3 mm çaplı tele sahip olan 76 telli MH76-V6 modelidir (Şekil 2). Çalışma kapsamında kullanılan elmas telli katrağın teknik özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Verilerin alındığı elmas telli katrak makinesi

Çizelge 2. Elmas telli katrak makinesinin teknik özellikleri (Hedel, 2024)

Kesilebilir Blok Genişliği	cm	350
Kesilebilir Blok Yüksekliği	cm	220
Tel Gerilimi	kg	180
Çevresel Hız	m/h	23/35

Tel Uzunluğu	m	20
Yüklenen Güç	KVA	278/449
Su Sarfıyatı	lt/dk	1140

Metot

Çalışma kapsamında yapılan çalışmalar sırası ile aşağıda belirtilmiştir.

1. Çalışma kapsamında ilk olarak kesilecek bloklar belirlenmiştir. Gerçek zamanlı piyasa beklentileri ile faaliyetlerin yürütüldüğü doğaltaş işleme tesisinde seçilen bloklar pazar talepleri çerçevesinde değerlendirmeye alınmıştır. Bu kapsamda dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşı olarak 2 farklı kayaç türü seçilmiştir.
2. Telli ve lamalı katrakta kesimleri yapılan blokların kesim süreleri kayıt altına alınmıştır.
3. Silim hattında, abrasiv değişimleri arasında işleme tabi tutulan levhaların yüzey alanları m² olarak ölçülmüştür.
4. Elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılarak sayısallaştırılmış ve karar matrisleri oluşturularak hesaplamalar yapılmıştır.

BULGULAR

Dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşı olarak 2 farklı kayaç türü için elmas telli ve lamalı katraklarda kesim performans özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan ölçüm ve istatistiksel analiz çalışmalarından elde edilen bulgular bu bölümde verilmiştir.

Dolomitik kireçtaşı bloklarının çıkarıldığı doğaltaş ocağı, Isparta ili, Aksu ilçesi, Karacahisar köyü sınırları içerisinde ve kireçtaşı bloklarının çıkarıldığı doğaltaş ocağı ise Antalya ili, Finike ilçesi, Alacadağ mahallesi sınırları içerisinde yer almaktadır.



Şekil 3. Katrakta kesilmiş dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşının görünümü

Doğaltaşların fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Kayaçların fiziksel özellikleri incelendiğinde, dolomitik kireçtaşının açık gözenekliliğinin ve toplam gözenekliliğinin

kireçtaşı'nın değerlerinden belirgin oranda düşük olduğu, kireçtaşı kayacının aşınma direncinin ise daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımında ise dolomitik kireçtaşı'nın dayanımının kireçtaşı dayanımının yaklaşık 3 katı olduğu görülmüştür.

Çizelge 3. Doğaltaşların fiziksel ve mekanik özellikleri

	Özgül Ağırlık	Görünür Yoğunluk	Açık Gözeneklilik	Toplam Gözeneklilik	Aşınma Direnci	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (TEBD)
	g/cm ³	g/cm ³	%	%	mm	MPa
Dol. Kir.	2,82	2,739	2,06	2,87	20,20	146
Kireçtaşı	2,71	2,410	8,80	11,14	26,62	52

Elmas telli katrakta yapılan kesimlerde kesim hızı saatte 70 cm olarak ve lamalı katrakta ise kesim hızı saatte 18 cm olarak sabit tutulmuştur. Kesim performanslarının saatlik olarak karşılaştırılmasında dayanımı yüksek ve gözenekliliği az olan dolomitik kireçtaşı'nın kesim performansının kireçtaşı'ndan biraz daha düşük olduğu hesaplanmıştır. Elmas telli katrakta saatte ortalama 1,2-1,4 m²'lik alanın kesiminin yapılabildiği ve lamalı katrakta ise saatte ortalama 0,3-0,4 m²'lik alanın kesiminin yapılabildiği tespit edilmiştir. Blok boyutları (m) ve kesim süreleri (h) Çizelge 4'te verilmiştir. Hesaplanan değerler açısından elmas telli katrağın kesim performansının yaklaşık 3-4 kat daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 4. Katrakların blok kesim süreleri

Elmas Telli Katrak Kesim Performansı							Lamalı Katrak Kesim Performansı						
İsim	Gen. (m)	Yük. (m)	Uzun. (m)	Zaman (h)	Kes. Alanı (m ²)	Kesim Perf. (m ² /h)	İsim	Gen. (m)	Yük. (m)	Uzun. (m)	Zaman (h)	Kes. Alanı (m ²)	Kesim Perf. (m ² /h)
Dol. Kir.	1.0	1.6	3.0	3.7	4.8	1.29	Dol. Kir.	0.8	1.6	2.0	9.4	3.2	0.34
Dol. Kir.	1.5	1.9	2.4	3.7	4.6	1.23	Dol. Kir.	1.2	1.7	3.0	14.4	5.1	0.36
Dol. Kir.	2.1	1.9	2.9	4.5	5.6	1.25	Dol. Kir.	1.8	1.6	3.0	14.3	4.9	0.34
Dol. Kir.	1.8	1.6	2.8	3.6	4.5	1.26	Dol. Kir.	1.5	1.7	3.1	15.6	5.4	0.35
Kireçtaşı	0.8	1.9	2.2	2.7	4.1	1.53	Kireçtaşı	1.3	1.5	2.2	8.5	3.4	0.39
Kireçtaşı	1.2	1.7	2.3	2.8	3.9	1.40	Kireçtaşı	1.5	1.8	2.4	10.7	4.4	0.41
Kireçtaşı	1.9	1.7	2.5	2.8	4.2	1.47	Kireçtaşı	1.6	1.8	2.4	10.6	4.3	0.40
Kireçtaşı	1.0	1.4	1.9	2.1	2.7	1.31	Kireçtaşı	1.2	1.5	2.8	10.5	4.3	0.41

Çalışma kapsamında katraklarda kesilen doğaltaş levhalarının kesime bağlı olarak yüzey kalitesinin silim aşamasında abrasiv tüketimini nasıl etkilediğinin belirlenmesi için, abrasivlerin kafalara takılıp, ilk kullanımından tükenmesine kadar geçen süre içinde silim hattından geçen toplam levha miktarı, m², olarak 8 farklı periyod için kayıt altına alınmıştır. Abrasiv kullanımı ile ilgili olarak yapılan incelemelerde, elmas telli katrakların ve lamalı katrakların olduğu bölümde 8 kafa silim hattı makinesinin bulunduğu görülmüştür. Elmas telli katrak makinelerinin bulunduğu yerde bulunan silim hattında abrasivlerin yerli üretim olduğu ve lamalı katrakların bulunduğu bölümde yer alan silim hattında ise yabancı menşeli abrasivlerin kullanıldığı görülmüştür. Abrasiv kullanım miktarı ile ilgili sayısal veriler Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Abrasiv kafaların değişim aralığında silim hattından geçen toplam levha miktarı (m²)

Elmas Telli Katrak Hattı	Lamalı Katrak Hattı

2145	981
2048	1052
1987	989
1979	973
2004	1029
1860	966
1947	992
1759	947

Entropi Temelli TOPSİS Yöntemi

Bu çalışmada katarak makinelerinin performanslarını karşılaştırmak ve uygun olan makineyi seçmek için ENTROPİ temelli TOPSİS yöntemi uygulanmıştır. Çalışma kapsamında 2 farklı doğaltaşın lamalı katarak makinesi ve elmas telli katarak makinesi olarak iki farklı blok kesme makinesi ile kesilmesi sonucunda toplam 16 blok 3 kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Dolomitik Kireçtaşı ve Kireçtaşı bloklarının her iki makine ile kesilmesi için üretim planı hazırlanmıştır. Katarak makineleri için karşılaştırılacağı kriterler; blok boyutu (m^3), kesim süresi (dk) ve abrasiv ömrü (m^2) olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan değişkenlerin kodlanması ve blok kesim süresi boyunca yerinde ölçülen değerlerin geometrik ortalamaları Çizelge 6 ve Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 6. Değişkenlerin kodlanması

A1	Elmas Telli Katarak Makinesi	C1	Kesilen blok boyutu (m^3)
A2	Lamalı Katarak Makinesi	C2	Kesim Süresi (dk)
		C3	Abrasiv Ömrü (m^2)

Çizelge 7. Kriterlerin geometrik ortalamaları

	A1	A2
C1	5.758	5.781
C2	191	692
C3	1963	991

Çizelge 7’de verilmiş olan blok boyutu (C1), kesim süresi (C2) ve abrasiv ömrü (C3) Çizelge 5 ve Çizelge 6’da verilen değerlerin geometrik ortalaması ile hesaplanmıştır. Kriterler açısından makineler karşılaştırıldığında, ideal olan ekipman A1 kodlu elmas telli katarak makinesi olarak görülmektedir. Firmalar tarafından istenilen minimum sürede, maksimum blok keserek, abrasiv ömrünü maksimum miktarda kullanarak daha ekonomik ve daha hızlı üretim yapmaktır.

Bu çalışmada ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) yöntemlerinden objektif bir yaklaşım olan ENTROPİ yöntemi ile kriterlerin ağırlıkları belirlenmiştir. Çizelge 8’de özet olarak verilen ağırlıklandırma dereceleri Excel dosyasında hesaplanmıştır. Burada gerçek değerler ile oluşturulan karar matrisi normalize edilmiş daha sonra kriterlere ilişkin entropi değerleri hesaplanmıştır. Son olarak farklılaşma derecesi (dj) ve entropi değerlerinden (ej), her bir kriterin ağırlık derecesi (wj) bulunmuştur.

Çizelge 8. ENTROPİ yöntemi ile ağırlıklandırma

Karar Matrisi			
	C1	C2	C3
A1	5.758	191	1963
A2	5.781	692	991
	11.539	883	2954
Normalize Karar Matrisi			
	C1	C2	C3
A1	0.499	0.216	0.665
A2	0.501	0.784	0.335
Kriterlere İlişkin Entropi Değerleri			
	C1	C2	C3
A1	-0.72	-0.14	-1.63
A2	-0.72	-3.22	-0.31
$k=1/\ln(m)$	1.4427		
e_j	2.0814	4.8498	2.7898
d_j	-1.0814	-3.8498	-1.7898
wj	0.1609	0.5728	0.2663

ENTROPİ sonucunda ağırlık değerleri $w_{C1}=0.1609$; $w_{C2}=0.5728$; $w_{C3}=0.2663$ olarak hesaplanmıştır. Ağırlık değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değer en önemli kriter olduğu söylenebilir. Buna göre en önemli kriterin C2-kesim süresi olduğunu ve sırasıyla C3-abrasiv ömrü, C1-blok boyutu olduğunu söylemek mümkündür. Gerçek değerler ile hesaplanan bir başka ÇKKV yöntemlerinden olan TOPSİS yönteminde dikkat edilmesi gerekli kısım amaç fonksiyonlarının minimum-maksimum hedefleri doğrultusunda ideal ve negatif ideal çözümlerin dikkate alınmasıdır. Kriterler minimum-maksimum amaçlarına göre değerlendirildiğinde; blok boyutunun (C1) maksimum, kesim süresinin (C2) minimum ve abrasiv ömrünün (C3) maksimum seviyede olması istenilmektedir (Çizelge 9).

Çizelge 9. ENTROPİ temelli TOPSİS yöntemi ile lamalı ve elmas telli katrak makinelerinin karşılaştırılması

Karar Matrisi			
Amaç	max	min	max
	C1	C2	C3
A1	5.758	191	1963
A2	5.781	692	991
Normalize Karar Matrisi			
	C1	C2	C3
A1	0.706	0.266	0.893
A2	0.709	0.964	0.451
Normalleştirilmiş Ağırlıklı Karar Matrisi			
	max	min	max
wj	0.1609	0.5728	0.2663
	C1	C2	C3

A1	0.1135	0.1522	0.2377
A2	0.1140	0.5522	0.1200
Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözümlerin Belirlenmesi			
Amaç	max	min	max
	Negatif ideal	Pozitif ideal	Negatif ideal
Smax	0.1140	0.5522	0.2377
	Pozitif ideal	Negatif ideal	Pozitif ideal
Smin	0.1135	0.1522	0.1200

Amaç fonksiyonlarına göre hesaplanan izafi yakınlıklar sonucunda C* değeri büyükten küçüğe doğru sıralama yapılmaktadır (Çizelge 10).

Çizelge 10. TOPSİS yöntemi ile lamalı ve elmas telli katraş makinelerinin karşılaştırılması

Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözümlere Uzaklıkların Hesaplanması					
	Pozitif İdeale Olan Uzaklıklar			Toplam	Si ⁺ toplamın karekoku
A1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00046
A2	0.00000	0.16002	0.01387	0.17389	0.41700
	Negatif İdeal'e Olan Uzaklıklar			Toplam	Si ⁻ toplamın karekökü
A1	0.00000	0.16002	0.01387	0.17389	0.41700
A2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00046
İdeal Çözüme İzafi Yakınlıkların Hesaplanması					
	Si ⁺	Si ⁻	Toplam	C*	Sıralama
A1	0.00046	0.41700	0.41745	0.9989	1
A2	0.41700	0.00046	0.41745	0.0011	2

Doğaltaş türü ayırt edilmeksizin yapılan TOPSİS yönteminde sonuçlar Çizelge 10'da belirtilmiştir. A1 kodlu elmas telli katraş makinesinin C* değeri 0,9989 olarak hesaplanmıştır. TOPSİS yöntemine göre elmas telli katraşının seçilmesinin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanında bulgular kısmında belirtildiği üzere kesim performansı, kesim süresi ve abrasiv ömürleri açısından hesaplanan sayısal değerlerde elmas telli katraşın, lamalı katraşa göre daha avantajlı olduğu anlaşılmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında farklı özellikteki iki farklı doğaltaş için toplam 16 bloğun, elmas telli katraş ve lamalı katraşta kesim performansları ve silim hattında kullanılan abrasivlerin ömürleri incelenmiştir. Yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucunda; ENTROPİ temelli TOPSİS yöntemi ile lamalı ve elmas telli katraş makinelerinin karşılaştırılması neticesinde elmas telli katraş makinesinin lamalı katraşa oranla kesim performansının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Kesim performansları, kesilen yüzey alanlarına göre elmas telli katraşta 1,34 m²/h, lamalı katraşta ise 0,38 m²/h olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre elmas telli katraş makinesi ile yapılan kesimlerin lamalı katraşlar ile yapılan kesimlere göre 3-4 kat daha verimli olduğu belirlenmiştir. Elde

edilen verilere göre elmas telli katrakta kesilen kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin kesim performansı üzerinde kısmen bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Dayanımı düşük, gözenekliliği fazla olan kireçtaşı kayacında kesim performans değerlerinin biraz daha yüksek olduğu görülmüştür.

Ayrıca silim hattında abrasiv ömrü açısından incelendiğinde, elmas telli katraklardan çıkan levhaların kesime bağlı olarak yüzey kalitelerinin lamalı katraklar ile kesilen levhalara göre daha iyi (testere izi, dalgalanmalar, kalınlık farklılığı vb.) olduğundan abrasiv ömürleri 2 kat artmıştır. Elmas telli katraklar ile kesimin daha stabil olması (titreşimin olmaması vb.), kesilen doğaltaş levhalarının yüzeylerinin daha düzgün olması, kalınlık farklılıklarının daha az olması nedeni ile silim hattında daha az aşındırma ile istenilen cila kalitesine ulaşılabilirdiği düşünüldüğünden abrasiv ömürleri artmaktadır.

Günümüzde elmas telli katraklar doğaltaş işleme tesislerinde henüz yaygın olarak kullanım alanına sahip değildir. Makinenin kullanım yaygınlığının henüz istenilen seviyede olmamasının sebepleri; ilk yatırım maliyeti açısından lamalı katraklara oranla 3-4 kat daha yüksek olması, makine üreticisi sayısının az olmasına bağlı olarak yaygın servis ağının olmaması ve henüz yeni sayılabilecek bir teknoloji olmasından kaynaklı yetişmiş operatör sayısının fazla olmaması olarak sıralanabilmektedir. Ancak kesim performansının yüksek olması sayesinde işletme maliyetlerinin azaltılmasında önemli bir rol oynayacağı düşünüldüğünde gelecek yıllarda kullanımının oldukça yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- DEMMAK A.Ş. (2024). Demmak DK-75L Kataloğu. Afyonkarahisar.
- HEDEL MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. (2024). <https://hedel.ind.br/storage/catalogo/catalogo-delta-wire-2-force-en.pdf> Erişim Tarihi: 26.03.2025.
- Konstanty, J. S. (2021). The Mechanics of Sawing Granite with Diamond Wire. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 116(9-10), 2591–2597.
- Kundak, E., Yurdakul, M. (2023). Doğaltaş Blok Kesme Proseslerinde Yeni Teknoloji: Tel Katraklar. 28. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı (ss. 402–411). Antalya, Türkiye.
- Özdoğan, A. K., Demirdağ, S. (2024). Doğaltaş İşleme Tesislerinde Kullanılan Katrakların İncelenmesi. 6th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, Konya, Türkiye.
- Özdoğan, A. K. (2025). Doğaltaş Kesiminde Kullanılan Klasik ve Telli Katrakların Kesim Performanslarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi. Isparta.
- Özsarı, M., & Engin, İ. C. (2024). Çok Telli Mermer Blok Kesme Makinalarının Üretim Performansı Bakımından İncelenmesi. 3. Kocatepe Mühendislik Bilimleri Öğrenci Sempozyumu, Afyonkarahisar, Türkiye.

KIRIKKALE-ÇELEBİ GRANATLARININ SU JETİNDE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

THE INVESTIGATION OF KIRIKKALE ÇELEBİ GARNET IN WATER JET CUTTING

S. Kulaksız

ÖZ

Bu araştırmada Kırıkkale-Çelebi Bölgesi Hacettepe granatlarının mineralojik bileşiminin ve özelliklerinin su jeti kesiminde kullanılabilirliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Bölgenin granat minerallerinin pilot çapta teknolojik olarak kullanımı amaçlanmıştır. Öncelikle granat mineral cinsi ve petrografik olarak bileşenleri tespit edilmiştir. Su jeti kesiminde istenilen tane boyutuna göre kırma-öğütme sınıflandırması yapılmıştır. Son aşamada doğaltaşların su jeti ile kesimi sanayi tipi makineler da denenmiştir. Deneme sonucu olumlu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Granat mineralleri, Su jeti, Granatfelsler

ABSTRACT

The aim of this investigation is Kırıkkale- Çelebi Hacet Mountain range garnet mineralogical composition and its usage in water jetcutting. At the same time experimentaly pilot plant work do. At the first step determination of mineral composition and petrograhical analysis were done. Later garnelfels samples were broken into desired water jet cutting specific norms and classified. The prepared samples were used natural stone cutting with water jet machine. Experimental result were found satisfactory.

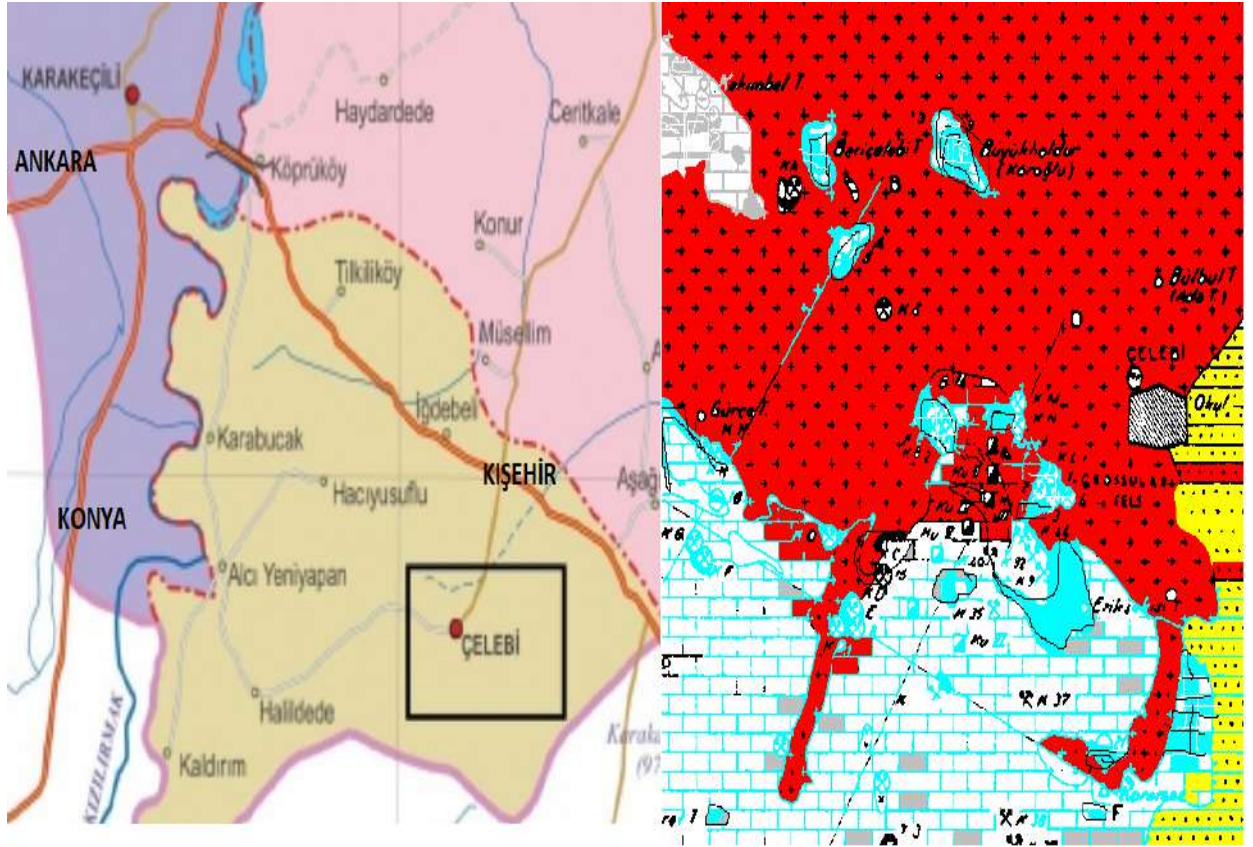
Keywords: Granat minerals, Water jet, Granatfels

1-GİRİŞ

Bu araştırmada endüstriyel hammaddelerin değerlendirilmesi için genel anlamda hammaddenin tanımlanması mineralojik ve petrografik tanımları yapılmıştır. Ülkemizde granat mineralleri hammadde olarak üretimi yapılamamaktadır. Türkiye sahip olduğu bu rezerve doğaltaş sektöründe kullanılması amacıyla çalışma yapılmıştır.

1. 1. Bölgenin Maden Yatakları Konumu ve Jeolojisi

Çelebi bölgesi Kaman-Ankara yoluna 5 km uzaklıkta olup hiçbir şekilde ulaşım sorunu yoktur. (Şekil-1).



Şekil 1. Yer bulduru ve jeoloji haritası (Yılmaz 1960 ‘dan değiştirilerek verilmiştir).

Önceki çalışmalardan mineral yatağının genel bir özeti aşağıda verilmektedir. Yılmaz (1960) göre metamorfik birimler içinde 5-10 metre kalınlığında skarn zon mineralleşmesi ve bu zon içinde granatfelslerin %95’ini granat minerali olduğu belirtilmektedir. Skarn-granatfelsler taktik olarak adlandırılmıştır. Bu zon içerisinde ana mineral türü grossular ve yer yer andradit bantlaşmalarının olduğu belirtilmektedir.

Mineralojik bileşiminde bunların dışında, kalsit, kuvarz, piroksen, demir, diyopsit, epidot, aktinolit-tremolitin varlığı saptanmıştır.

Ön çalışmalarda granat minerallerinin bulunduğu alanlar: Köroğlu, Bericelebi, Gürce, Hacet, Ziyaret, Çardak, Koramaz tepelerde gözlenmiştir. Bu çalışmada granat örnekleri Hacet Tepe ile Erikli Sekisi Tepe arasından alınmıştır.

Mineralojik bileşiminde yer alan tali mineraller ince kesitlerde çoğu zaman yer almamaktadır.

1.2. Granat Minerallerinin Özellikleri ve Çelebi Granatları

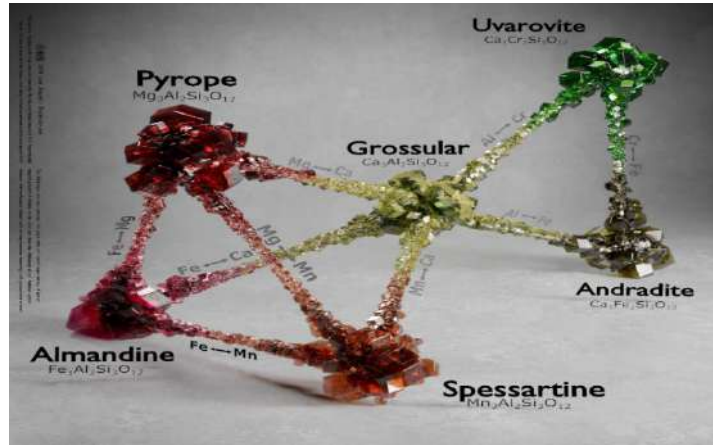
Granat grubu mineralleri kübik sistemde kristalleşen, camsı görünümlüdür. Kimyasal bileşenlerine göre renk, sertlik ve yoğunlukları da farklıdır (Çizelge 1).

Bilindiği üzere granat grup mineralleri doğada en çok bulunmasına göre iki ana grupta–(ugrandit, pirop) toplanmakta birinci grup pirop-almandin-spesartit, ikinci grup grosüler- andradit- uvarovit yer almaktadır (Şekil 2).

Çizelge 1. Granat grubu minerallerin fiziki özellikleri

Mineral	Formül	Renk	Yoğunluk	Sertlik
Piop Serisi				
Piop	$3\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Koyu kırmızı	6,5-7,5	3,5-3,8
Almandin	$3\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Kırmızı-kahverengi	7,5	3,9-4,2
Spesartin	$3\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Kahverengi, kırmızı	7,0-7,5	4,1-4,3
	$3\text{CaO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Zümrüt yeşili	7,5	3,5-3,5
Ugrandit Serisi				
Uvarovit	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Zümrüt yeşili	7,0	3,5-3,7
Grosüler	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Soluk yeşil	7,0	3,5-3,7
Andradit	$3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Koyu kahve-yeşil	6,5-7,0	3,7-3,8

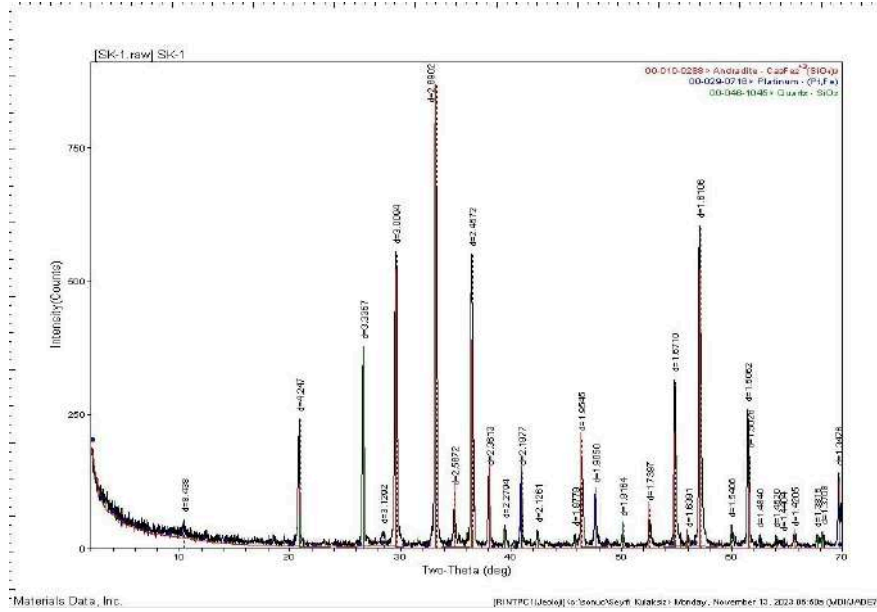
Granat minerallerinin kendi aralarında katı-çözelti durumuna göre ilişkileri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Granat grubu minerallerinin katı çözelti bileşiklerine göre isimlendirilmesi

Bunların detay kimyasal analiz sonuçlarına göre isimlendirme yapılmaktadır (Kulaksız, diğ.1992 ve Ören, Atalay 2024).

Yılmaz (1960) tarafından grossuler olarak tanımlanan granat minerallerinin Şekil 3. H.Ü. Jeoloji Müh. Laboratuvar analizinde görüldüğü gibi andradit hakim mineral konumundadır. Buna göre ana bileşenin %98 andradit tali bileşen olarak demir minerali ve kuvars olduğu saptanmıştır. Masif yapısından dolayı granatfels yatağı olarak adlandırıldı.



Şekil 3. Çelebi –Hacet T.granat örneği X-ışınları analiz diyagramı

2-ÖRNEKLERİN HAZIRLANMASI VE SU JETİ MAKİNASINDA KULLANIM DENEYİ

Arazi çalışmalarında örnekler balyozla kırılarak yaklaşık 5-20 cm çapında olacak şekilde alınmıştır. Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümünde çeneli ve merdaneli kırıcılarda kırılmıştır. Kırılmış örnekler 80-155 mikron tane boyutu aralığında elenerek hazırlanmıştır. Şekil 4a da tane boyut ve şekilleri verilmiştir. Tane şekilleri daha çok köşelidir. Pilot çapta sanayi tipi su jeti kesme deneyleri Mersin Özdaş Mermer atölyesinde yapılmıştır.



Şekil 4a. Kırılmış örnek tanelerinin mikroskopda görünümü

3- TÜRKİYE VE DÜNYADA GRANAT ÜRETİM-TÜKETİM PAZARLAMA VE GELECEĞİ

Ülkemizde granat üretimi özelleştirme öncesi Etibank Uludağ volfram işletmesinde ikincil ürün olarak üretimi yapılmakta idi. Kullanım olarak abrasif aşındırıcı, kömür zenginleştirmede ağır ortamlarda kullanılmakta idi. Ayrıca bunun için açık ocak açılmıştı (Şekil 5).



Şekil 5. Uludağ volfram ocağı (kapalı) ve granatfels el örneği

Abrasif olarak ön teknolojik çalışmaları yapılmış sahalar ise Bursa–Uludağ, İnegöl, Uşak granatlarıdır (Engin İ.C, 2002). Bu belirtilen sahaların rezerv miktarları birkaç milyon tonun üstündedir. Bu sahalar Balıkesir-Şamlı, Kırıkkale-Çelebi eklemek gerekir. Rezervlere yönelik hiçbir detay çalışma bulunmamaktadır. Ön gördüğüm rezervler şahsi saha gözlemleridir. Bugün için ülkemizde üretim yapılmamaktadır. Teknolojik çalışmaları yapılanlar ise Çizelge 2’de verilmiş olup buna Aydın-Çine mineralojik-kimyasal analizler yapılmış olan granat sahaları da dahil edilebilir (Ören 2023). Farklı kimyasal analiz yöntemlerden dolayı Whipp (2006) ve Ören (2023) element % değerlerinde farklılıklar olmasına rağmen granat isim tanımlamaları uyumluk göstermektedir (Çizelge 2). Örneklem yöntemleri, lokasyon farklılıkları, bozunmalardan kaynaklanan şartlar etken olmuş olabilir. Bazı Türk granatlarının kimyasal analizleri (Engin 2000; Kulaksız 2000; Engin vd. 2002; Whipp 2006; Ören 2023) karşılaştırılmalı verileri Çizelge 2.de verilmiştir. Ayrıca ithal edilen bir Almandin granat analizi de verilmiştir.

Çizelge 2. Bazı Türk granatlarının kimyasal bileşimleri

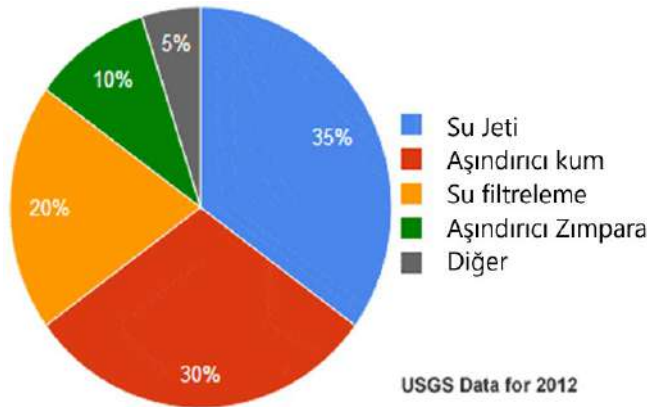
	Ulu1	Ulu2	İnegöl	Uş-1	Uş-2	Kam	Ay-Hacı	Ay- Çam	Çel	İthal
SiO ₂	36,65	35,56	34,60	38,40	38,71	36,21	48,40	36,23	36,80	38,62
Al ₂ O ₃	10,73	14,16	1,54	18,98	21,67	13,88	16,23	30,36	4,05	22,76
Fe ₂ O ₃	14,48	10,64	31,60	31,75	31,76	7,30	27,26	29,96	24,87	29,32
CaO	26,00	29,66	27,60	5,43	5,21	33,04	3,88	7,97	32,36	1,94
MnO	6,87	4,86	1,40	0,42	1,18	0,18	1,51	2,62	0,18	4,87
MgO	0,37	0,04	0,95	1,93	1,93	1,86	0,55	0,60	0,89	0,98

Na ₂ O	0,21	0,17	0,04	0,12	0,09	0,19	0,50	0,54	0,01	0,12
K ₂ O	0,08	0,03	0,08	0,09	0,15	0,01	0,33	0,15	0,01	0,01
TiO ₂	0,06	0,06	0,06	0,74	----	0,92	0,45	1,25	1,20	0,46
LOİ	1,60	0,87	0,87	0,46	4,04	0,56	----	----	0,23	----

* Ulu1, 2: Uludağ, Uş-1,2: Uşak, Kam: Kaman, Ay-Hacı- Çam: Aydın Hacıaliler – Çamlık, Çel: Çelebi

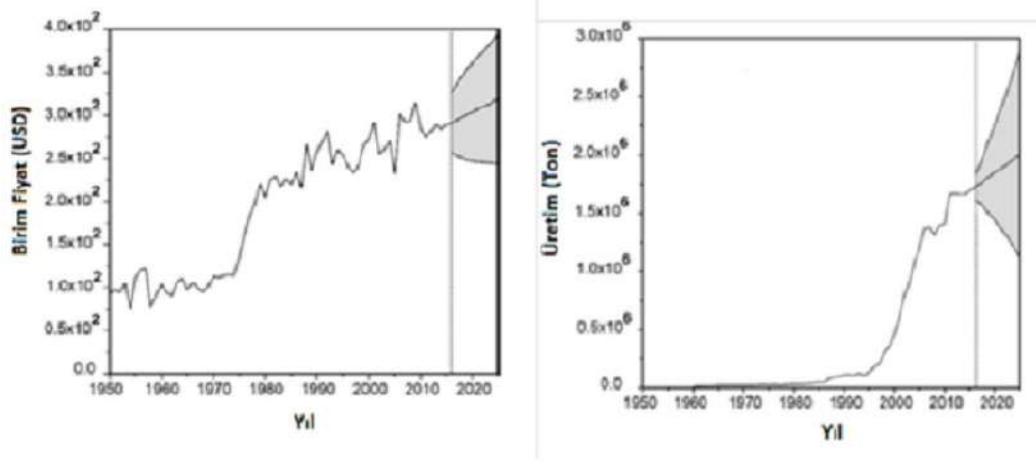
Dünya’da granat üretimi ise Avusturalya 350 000 ton, Çin 310 000 ton, ABD 200 000 ton, Güney Afrika 180 000 ton, Hindistan 120 000 ton, diğer ülkeler 80 000 ton üretim yapmaktadırlar. Satış fiyatları ise granat türü, kalitesi, tane boyutlarına göre değişmekte olup tonu 200-500 USD dolar aralığında değişmektedir.

Kullanım alanlarına dağılım aşağıda Şekil 6 ‘da verilmiştir.



Şekil 6: Granatların tüketim-kullanım alanlarına göre yüzde dağılımları

Amila vd. (2020) tarafından Dünya üretim ve fiyat değişimleri üstünde yapılan bir çalışma sonuçları değerlemesi Şekil 7’ de verilmiştir. Bu çalışma analiz sonuçlarına göre üretim ve birim fiyatın dünya genelinde 2025 yılına kadar her yıl %1-2 artış olacağı öngörülmek verilen grafiğin gri renkli bölgesinde gösterilmektedir.



Şekil 7. Yıllara göre granat dünya üretim-birim fiyatı ve 2025 ön görüler

4- SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ön inceleme-araştırma olup saha potansiyel olarak yeterli rezerve sahiptir. Son saha çalışmaları granatfels zon kalınlığı 10-30 metre olduğu saptanmıştır.

Çalışma sonuçlarına göre Çelebi granatları aşındırıcı su jeti kesim makinalarında kullanabilir kalitede olduğu saptanmıştır.

Su jeti kesim makinalarında kesimlerde dakikada 100-1000 gram granat tüketilmektedir. Klasik kesimler için ön görülen tane boyutu bu tesisde çok ince kalmıştır. Yapılan kesim kalitesi ve yüzey özellikleri açısından karşılaştırma yapmak mümkün olmamıştır.

Neden bu hammaddeyi ülkemizde üretimi yapılamamaktadır sorusunun cevabı mevcut ruhsatlarla çıkışması, granat minerallerinin süs taşları-kıymetli taşlar grubunda yer alması, engel teşkil etmektedir. İhracat açısından Türkiye, Çin ve Hindistan'a göre Avrupa ve Akdeniz ülkelerine yakınlık açısından daha avantajlıdır. Yasal sorunların çözülmesi durumunda granat ithalatına ödenen döviz yurt içinde kalması ile birlikte ayrıca ülkeye döviz kazandırılacaktır.

TEŞEKKÜR

Saha çalışması ve numune hazırlama ve analizlerde katkı koyan Y.İ. Yahşi'ye, Doç.Dr. Namık Aydoğan'a, Prof. Dr. Abidin Temel'e ve Özdaş Mermer Haydar Özdaş'a, Maden mühendisi Hakan Okumuş'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Amila, S. R., Hasitha, C. S., Hasitha, S. (2023). Journal of Geological Society of Sri Lanka, 24(1), 1–22.

Çapalkulu, F. (1980). Horoz granodiyoritinin İncelenmesi. TJK. 32 Kurultay Bülteni, 23, 59–68.

Dana, T., Griffin, H., Phillips, W. R., Kulaksız, S. (1992). Crystal Chemistry & Symmetry of Birefringent Tetragonal Pyrospite 75 Grandite 25 Garnet. American Mineralogist, 77(3–4), 399–406.

Engin, İ. C. (2000). Kırşehir-Kaman Granatlarının Aşındırıcı olarak Kullanım Olanaklarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Engin, İ. C., Özkan, E., Kulaksız, S. (2011). Investigation on the Usage Some Non-Almandine Garnet. GUJ Sci, 14(3), 535–545.

Kulaksız, S. (2002). Akdağ, Menders, Kırşehir, Akdağmadeni Masifi Granatlarının Doğal Aşındırıcı Olarak Kullanılmasının Araştırılması. (TÜBİTAK Proje No: YBADCAG 199Y-28).

Ören, U. (2023). Türkiye’de Seçili Granatların Mineralojik, Petrografik, Jeokimya ve Gemolojik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ören, U., Koralay, T. (2023). Mineralogical Geochemical and Gemological Aydın-Çine. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(7), 763–783.

Phillips, R. W., & Giffen, D. T. (1981). Optical Mineralogy. W. H. FREEMAN and COMPANY.

Ratnayake, U. W., Subasinghe, C., & Sampath, A. (2023). Global Production and Price Variations of Selected Critical Commodities. Journal of Geological Society of Sri Lanka, 24(1), 1–22.

USGS. (2022). Mineral Commodity Summaries 2022. Garnet.

Whipp, Ç. L. (2006). İzmir Cumaovası-Görece civarı volkanitleri ve Menderes masifi metamorfikleri içinde bazı granatların mineralojik-petrografik ve jeokimyasal incelenmesi ve olası arkeogemolojik bağlantıları. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yılmaz, S. (1960). Keskin Çelebidağ bölgesindeki Grenatfelsler. MTA Dergisi, (55), 100–103.

geolgy.com. (2012). Garnet (H. King). <https://geolgy.com>

<https://www.google.com/search?q=geologyisthe.com>. Garnet. <https://geologyisthe.com>

KARBÜR KAPLAMALI TAKIMLA İŞLEMEDE İRİ TANELİ MERMER ÜZERİNDEKİ PERFORMANS ANALİZİ VE TAKIM AŞINMASI

PERFORMANCE ANALYSIS AND TOOL WEAR IN CARBIDE COATED TOOL MACHINING ON COARSE GRAINED MARBLE

O. Öz ^{1*}, N. Çetingül ², E. Özkan ¹

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

² Maden Mühendisi

*Sorumlu yazar: oguzhanoz@aku.edu.tr

ÖZ

Mermerin CNC frezeleme işlemlerinde karbür kesici takımların kullanımı iri taneli mermerlerin işlenmesinde önemli bir maliyet faktörüdür. Takım aşınmasının artması, kesme performansını ve işlenen yüzeyin kalitesini olumsuz etkiler. Bu durum, işleme sırasında daha sık takım değişimi gerektirir ve takım değiştirme maliyetlerini artırır. Çalışmada, iri taneli yapıya sahip metamorfik kökenli bir mermerin CNC tezgahlarda işlenmesi sırasında kullanılan karbür kaplamalı parmak freze takımların aşınma mekanizmaları ve takım ömrü incelenmiştir. En iyi yüzey kalitesi değerini sağlayan parametre kombinasyonu önceki çalışmalarımız referans alınarak uygulanmıştır. Belirlenen kesme parametreleri ile her adımda 0,25 m²'lik kesim alanına frezeleme işlemi yapılmıştır. Her işlem adımında, yüzey pürüzlülük değerleri, kesme kuvvetleri, güç tüketim değerleri ölçülmüş; freze takımları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile elementel analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler, karbür kaplamalı parmak freze takımlarda meydana gelen aşınma türlerini ve aşınmanın takım ömrü üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Takım aşınmasının işleme süreçlerine olan etkisinin anlaşılması hem daha verimli hem de daha ekonomik üretim süreçlerinin tasarlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mermer, frezeleme, aşınma, takım ömrü

ABSTRACT

The use of carbide cutting tools in CNC milling processes of marble is a significant cost factor, particularly when processing coarse-grained marbles. Increased tool wear negatively affects cutting performance and the quality of the machined surface. This situation necessitates more frequent tool changes during machining, thereby increasing tool replacement costs. In this study, the wear mechanisms and tool life of carbide-coated end mill cutters used during the machining of a metamorphic-origin marble with a coarse-grained structure on CNC machines were examined. The parameter combination that provides the best surface quality values was applied based on our previous studies. With the determined cutting parameters, milling operations were performed on a cutting area of 0,25 m² at each step. During each operation step, surface roughness values, cutting forces, and power consumption values were measured; the milling tools were examined using a scanning electron microscope (SEM), and elemental analyses were conducted using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The obtained data revealed the types of wear occurring on carbide-coated end mill cutters and the effects of wear on tool life. Understanding the impact of tool wear on machining processes is of great importance for designing both more efficient and more economical production processes.

Keywords: Marble, milling, wear, tool life

GİRİŞ

Mermerler, dayanıklılığı ve estetik özellikleri sayesinde tarih boyunca sanat ve mimaride önemli bir yere sahip olmuştur. Antik çağlardan günümüze kadar mabetler, saraylar ve sanat eserlerinde yapı malzemesi olarak kullanılan mermerler, günümüzde de blok, levha, plaka gibi yapı taşları ve heykel, sütun başlığı, kabartma, oyma, rölyef, fresk gibi dekoratif ürünler şeklinde işlenerek değerlendirilmektedir. Türkiye, zengin mermer rezervleri ve üretim kapasitesiyle bu alanda dünya genelinde önemli bir konuma sahiptir. CNC makinelerinin mermer endüstrisinde kullanımı, manuel işçiliğe kıyasla daha hassas, hızlı, kaliteli ve çok boyutlu üretim sağladığı için giderek yaygınlaşmaktadır. CNC makineleriyle üretilen ürünler arasında evye, lavabo, mutfak tezgâhı gibi fonksiyonel eşyaların yanı sıra dekoratif tasarımlar da bulunmaktadır. CNC teknolojisinin sağladığı bu avantajlar, doğaltaş sektöründe üretim süreçlerini hızlandırmakta ve kaliteyi artırmaktadır (Öz, 2018; Tuğral 2019; Özkan ve Öz 2020,2021; Özkan vd. 2023,).

Mermerler doğada farklı özelliklerdeki ve farklı boyutlardaki kayaç ve mineral parçalarından oluşan doğal malzemelerdir. Mermerlerin CNC makinelerinde işlenmesinde freze uç, makine parametreleri ve kayaç özellikleri gibi ürün kalitesini etkileyen faktörlerdir. Bu faktörler özellikle ürün kalitesini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Kayaçların kristal yapısı ve mineral tane boyutları yüzey frezeleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisi oldukça fazladır. Maliyet ve zaman yönünden ek işlem ve kayıpları önlemek dekoratif ve sanatsal çalışmalarda malzemenin CNC makinelerde işlendikten sonra el işçiliğine fazla gerek kalmadan üretilmesi önemli bir kalite göstergesi olarak görülmektedir. Parametrelerin deneme yanılma yöntemiyle belirlenmesi zaman alıcı ve maliyetlidir. Karbür kaplamalı takımlar, mermer, traverten ve kireçtaşı gibi taşların işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mermerlerin işlenmesinde uygun parametrelerin belirlenememesi, düşük yüzey kalitesi, düşük verimlilik ve titreşim gibi sorunlara yol açmaktadır. Mermerlerin metamorfik kökenleri nedeniyle doku ve mineral tane boyutları farklılık gösterebilir. Bu durum yüzey kalitesini etkileyen işleme faktörleri değerlendirilerek uygun kesme parametrelerini belirlemeyi zorunlu kılmıştır (Özkan ve Öz, 2023; Öz, 2025; Öz ve Özkan 2025).

Farklı özelliklerdeki doğaltaşlarda yapılan çalışmalarda; Özkan ve Öz (2021) sedimanter kökenli bej mermerlerin frezelemesinde farklı kesme parametreleri ile Taguchi deney metodu uygulanarak işleme parametrelerinin ve mineralojik-petrografik özelliklerin yüzey kalitesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Özkan ve Öz (2020) metamorfik kökenli mermerlerin karbür kaplamalı kesici uç ile frezelemesinde Taguchi deney metodu uygulanarak işleme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Wang vd. (2020) karbür küresel uçlu parmak freze ile mermerin yüksek hızda frezelemesinde işleme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve mermer talaşları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Arunramnath vd. (2019) epoksi granit kompozitlerin frezelemesinde farklı kesme parametreleri ile 'İdeal Çözüme Benzerlik Bakımından Sıralama Performansı' (TOPSIS) yöntemi uygulanarak kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Gyurika and Szalay (2019) farklı kesme hızlarında granit yüzeylerinin frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğü ve ortalama kenar talaş oranlarındaki değişimleri analiz etmişlerdir.

Sarışık ve Özkan (2018) jeolojik oluşumlarına göre sınıflandırılmış 12 çeşit doğaltaş üzerine teğetsel kesme kuvveti (Ft), radyal kesme kuvveti (Ft), özgül enerji (Se) ve özgül kesme enerjisi (Sc) değerlerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Gyurika (2018) granitlerin frezeleme işleminde kullanılan frezeleme takımlarının segmentlerindeki ortalama elmas tane büyüklüğündeki değişiklikleri ile işleme sırasında uygulanan ilerleme hızının granit yüzeylerin kenarlarına göre kenar yontmasına etkilerini araştırmışlardır. Sarışık ve Özkan (2017) parmak frezeli kesici uç ile farklı kesme parametreleri uygulanarak mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin kesme kuvvetleri ve spesifik

kesme enerjisine olan etkilerini araştırmışlardır. Sarıışık ve Özkan (2016) parmak frezeli kesici uç ile farklı kesme parametreleri uygulanarak işleme türü, kesme derinliği ve ilerleme hızına göre mermerlerin işlenebilirliğinde kesme kuvveti ve spesifik enerji değeri üzerine çalışmışlardır.

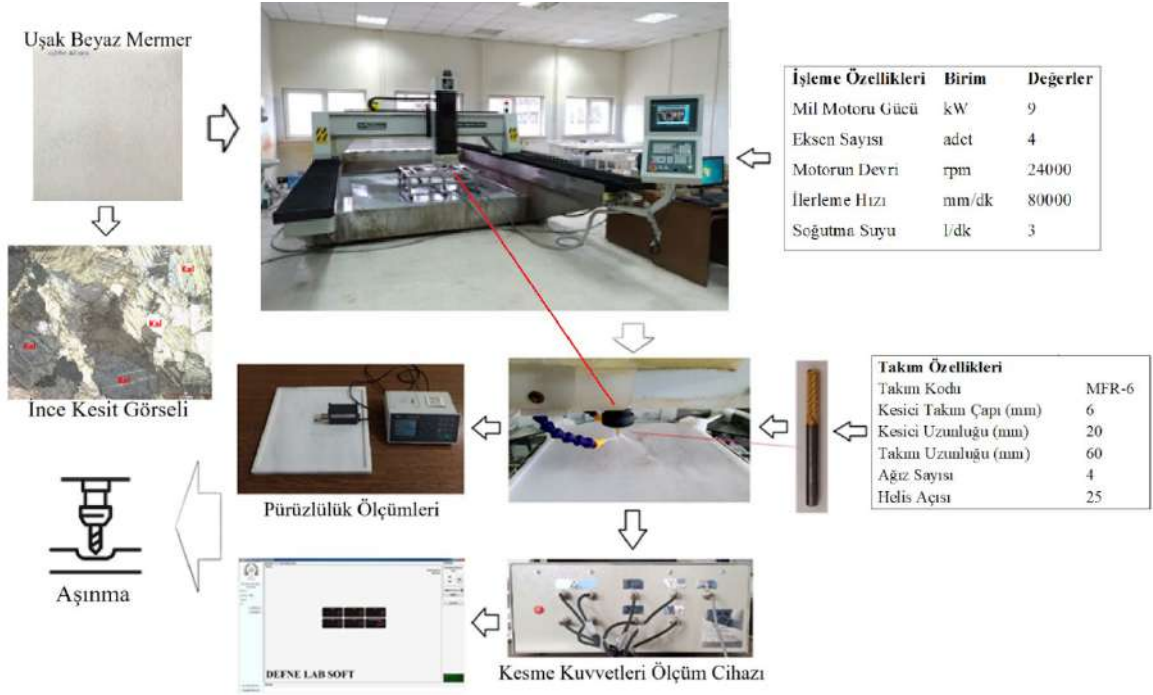
Turchetta (2012) freze makinesi ve elmas kaplı disk ile doğaltaşlar üzerinde yapılan çalışmalarda kesme gücü ve enerjisinin hesaplanması için modeller geliştirmiştir. Zhao ve Lang (2010) granit işlemede, milin dönme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği gibi kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Turchetta vd. (2009) elmas freze kullanılarak beş farklı taşı işlemek için belirli kesme enerjisi ve işlem parametreleri arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için bir model geliştirmeye çalışmışlardır. Kenda ve Kopač (2009) granitlerin elmas kesici uçlar ile işlenmesinde elmas tanelerinin tipi, matrisin sertliği, elmas takımların yapısı, elmas takımların aşınma ilkeleri, suyla soğutmanın ve işleme sürecinin ürün kalitesi ve verimliliği üzerine araştırma yapmışlardır. Polini ve Turchetta (2004) elektroliz elmas freze ile taş şekillendirmede kesme kuvveti ile enerji ve proses parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Kesme kuvveti (veya spesifik kesme enerjisi) ile eşdeğer talaş kalınlığı (veya MRR) arasındaki ilişki üç farklı ilerleme hızı için güç fonksiyonu ile modellenmiştir.

Bu çalışmada mermerin CNC ile frezelemesinde, önceki yapılan çalışmalar referans alınarak Uşak Beyaz mermerin en uygun işleme parametreleri uygulanarak karbür kaplamalı takımın aşınma durumu araştırılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Uşak ilindeki mermer ocaklarından çıkarılan metamorfik kökenli kayalar kullanılmıştır. Frezeleme işlemleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan ve doğaltaş sektöründe yaygın olarak kullanılan Megatron Marka 4-Eksenli CNC makinesi kullanılmıştır.

Çalışmada, 300*300 mm ebatlarındaki numunelerin üzerinde deneyler yapılmıştır. İşlenecek geometrinin modellenmesi ve NC kodlarının oluşturulmasında AlphaCAM programı kullanılmıştır. Güç ve yük ölçer test cihazı ile CNC ile işleme yaparken harcanan enerji (watt) ve kesme kuvveti (N) (F_x , F_y , F_z) verilerinin ölçümü yapılmıştır. Frezeleme sonrası oluşan yüzeyin pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Deney akış şeması Şekil 1’ de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney akış şeması

Uşak Beyaz mermerinin petrografik incelemeleri sonucunda, minimum 37,0 μm , maksimum 1601,8 μm ve ortalama 524,7 μm boyutlarında kalsit minerallerinden oluştuğu ve kristalin dokulu bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunenin petrografik özellikleri Çizelge 1’de, fiziko-mekanik özellikleri Çizelge 2’de, kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 3.’te verilmiştir.

Çizelge 1. Petrografik özellikleri

Mermer türü	Photo	Doku	Minimum Tane Boyutu (μm)	Maksimum Tane Boyutu (μm)	Ortalama Tane Boyutu (μm)
Uşak White Marble		Kristalin	37,0	1601,8	524,7

Çizelge 2. Fiziko-mekanik Özellikler

Yoğunluk (gr/cm^3)	Porozite (%)	Atmosfer basıncında su emme (%)	Aşınma Direnci (mm)	Basınç Dayanımı (MPa)	Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı (MPa)
2,665	0,16	0,04	21,04	76,20	21,37

Çizelge 3. Kimyasal Özellikler

SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	P_2O_5 (%)

Uşak	0,1018	0,0446	0,0433	54,4459	0,3270	0,0028
Beyaz	Na₂O	K₂O	F (%)	SO₃	SrO	A.Z.
Mermer	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	0,0162	0,0026	0,1157	0,0067	0,0119	44,8814

A.Z. : Ateş Zayıtı

Frezeleme işlemi gerçekleştirirken kuvvet verilerinin alınması CNC yük ölçer test cihazı ile eş zamanlı çalışan Defne Lab Soft programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu verilerin toplanma sistemi, CNC Makinesindeki yük ölçer sehpa ve yük ölçen veri toplama cihazı ile Defne Lab Soft programından oluşmaktadır. Test cihazında kuvvetlerin tespiti amacıyla 4 tane Z eksenindeki kuvvetlerin ölçülmesi, 4 tane de X ve Y eksenlerindeki kuvvetlerin ölçülmesi için toplam 8 adet yük hücresi kullanılmıştır. Enerji verileri CNC makinesi üzerinde bulunan hioki güç veri cihazı ile eş zamanlı çalışan Hioki Software programı ile alınmıştır.

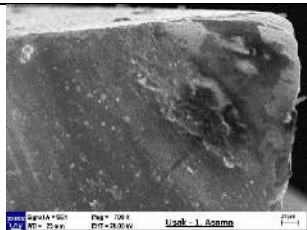
Kesici uç aşınma durumu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Frezeleme işlemi sonucunda oluşan yüzeyin yüzey kalitesini belirleme amacıyla Mitutoyo M1 model pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.

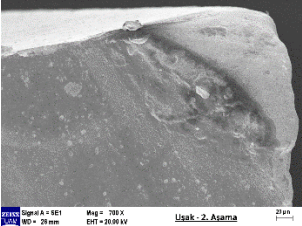
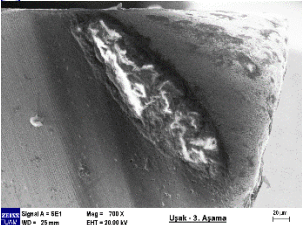
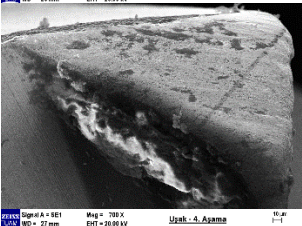
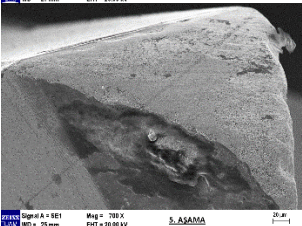
BULGULAR

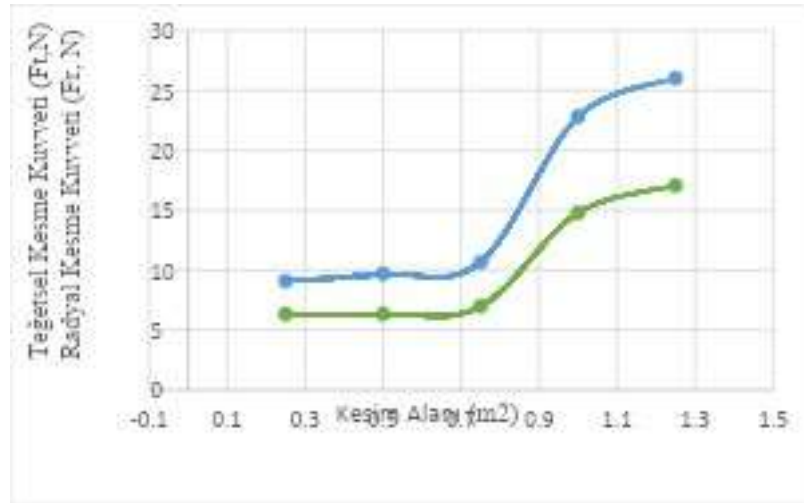
Deneyler için 6mm çapında karbür kaplamalı parmak freze takımlar kullanılmıştır. Önceki yapılan çalışmalar referans alınarak (Öz, 2018). Uşak Beyaz mermer için belirlenmiş optimum işleme parametreleri olan 1 mm kesme derinliği, 10000 devir/dk iş mili hızı, 3000 mm/dk ilerleme hızı ve 3 mm kesme genişliği kullanılmıştır. Mermer fabrikalarından alınan numunelerde yüzeydeki kalınlık farklılıklarının giderilmesi için yüzeyin tesviye işlemi uygulanmıştır. Tesviye işlemi, yüzeyi eşit bir kalınlığa getirmek ve 1 mm kesme derinliğinde hassas bir işleme yapılmasını sağlamak amacıyla farklı takımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Aşınma deneylerinde her 0,25 m² bir kesilen alan olarak alınarak her kesim alanı sonucunda kuvvet değeri ölçümleri, pürüzlülük değerleri, spesifik enerji ve SEM görüntüleri alınarak karbür kaplamanın aşınma durumu incelenmiştir. Karbür kaplamanın aşınma durumunu değerlendirmek için SEM görüntüleri ve işleme sırasında meydana gelen değişimler Çizelge 1.1' de verilmiştir.

Çizelge 4. Kesilen alanlara göre aşınma verileri

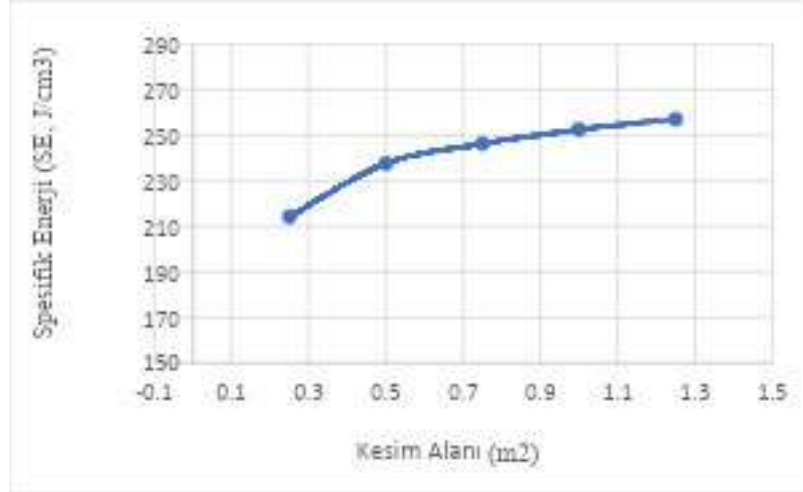
Kesilen Alan (m ²)	SEM Görüntüsü	Teğetsel Kesme Kuvveti (F _t , N)	Radyal Kesme Kuvveti (F _r , N)	Spesifik Enerji (SE, J/cm ³)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, µm)
0,25		6,31	9,08	214,15	6,62

0,50		6,34	9,68	237,53	7,10
0,75		6,98	10,66	246,21	7,76
1,0		14,80	22,82	252,52	8,88
1,25		17,05	26,04	257,02	9,46



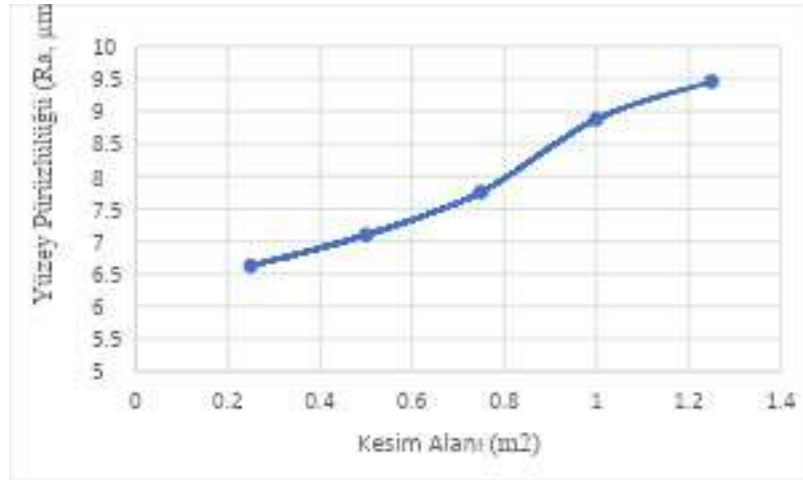
Şekil 2. Kesilen alana bağlı olarak teğetsel ve radyal kesme kuvvetlerinin değişimi.

Teğetsel ve radyal kesme kuvvetleri (Şekil 2), ilk 0,5 m²'lik kesilen alanda teğetsel ve radyal kesme kuvvetleri düşük ve düzenli bir seyir izlerken, bu durum takım kaplamasının aşınmamış olduğunu ve kesme işleminin minimum dirençle gerçekleştirildiğini göstermiştir. Ancak 0,75 m²'den itibaren kesme kuvvetlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiş, bu artış takım kaplamasının aşınmaya başlamasıyla başlamıştır. Özellikle 1 m²'den sonra kesme kuvvetlerinde düzensizlikler ve ani yükselmeler meydana gelmiş, bu da kaplama tabakasının tamamen aşındığını ve alt katmandaki kobalt ve tungsten gibi malzemelerin ortaya çıktığını göstermiştir.



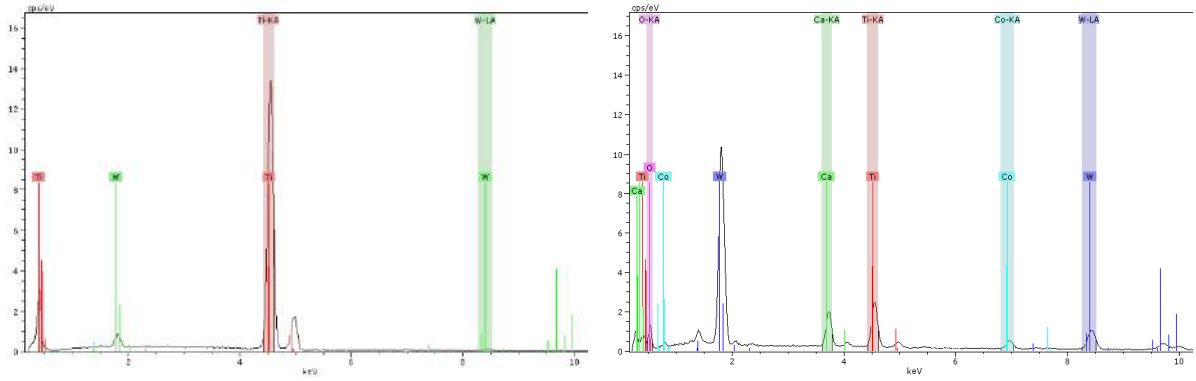
Şekil 3. Kesilen alana bağlı olarak spesifik enerji değerlerinin değişimi

Spesifik enerji tüketimi arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 3), kesme alanı arttıkça spesifik enerji değerlerinde artış gözlemlenmektedir. 0,25 m²'den 1,25 m²'ye kadar yaklaşık %20'lik bir spesifik enerji artışı tespit edilmiştir. İlk 0,5 m²'lik kesimde hızlı bir artış gözlemlenirken, ilerleyen kesim alanındaki artış hızı azalarak daha stabil bir karakteristiğe ulaşmaktadır. Genel olarak, kesme alanı arttıkça spesifik enerji değerlerinin düzenli bir şekilde arttığını göstermektedir.



Şekil 4. Kesilen alana bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimi

Aşınma ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 4), kesim alanı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. 0,25 m²'lik kesme alanı sonucunda yaklaşık 6,5 µm olan Ra değeri, 1,25 m²'lik kesme alanı sonucunda 9,5 µm seviyelerine ulaşmıştır. Bu artış eğilimi başlangıçta sürekli bir yükseliş sergilerken, özellikle 0,75 m²'den sonra daha belirgin bir ivme kazanmıştır.



Şekil 5. Takımın İşleme Öncesi (Sol) ve Aşınma Sonrası (Sağ) Kesme Yüzeyine Ait X-Işını Spektroskopisi

Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizinde (Şekil 5), frezeleme öncesinde takım tamamen titanyum ile kaplanmışken, aşınan bölgelerde kalsiyum (Ca), oksijen (O), kobalt (Co), titanyum (Ti) ve tungsten (W) elementleri tespit edilmiştir. Bu durum, işleme sırasında kaplamanın aşınarak alt katman malzemelerin ortaya çıktığını ve kesici ucun talaşla etkileşime girdiğini göstermektedir.

SONUÇLAR

Karbür kaplamalı takım, ilk 0,75 m²'de verimli bir şekilde kesme işlemini gerçekleştirmiştir. Takımın maksimum verimli işleme alanının 0,75 m² olduğu ve bu kesme alanından sonra kaplamanın neredeyse tamamen aşındığı ve takımın performansını kaybettiği gözlemlenmiştir.

0,75 m²'den itibaren, teğetsel ve radyal kesme kuvvetlerinde ani ve düzensiz artışlar meydana gelmiştir. Bu durum, takımın kaplama tabakasının aşınarak alt katmandaki kobalt (Co) ve tungsten (W) malzemelerin ortaya çıkmasından kaynaklanmıştır. SEM görüntülerinde, krater aşınması, yüzeye talaş yapışması ve sıvanma gibi aşınma mekanizmaları açıkça gözlemlenmiştir.

Uşak Beyaz mermerinin iri mineral tanelerinden oluşan yapısı, kesme işlemi sırasında takım yüzeyinde daha fazla sürtünmeye ve zorlanmaya yol açarak kesici takımın aşınma hızını artırmıştır.

Karbür kaplamalı freze takımlarının mermer işleme sırasında aşınma davranışı, uygulanan işleme parametreleri ve mermerin karakteristik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Takım ömrünün sınırlarına ulaşıldığında, kesme kuvvetlerindeki artış ve yüzey kalitesindeki düşüş, takımın değişim zamanını belirlemek açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, karbür kaplamalı takımların aşınma durumunu anlamak için temel bir referans niteliği taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Arunramnath, R., Thyla, P. R., Mahendrakumar, N., Ramesh, M., Siddeshwaran, A. (2019). Multi-attribute optimization of end milling epoxy granite composites using TOPSIS. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(5), 530–543.

Gyurika, I. G. (2018). Researching the effects of feedrate and diamond grain size on edge chipping of milled granites. *Tehnički vjesnik*, 25(1), 49–55. <https://doi.org/10.17559/TV-20160504130353>

Gyurika, I. G., Szalay, T. (2019). The examination of the effect of variable cutting speeds on the surface and edge qualities of milled granite materials. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(7), 1–12.

Kenda, J., Kopač, J. (2009). Diamond tools for machining of granite and their wear. *Journal of Mechanical Engineering*, 55(12), 775–780.

Öz, O. (2018). Doğaltaşların CNC makinesi ile işlenmesinde taguchi deney tasarımı yöntemi uygulanarak yüzey kalitesinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Öz, O. (2025). Mermerlerin vakumla sert lehimlenmiş elmas kaplamalı freze takımlarla işlenmesinin optimizasyonu. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Öz, O., Özkan, E. (2025). Effect of diamond grain sizes on cutting forces and specific energy in marble milling processes. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(015801), 152–159. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1509025>

Özkan, E., Öz, O. (2020). The effect of characterization of carbide end milled limestones on optimal parameters. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1181). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07538-w>

Özkan, E., Öz, O. (2021). Determination of appropriate cutting parameters depending on surface roughness by taguchi method in milling of marbles. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(532). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05380-0>

Özkan, E., Öz, O. (2023). Limra kireçtaşının CNC doğaltaş işleme makinesinde işleme parametrelerinin ve yüzey kalitesinin araştırılması. *MT Bilimsel Yeraltı Kaynakları Dergisi*, 12(24), 13–27.

Özkan, E., Öz, O., Tuğral, N. (2023). Investigation of The Effect of Radial Width and Axial Depth Parameters on Surface Quality in Milling of White Marbles. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, 1267–1280.

Polini, W., Turchetta, S. (2004). Force and specific energy in stone cutting by diamond mill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(11), 1189–1196. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.04.001>

Sarışık, G., Özkan, E. (2016). Bilgisayar kontrollü makine (CNC) ile mermerlerin işlenebilirliğinde kesme kuvveti ve spesifik enerjinin belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 420–430. <https://doi.org/10.5578/fmbd.27592>

Sarışık, G., Özkan, E. (2017). Mermerlerin CNC makinesi ile işlenmesinde kesme kuvvetleri ve spesifik kesme enerjisinin istatistiksel analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19(55), 178–193. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2017195514>

Sarışık, G., Özkan, E. (2018). Effects of natural rock properties on cutting forces, specific energy and specific cutting energy by four-axis machine. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(84). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3424-7>

Tuğral, N. (2019). CNC Makinesinde Gerçek mermerlerin kesme genişliğinin yüzey kalitesine etkisinin taguchi yöntemiyle incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Turchetta, S. (2012). Cutting force and diamond tool wear in stone machining. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 61(1–4), 441–448. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3717-4>

Turchetta, S., Polini, W., Buyuksagis, I. S. (2009). Investigation on stone machining performance using force and specific energy. Advances in Mechanical Engineering, 1. <https://doi.org/10.1155/2009/175817>

Wang, F., Liu, S., Guo, Z., Cao, L. (2020). Analysis of cutting forces and chip formation in milling of marble. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 108, 2907–2916. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05575-5>

Zhao, M., Lang, X. (2010). Experimental research on cutting force with diamond mill cutting granite. International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536843>

DOĞALTAŞ OCAKLARI BLOK ÜRETİM OPTİMİZASYONU İÇİN STRATEJİK ADIMLAR

STRATEGIC STEPS FOR OPTIMIZING NATURAL STONE QUARRIES BLOCK PRODUCTION

A. Turanboy¹, E. Ülker²

¹*Necmettin Erbakan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh., Konya, Türkiye,
aturanboy@erbakan.edu.tr*

²*Konya Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Müh., Konya, Türkiye, eulker@ktun.edu.tr*

ÖZ

Doğaltaş üretim ocaklarında blok çıkarma verimi; jeolojik, teknik ve ekonomik birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu parametreler arasında en yüksek etki oranına sahip olan faktör, kaya kütlesinde bulunan süreksizlik sistemlerinin konumsal özellikleridir. Ancak yalnızca süreksizliklerin varlığı değil, aynı zamanda saha araştırmalarının yetersizliği, jeolojik modellemede yapılan hatalar ve uygun olmayan üretim yöntemlerinin seçimi, ciddi düzeyde kaynak kayıplarına ve sürdürülemez üretim koşullarına neden olabilmektedir. Özellikle ön üretim aşamasında gerçekleştirilen eksik jeoteknik ve yapısal analizler, rezervin doğru şekilde modellenmesini engelleyerek kırıklı, dağılmış ve ekonomik değeri düşük blokların üretilmesine yol açmaktadır. Bu durum yalnızca ekonomik kayıpları artırmakla kalmamakta, aynı zamanda gereksiz kazı faaliyetleri nedeniyle çevresel etkilerin (örneğin görsel kirlilik, habitat tahribatı, toz oluşumu, gürültü vb.) artmasına da neden olmaktadır. Bu bağlamda, doğaltaş üretim ocaklarında blok üretim sürecinin hiyerarşik bir yordam ile sistematik biçimde kurgulanması ve her bir aşamaya asgari düzeyde dikkat gösterilmesi, blok verimi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, doğaltaş ocaklarında arama ve geliştirme faaliyetlerinden başlayarak nihai blok üretimi aşamasına kadar uzanan tüm süreçlerin; üç boyutlu süreksizlik ağı temelinde, analitik, geometrik, büyük veri odaklı ve yapay zeka destekli tekniklerle bütüncül bir şekilde ele alındığı bilgisayar destekli bir optimizasyon uygulamasının mantıksal işlem sırası ortaya konmuştur. Önerilen bu yaklaşım kapsamında: Tahribatsız tetkik yöntemlerinden (ör. GPR, LiDAR, fotogrametri vb.) elde edilen veriler, deterministik, stokastik ve hibrit modelleme teknikleriyle bütünleştirilmiş, süreksizliklerin üç boyutlu dağılımı doğrultusunda oluşabilecek doğal iç ve dışbükey çok yüzlü blok geometrileri analiz edilmiş, Bu hacimler içerisine sığabilecek maksimum küboit (küp benzeri) blokların boyutları ile mevcut ticari blokların boyut dağılımı karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu yöntem ile kesim ve ilerleme yönlerinin optimizasyonu, üretim planlamasında en verimli stratejilerin seçilmesine olanak sağlamaktadır. Geliştirilen bu analitik sıra, özellikle yüksek yatırım gerektiren bakir rezerv alanlarının üretime açılıp açılmaması gibi stratejik karar süreçlerinde karar destek mekanizması olarak da kullanılabilecektir. Bu kapsamda geliştirilen mantıksal iş akışı, seçilen örnek bir doğaltaş ocağı üzerinde uygulanarak adımlar tanıtılmış ve elde edilen sonuçlar üzerine teknik değerlendirmeler yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Süreksizlik, 3B süreksizlik ağı, optimizasyon, 3B, küboit, yapay zeka

ABSTRACT

Block recovery efficiency in natural stone quarries is influenced by a range of geological, technical, and economic factors. Among these, the spatial characteristics of discontinuity systems (such as faults, joints, bedding planes, and foliation) have the most significant impact on block production. However, not only the presence of these discontinuities but also insufficient site investigations, errors in geological

modeling, and inappropriate selection of extraction methods lead to substantial resource losses and unsustainable production practices. In particular, inadequate geotechnical and structural analyses during the pre-production phase often result in inaccurate reserve estimations, leading to the production of highly fractured, deformed, and economically low-value blocks. This situation not only increases production costs but also amplifies environmental impacts such as visual pollution, habitat degradation, dust generation, and noise due to unnecessary excavation activities. Therefore, establishing a hierarchical procedure for block production stages in natural stone quarries and assigning a minimum level of attention to each step is of critical importance for maximizing run-of-mine block yield. This study introduces a computer-aided optimization workflow that covers all stages from exploration and development to final block production, based on a three-dimensional discontinuity network. The proposed approach integrates analytical, geometric, big data-driven, and artificial intelligence-based techniques into a coherent methodology. Within this framework: Data obtained through non-destructive investigation methods (e.g., GPR, LiDAR, photogrammetry) are incorporated, Combined with deterministic, stochastic, and hybrid modeling approaches, The three-dimensional geometry of natural concave and convex polyhedral blocks is analyzed, And the maximum cuboids that can fit within these volumes are calculated and compared with the size distributions of actual commercial blocks. Furthermore, this method facilitates the optimization of cutting and advancement directions, enabling the selection of the most efficient production strategies. The proposed analysis sequence also serves as a decision-support tool, particularly in assessing the viability of initiating production in virgin reserves requiring high investment costs. The developed methodological workflow has been demonstrated on a selected natural stone quarry, with each step introduced and interpreted through technical evaluation.

Keywords: Discontinuity, 3D discontinuity network, optimization, 3D, cuboid, artificial intelligence

GİRİŞ

Ticari blok üretimi, doğaltaş ocaklarında çok boyutlu ve çok değişkenli bir optimizasyon problemidir. Doğaltaş rezervlerinin üretime uygun hale getirilmesi süreci, yalnızca mühendislik yönüyle değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da dikkatle ele alınması gereken karmaşık bir yapıya sahiptir. Doğaltaş rezervleri homojen olmayan ve genellikle anizotrop özellikler gösteren kaya kütlelerinden oluşur. Bu yapısal karmaşıklık, üretim sürecinde karşılaşılan verimlilik, hammadde kaybı, blok ebatları ve pazar değeri gibi parametrelerin yüksek oranda değişkenlik göstermesine neden olur. Bu nedenle, üretim süreçlerinin optimize edilmesi hem doğru rezerv tahmini hem de nitelikli blok üretimi açısından zorunludur. Ayrıca, doğaltaş sınırlı ve tükenebilir bir kaynaktır. Rezervlerin uygun olmayan yöntemlerle işletilmesi durumunda, yüksek oranda kırıklı, düşük kaliteli ve ekonomik değeri olmayan bloklar elde edilir. Bu da önemli miktarda doğal kaynak israfına yol açar. Bu bağlamda optimizasyon, kaynaklarının etkin kullanımı açısından da stratejik bir gerekliliktir. Doğaltaş sektörü ocak işletmeciliği açısından çevresel anlamda ciddi etkiler doğurabilmektedir. Yoğun kazı faaliyetleri, atık üretimi, toz ve gürültü oluşumu ile doğal peyzajın bozulması gibi çevresel etkiler, toplumun artan çevre duyarlılığı ile birlikte daha fazla sorgulanmakta ve kabul edilebilirlik sınırları daralmaktadır. Bu nedenle, doğaltaş üretiminde çevresel sürdürülebilirlik ilkesi doğrultusunda üretimin optimizasyonu kaçınılmaz hale gelmiştir. Günümüzde, bu üç temel ilke—doğal kaynakların etkin kullanımı, çevre koruma ve sürdürülebilirlik—doğaltaş ocakçılığı uygulamalarında hem teknik hem de sosyal düzeyde yönlendirici bir çerçeve oluşturmaktadır. Söz konusu ilkeler ile ocak işletmeciliği arasındaki ilişki, Şekil 1' de şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 1. Doğaltaş ocak işletmeciliğinde üç temel gereksinimin ilişkisi

Kaya kütlelerinin ticari bir değere ulaşabilmesi öncelikle onun fiziksel niteliklerine bağlıdır. Ham bloklarının ticari değeri; jeolojik, fiziksel, ekonomik ve pazara yönelik faktörler ve trendlere göre tanımlanmaktadır.

Doğaltaş üretim ocaklarında, ilk ocak çukurunun açılması ve periyodik üretim dönemlerinin tanımlanması, çıkarılabilecek ticari blok üretim hesaplamalarına dayanmakta olup çoğunlukla yine insan sezgisi ön plana çıkmaktadır. Süreksizliklerin (fay, eklem, tabakalanma, foliasyon, vb.) varlığı, kaya kütlelerinin jeolojik, fiziksel, mekanik ve hidrojeolojik özelliklerini belirlemede temel bir role sahiptir (Hoek, E., 1993; Priest, S.D., 1976; Hudson, J.A., 1981). Süreksizlik özellikleri ISRM, 1981' e göre geniş ölçüde tanımlanmış ve sahada süreksizliklerin karakterizasyonu için yönelim, aralık, kalıcılık, pürüzlülük, duvar mukavemeti, açıklık, dolgu, sızma, set sayısı ve blok boyutu gibi parametrelerdir. Uygulamada uzaysal konumu (yönelim), doğrudan yerinde gözlemlenebildiği ve pratik olarak ölçülebildiği için kaya karakterizasyonunun en yaygın kullanılan parametrelerinden biridir. Doğaltaş blok üretiminde çıkarılabilecek ticari küboit (düzgün dörtyüzlü blok) verimi, örtü tabakası, süreksizlik yoğunluğu, süreksizlik arası mesafe ve üretim yönü gibi faktörlerden etkilenmektedir. Priest ve Hudson (1976)' a göre, süreksizlikler arası mesafe 1 metre olan kayaçlarda ortalama blok boyutu 1 m³ iken, aralık 0,5 metreye düştüğünde blok boyutu 0,125 m³'e kadar düşmektedir. Doğaltaş rezervinde mevcut süreksizlik konum ve aralık değerleri blok verimine etkili olduğu açıktır. Genel olarak, üretim kayıplarının yaklaşık %51'i doğaltaş yataklarındaki örtü tabakası ve süreksizlik yoğunluğu gibi özelliklerden kaynaklandığı Montani (2003) tarafından rapor edilmiştir. Şüphesiz taşın kabul edilebilir ticari değeri ve kullanılan teknoloji ile ilişkilidir ancak bu oranın ülkemizde oldukça düşük olduğu bilinmektedir.

Kaya mekaniği ve mühendislik uygulamalarında olduğu gibi doğaltaş üretim ocaklarında da analitik, nümerik, istatistiksel, deterministik, stokastik ve hibrit temelli çeşitli modeller son zamanlarda giderek artan oranda kullanılmaktadır. Bu modellerin çoğu ocaktan ticari taşın en yüksek verim elde edilebilmesi üzerinedir ve bilişim teknolojilerinin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Çünkü, kaya kütlelerinin yapısı gereği, üzerinde gerçekleştirilecek olan problem de karmaşık, çok sayıda değişken ve bu değişkenlere ait çok sayıda veri içerecektir. Ayrıca planlama aşamasındaki çeşitli üretim senaryolarının oluşturulabilmesi ve olası risk-kazanç durumlarının değerlendirilebileceği modeller oluşturulabilmekte, karar-destek sistemleri kurulabilmektedir.

Günümüzde doğaltaş ocaklarında üretim planlaması ve jeolojik modelleme süreçlerinin daha verimli ve güvenilir hale getirilmesi amacıyla çeşitli sayısal modelleme ve görselleştirme yazılımlarından yararlanılmaktadır. Bu kapsamda, Rocscience yazılımları (örneğin Dips, RocPlane,

SWedge), süreksizlik analizleri ve kinematik stabilite değerlendirmeleri için güçlü araçlar sunarak doğaltaş ocaklarındaki şev duraylılığı, blok üretim potansiyeli ve kesim yönlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. FracMan, özellikle süreksizlik ağlarının üç boyutlu modellenmesi ve fraktal analiz yoluyla kaya kütlesi içindeki süreksizliklerin dağılımının istatistiksel olarak temsil edilmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, Surpac gibi maden planlama ve modelleme yazılımları, doğaltaş ocaklarında rezerv tahmini, üretim hacmi hesaplamaları ve üç boyutlu blok modelleme gibi işlemlerde önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle CAD/GIS tabanlı yapısı sayesinde ocak tasarımı, kot planlaması ve üretim aşamalarının dijital ortamda hassas biçimde planlanmasına olanak tanır.

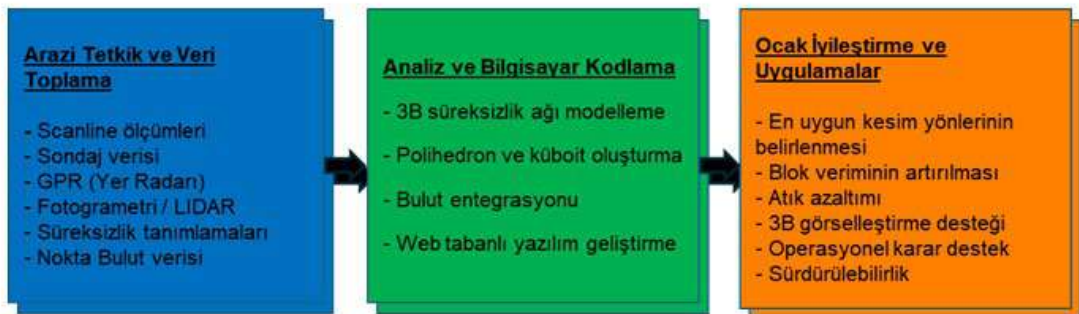
Yüksek değerli doğaltaşların sürdürülebilir ve ekonomik olarak çıkarılabilmesi için bu tür yazılımların, jeolojik verilerin analizi, rezervlerin üç boyutlu modellenmesi ve süreç odaklı optimizasyon uygulamaları ile bütünleştirilmesi gereklidir. Bu bağlamda, doğaltaş üretim ocaklarında süreksizliklerle sınırlandırılmış doğal-yerinde-çokyüzlü blokların mevcut konumları göz önüne alınarak endüstride verimli bir şekilde kullanılabilirliği ile ilgili bilgisayar destekli model çalışmaları da (Latham vd., 2006; Mutlutürk, 2007; Sousa, 2007; Siegesmund. vd., 2007; Turanboy and Ülker, 2008; Ülker and Turanboy, 2009; Elmouttie et al., 2010; Mosch et al., 2011; Elmouttie and Poropat, 2012; Morales et al., 2013; Fernández et al., 2013; Elçi and Türk, 2014; Yarahmadi et al., 2014, Li et al., 2015, Li, J. Et al., 2015; Sousa et al., 2016; Yarahmadi, et al., 2017, Küçük ve Onargan, 2018; Elmouttie, et al., 2018, Reed and Bondua, 2025) son zamanlarda güncelliğini artırmaktadır.

Bu çalışmada, her doğaltaş rezervinin yegâne olduğu gerçeği doğrultusunda, arama geliştirme aşamasından ticari blok üretimine kadar adımların analizi ve yorumlanmasını içeren süreksizlik ağı temelinde analitik, geometrik, büyük veri çözümleri ve zekâ yapay teknikleri kullanılarak bilgisayar destekli bir uygulama içeren optimizasyon çalışmasının temelleri sunulmuştur.

METODOLOJİ

Hiç kuşkusuz, ticari blok verim oranları, kullanılan üretim teknolojisinin düzeyi, kaya kütlesinin yüzeydeki görünürlüğü, morfolojik özellikleri ve üretim sürecindeki uygulama hassasiyeti gibi birçok etkene bağlı olarak yalnızca yaklaşık değerlerle ifade edilebilmektedir. Bu oranlar, doğaltaş üretiminde değişkenliği yüksek ve saha koşullarına özgü parametrelerden etkilendiği için çoğu durumda belirli bir belirsizlik payı içermekte ve kesin bir standardizasyonun sağlanması güçleşmektedir.

Geliştirilen modelde de benimsenen stokastik optimizasyon, belirsizlik altında karar verme süreçlerini ele almakta ve modelde rastgele değişkenler veya belirsiz girdiler bulunması nedeniyle süreksizlikler açısından kaya kütle karakterizasyonu için ideal bir yaklaşımdır. Model çalışması deterministik ve stokastik yaklaşımlar içeren hiyerarşik bir yapı içermektedir. Çalışmanın temel adımları arazi tetkik-veri toplama, analiz-bilgisayar kodlama ve ocak-iyileştirme uygulamaları gibi temel adımlardan oluşmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Geliştirilmiş modelin genel akım şeması

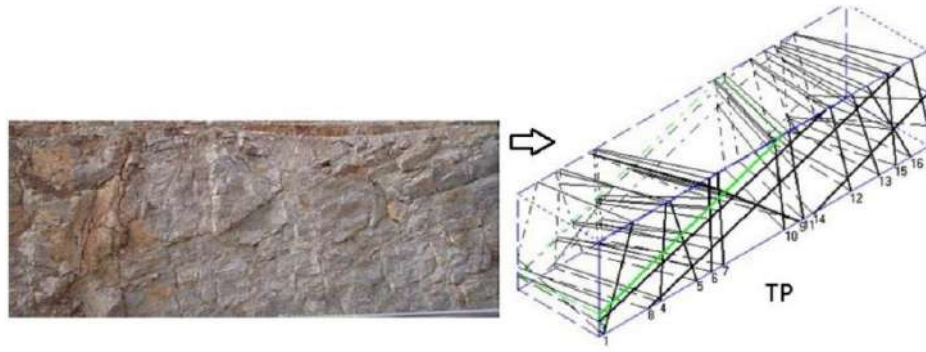
Saha araştırmaları kaya kütlesinin doğasını anlamak için vazgeçilmezdir. Ancak, bu çalışmalar zaman ve maliyet açısından yüksek yatırım gerektirebilir ve belirli sınırlamalar içerir. Ek olarak, özellikle dik yamaçlarda süreksizliklerin ölçülmesi hem tehlikeli hem de zaman alıcı olabilir (Hudson and Harrison, 1997; Palmstrom, and Broch, 2006). Süreksizliklerin şerit metre ölçüm hattı ve sondaj yöntemiyle klasik, 3B tarama (LiDAR, fotogrametri), ultrasonik ve manyetik rezonans gibi tahribatsız testlerin kullanımı ile veri toplanması ilk adım olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, alınan veri süreksizliklere ait eğim/eğim yönü, süreksizlikler arası mesafe ve süreksizlik devamlılığı ve basamak boyut ve konum verisidir.

Elde edilen veri nokta bulutları halinde Sayısal Yükselti Modelleri (DEM) ve nihayetinde stokastik Ayrık Kırık Ağlarının (DFN) oluşturulması amacıyla kullanılmaktadır. DFN modellemesi, bir dizi kümeleme analizi (Cluster analysis) uzayda farklı kümeleri tanımlayan noktanın lokalizasyonu ve süreksizlik düzlem denklemlerinin hesaplanması, 2B/3B' de bir kaya kütlesinin süreksizliklerini birer poligon şeklinde simüle etmek için kullanılmakta, süreksizlik parametrelerinin istatistiksel değerlendirilmesi amacıyla Histogram ve Çekirdek Yoğunluk analizlerini (Kernel Density, KDEanalizi). Ayrıca, Monte Carlo simülasyonu ve analizi yoluyla belirsizlik yönetimi için stokastik gerçekleştirme üretilmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada deterministik bir yaklaşım olarak Kaya Kütlesinin Doğrusal İzometrik Projeksiyonu (Lineer İzometrik Projeksiyon of Rock Mass (LIP-RM)) (Turanboy and Ülker, 2008) modeli de alternatif olarak kullanılmaktadır. Yazılım 1B Ölçüm hattı araştırması ile elde edilen süreksizlik verisi aynı tabloda işlenebilmektedir. Algoritma sondaj verisi kullanılarak dikey ve yatay olarak işlenmesi ve görselleştirilmesi de sağlanabilmektedir. Yöntem, süreksizliklerin geometrik yönelimini ve bunların mekansal dağılımını içerir. Bu analizde, süreksizliklerin kaya kütlesi içinde düzlemsel ve sürekli olduğu varsayılmıştır. Bahsedilen modelin metodolojisi hakkında ayrıntılı bilgi Turanboy ve Ülker (2009) adresinde bulunabilir. Yazarların bu araştırmasında kısaca, süreksizlik analizine dayalı olarak, doğal kaya kütlesi içerisinde oluşabilecek maksimum hacimli küboitlerin belirlenmesine yönelik genetik algoritma (GA) temelli bir optimizasyon yöntemi geliştirmiştir. Çalışma kapsamında, doğal blok üzerinde uygulanan analizlerde, süreksizlik yüzeyleri ile sınırlı düzensiz çok yüzlü hacimlerin içine yerleştirilebilecek maksimum hacimli küboit bloklar sayısal olarak elde edilmiş ve teorik blok veriminin mevcut oranlardan bir kat daha fazla elde edilebileceği ortaya konulmuştur.

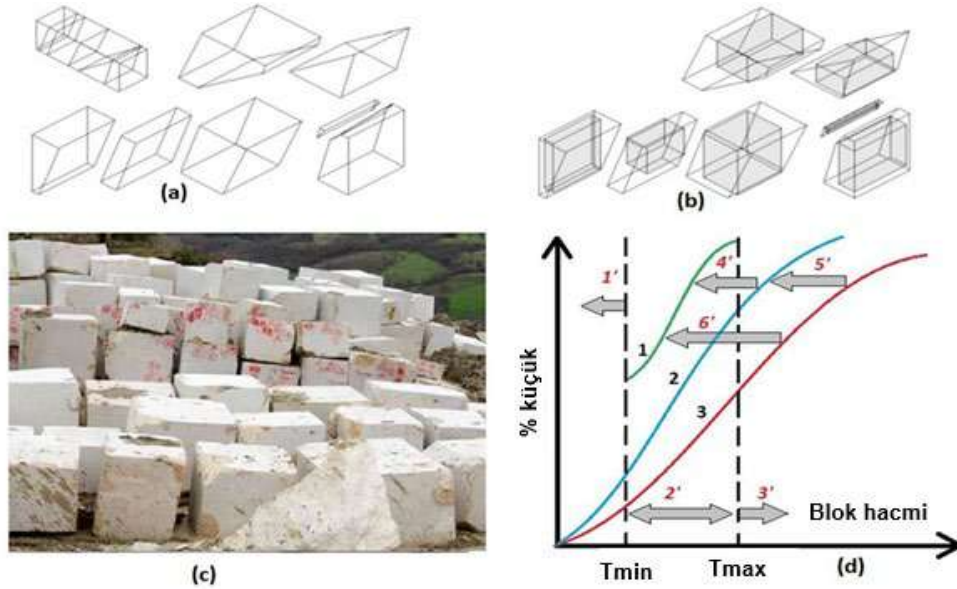
Hem stokatik hem de deterministik metotlarla 3B süreksizlik ağları üretildikten sonra web tarayıcılarında görselleştirme amacıyla, 3B görüntüler çizen bir WebGL programlama arayüzü kullanılmıştır. Üretilen süreksizliklerle sınırlandırılmış doğal çokyüzlülerin (Polihedronlar) geometrisi 3B uzayda birlikte veya tek tek temsil edilebilmektedir.

Bu adımdan sonra, doğal içbükey ve dışbükey çokyüzlüler içine sığabilecek Maksimum Küboitin (MaxQ) hesaplanması adımı gerçekleştirilmektedir. Bu haliyle projenin bu adımı tümevarımsal bir yaklaşım içermektedir. Çokyüzlü doğal bloklar ve MaxQ' ların tanımlanması, her bir ölçüm hattı boyunca boyutları ve konumları seçilen Temsili Prizmatik Bloklar (TP) tanımlanarak yürütülmektedir (Şekil 3) . MaxQ optimizasyon problemi konik optimizasyon, diferansiyel evrim ve hibrit yaklaşımlar kullanılmıştır. Elde edilen polihedron ve MaxQ' lara ait temel alınan hacim verisi Blok Boyut Dağılım Eğrilerinin (BSDC) ve Karar Destek Sisteminin Oluşturulmasında temel girdiler olmaktadır.



Şekil 3. Modelde temel alınan bir kireçtaşı şev aynasından üretilen TP örneği

Çalışmada ayrıca, Blok Boyut Dağılım Eğrileri (Block Size Distribution Curve, BSDC) çalışan veya bakir bir doğaltaş rezervinin değerlendirilebilmesi için temel araç olarak kullanılmıştır ve toplu bir gösterim sunmaktadır. Bu gösterim, yerinde doğal blokların, maksimum küboitlerin ve gerçekte elde edilen ticari küboitlerin bir arada değerlendirildiği Olasılık Yoğunluk fonksiyonu (Probability Density Function, PDF) ve Birikimli Yoğunluk Fonksiyonu (Cumulative Distribution Function, CDF) grafiklerinden oluşmaktadır. Böylece, iki dağılım birlikte rastgele değişkenlerin tam bir olasılıksal tanımını sağlamaktadır. Bu grafiklerin hem deterministik hem de stokastik adımlar sonrası ayrı ayrı toplu grafikleri elde edilebilmekte ve aralarındaki ilişkinin varlığı doğrusal regresyon analizleriyle test edilmiştir. Şekil 4' de ocak değerlendirme ölçütü olarak kullanılan CDF-BBDE eğrileri nihai verim değerlendirme ölçütü şematik olarak sunulmuştur. Bu toplu sunuma, ticari blokların minimum ve maksimum boyutları da dahil edilerek daha kapsamlı bir analiz gerçekleştirilebilmektedir. Nihai gösterim, ocağın kazı yönlerinin değerlendirilmesi, bakir rezerve işletilecek ocağın yeri ve boyutları ve gerçek bir ocağın verimlilik açısından değerlendirilmesi üzerine yapılacak çalışmaların temelini oluşturmaktadır (Turanboyl and Ülker, 2014).



Şekil 4. BBDE ile süreç ve değerlendirme kriterleri: (a) Yerinde çokyüzlüler; (b) Çokyüzlülere uyan küboitler; (c) Model kullanılmadan gerçek ticari küboitler; (d) CDF Eğrilerinin birlikte değerlendirilmesi.

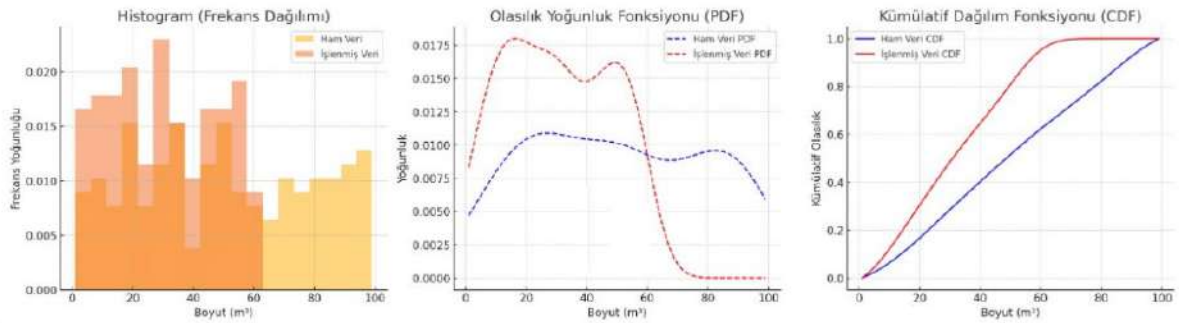
Burada; 1 nolu eğri; Modelden elde edilen yerinde çokgenlerin; 2 nolu eğri; Teorik çokgenlere uyan teorik MaxQ' ların; 3 nolu eğri; Ocakta maden üretimiyle elde edilen gerçek küboidlerin BSDC' leri % CDF grafikleri olarak idealize edilerek gösterilmiştir.

T_{min} ve T_{max} kullanıcının girebileceği en küçük ve büyük ticari blok boyutlarıdır. Parametrik olmayan bu eğriler arasındaki alanlar verim değerlendirmesinde kullanılan temel sayısal kriterleri temsil etmektedir.

Ayrıca, 1' ticari olmayacak kadar küçük hacimleri; 2' ticari sınırları; 3' Ticari boyutun üstünde olan hacimler; 4' model sonuçlarına olması gereken en yakın (yüksek verim) ve en uzak (düşük verim) koşullarını; 5' modele göre elde edilebilecek MaQ' lar ve 6' gerçekte elde edilen MaxQ' ları temsil etmektedir. Elde edilen grafiklerden, sayısal olarak analiz sonuçlar hesaplanabilmekte, ayrıca görsel olarak da pratik ve hızlı bir değerlendirme imkânı tanımaktadır.

Ayrıca, belirsizliğin hakim olduğu ve karmaşık bir yapıya sahip kaya kütlelerinin analiz edilen tüm parametrelerinde ve simülasyon sonuçlarına (eğim, eğim yönü, süreksizlikler arası mesafe, iz uzunluklar ve yerinde çokyüzlüler, çokyüzlülerin içine sığabilecek küboitler) rasgelelik-belirsizliği azaltmak için stokastik bir simülasyon metodu olan Monte Carlo Simülasyon (MCS) yöntemi kullanılmış ve tüm modelleme süreç adımları birbirine veri akışı sağlayan yapıda oluşturulmuştur.

Ayrıca bu toplu grafikleri yorumlamak için kural tabanlı bir uzman sistemi biçiminde bir karar destek sistemi oluşturulmuştur. Şekil 5' te örnek bir sahadan elde edilen polihedral ve MaxQ simülasyon sonuçları verilmiştir.



Şekil 5. Örnek bir sahadan elde edilen yerinde çokyüzlü bloklar ve MaxQ simülasyon sonuçları

SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Süreksizlik varlığına dayalı analizler, sadece kaya mekaniği ve jeoteknik mühendisliğinde değil, doğaltaş üretim ocaklarında da kritik öneme sahiptir. Dünya çapında genel temayül, doğaltaş gibi hammaddelerin üretiminde verimliliğin yansıra çevre ve sürdürülebilirlik hassasiyetlerini, daha yüksek üretim teknolojilerle karşılanması gerekliliği yönündedir. Sektörde bilişim teknolojileri uygulamaları kısıtlı olup işletmelerin planlama ve üretim çalışmaları, üretim sektörlerinin periyodik üretim dönemlerinin tanımlanmasına yönelik kübaj çalışmalarına dayanmaktadır.

3B süreksizlik ağının ortaya konulması, içine sığabilen maksimum küboitlerin hesaplanması ve ocak ilerleme yönünün tanımlanması veya bakir bir rezervin konumlandırılması, kaya kütlelerinin değişkenleri ve bu değişkenlerin çoğunlukla rastgeleliği planlama safhasında çok-değişkenli optimizasyonu zorunlu kılmaktadır.

Çalışmanın sonuçları itibarıyla şu değerlendirilmeler yapılabilir;

1. Doğaltaş ocaklarında genel anlamda Arazi Tetkik–Analiz–Ocak Uygulamalarının dijitalleşme ile bütünleşik uygulanması hem üretim süreçlerini görünür hem de kaynak verimliliği ve sürdürülebilirliği artıracaktır,
2. Veri odaklı planlama ile elde edilen arazi verisi, bulut tabanlı sistemlerle bu veriler merkezi olarak daha kısa sürede işlenebilmektedir,
3. Modelleme uygulaması ile kesim stratejileri oluşturulup en yüksek verim yönelimi-kısa ve uzun dönemde kaynak kullanımı ve ilk yatırım analizlerinde daha güçlü kararlar sağlayacaktır,
4. Pratik uygulama, aynı zamanda zaman, enerji ve iş gücü tasarrufu avantajları da sağlayacaktır,
5. 3B görselleştirmeler ve veri tabanlı raporlar sayesinde proje şeffaf, kullanıcıya blok kalitesi ve üretim miktarı daha önceden öngörülebilir sunulabilmektedir,
6. Ülkemizde, sektörde bilişim teknolojileri temelinde uygulamaları kısıtlıdır. Geliştirilen doğaltaş blok üretim optimizasyon sürecinin uygulaması ile sadece üretim artışı, blok veriminin artırılması değil, aynı zamanda gürültü azaltma, su tasarrufu, toz ve atık oluşumunun azaltılması gibi çevresel faydalar açısından da faydalı olacaktır,
7. Bir doğaltaş rezervinin ticari değeri ve değerlendirilmesi için sadece süreksizlik temelinde analizler yeterli olmaz. Taşın renk, doku, desen gibi estetik özellikler ile lojistik-erişimi, ayrıca şev duraylılığı gibi temel analizlerde göz önüne alınmalıdır. Bu parametre ve analizlerin modele entegrasyonu mümkündür.

Çalışmanın nihayetinde yer alan blok verim eğrileri, sahada elde edilebilecek blok boyutu dağılımını ve teorik-ticari blok hacimleri nicel olarak ortaya konularak doğrudan ekonomik analiz açısından önemli bir gösterge sunulmuştur. Bu eğriler, üretim sırasında oluşabilecek ekonomik kayıpların ve potansiyel kazançların öngörülmesine olanak tanımakta; böylece dolaylı olarak maliyet-fayda değerlendirmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, saha uygulamalarının tamamlanmasının ardından elde edilecek üretim verileri ışığında, yatırım geri dönüş süresi ve doğrudan maliyet-fayda analizlerinin yapılması da planlanmaktadır. Bu kapsamda, modelin ekonomik değer üretme potansiyeli daha net ve sayısal verilerle desteklenecek şekilde ileride detaylandırılacaktır.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma, “Doğaltaş Ocakları Optimizasyonu İçin Yapay Zeka ve Bileşik Arazi Tetkikleri (Artificial Intelligence and Combined Survey Techniques for Stone Quarries Optimization)” ismiyle proje(Proje No: [122N037](#)) Proje TUBİTAK ve A.B. Eramin2 tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

Elçi, H., Türk, N. (2014). Block volume estimation from the discontinuity spacing measurements of Mesozoic limestone quarries, Karaburun Peninsula, Turkey. The Scientific World Journal, 2014, 363572. <https://doi.org/10.1155/2014/363572>

Elkarmoty, M., Tinti, F., Kasmaeeyazdi, S., Bonduà, S., Bruno, R. (2018). 3D modeling of discontinuities using GPR in a commercial size ornamental limestone block. Construction and Building Materials, 166, 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.120>

Elmouttie, M., Poropat, G. (2010). Polyhedral modelling of rock mass structure. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(4), 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.02.007>

Elmoultie, M. K., Poropat, G. V. (2012). A method to estimate in situ block size distribution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(3), 401–407. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0200-5>

Fernández, M. E., González-Nicieza, C., Álvarez-Fernández, M. I., Álvarez-Vigil, A. E. (2013). A computational algorithm for rock cutting optimisation from primary blocks. *Computers and Geotechnics*, 50, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.11.008>

Golder Associates Inc. FracMan [Computer software] <https://www.fracman.com>

Hoek, E. (1993). *Practical Rock Engineering*. University of Toronto.

Hudson, J. A., Harrison, J. P. (1997). *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles* (Vol. 1). Pergamon.

ISRM. (1981). *Rock characterisation, testing and monitoring: ISRM suggested methods* (E. T. Brown, Ed.). Pergamon Press.

Küçük, K., Onargan, T. (2018). Yer radarı (GPR) yöntemi ile Burdur bej mermer ocağında blok oranları değerlendirmesi. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 30(1), 51–59.

Latham, J. P., Van Meulen, J., Dupray, S. (2006). Prediction of in-situ block size distributions with reference to armourstone for breakwaters. *Engineering Geology*, 86(1), 18–36. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.02.004>

Li, J., Yuan, G., Zhang, Y., Zhao, Y. (2015). Study on a general cutting algorithm of complex blocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 1193–1203. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9888-z>

Montani, C. (2003). *Stone 2002: World marketing handbook*. Gruppo Editoriale Faenza Editrice.

Montani, C. (2016). *Marble: The global industry guide*. CarraraFiere Edizioni.

Morales Demarco, M., Oyhançabal, P., Stein, K. J., Siegesmund, S. (2013). Dolomitic slates from Uruguay: Petrophysical and petromechanical characterization and deposit evaluation. *Environmental Earth Sciences*, 69, 1361–1395. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1980-7>

Mosch, S., Nikolayew, D., Ewiak, O., Siegesmund, S. (2011). Optimized extraction of dimension stone blocks. *Environmental Earth Sciences*, 63, 1911–1924. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0815-y>

Mutlutürk, M. (2007). Determining the amount of marketable blocks of dimensional stone before actual extraction. *Journal of Mining Science*, 43, 67–72. <https://doi.org/10.1007/s10913-007-0013-4>

Palmström, A., Broch, E. (2006). Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), 575–593. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.10.005>

Priest, S. D., Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacing in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(5), 135–148. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90844-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90844-5)

Priest, S. D., Hudson, J. A. (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18(3), 183–197. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90973-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90973-6)

Reed, K. M., Bonduà, S. (2025, Yıl). Production optimization and environmental protection in ornamental stone quarries using ground-penetrating radar and stone cutting algorithm. 2025 Mine Exchange Conference, Denver, CO.

Rocscience Inc. Dips [Bilgisayar yazılımı]. <https://www.rocscience.com/software/dips>

Rocscience Inc. RocPlane [Computer software]. <https://www.rocscience.com/software/roplane>

Rocscience Inc. SWedge [Computer software]. <https://www.rocscience.com/software/swedge>

Siegesmund, S., Nikolayev, D., Hoffmann, A., Mosch, S. (2007). 3D-block-expert. *Naturstein*, 5.

Sousa, L. M. (2007). Granite fracture index to check suitability of granite outcrops for quarrying. *Engineering Geology*, 92(3–4), 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.05.003>

Sousa, L. M. O., Oliveira, A. S., Alves, I. M. C. (2016). Influence of fracture system on the exploitation of building stones: The case of the Mondim de Basto granite (north Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5207-3>

Turanboy, A., Ülker, E. (2008). LIP-RM: An attempt at 3D visualization of in situ rock mass structures. *Computational Geosciences*, 12, 181–192. <https://doi.org/10.1007/s10596-007-9077-4>

Turanboy, A., Ülker, E. (2014). Using the distribution curves to optimize the block exploitation in natural stone quarries. In *ISRM EUROCK 2014*. ISRM.

Ülker, E., Turanboy, A. (2009). Maximum volume cuboids for arbitrarily shaped in-situ rock blocks as determined by discontinuity analysis—A genetic algorithm approach. *Computers & Geosciences*, 35(7), 1470–1480. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.10.005>

Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Kakaie, R., Mirzaie, N. H., Yari, M. (2014). Development of 2D computer program to determine geometry of rock mass blocks. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(2), 191–194. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.01.006>

Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Tabaei, M., Sousa, L. M. (2017). Investigation of intact rock geomechanical parameters' effects on commercial blocks' productivity within stone reserves: A case history of some quarries in Isfahan, Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 383–388. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.07.024>

BLOK MERMER ÜRETİMİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM: WEB TABANLI BİR OCAK MODELLEMESİ SİSTEMİ

DIGITAL TRANSFORMATION IN BLOCK MARBLE PRODUCTION: A WEB-BASED QUARRY MODELING SYSTEM

E. Ülker¹, A. Turanboy²

¹Konya Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Müh., Konya, Türkiye, eulker@ktun.edu.tr

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh., Konya, Türkiye, aturanboy@erbakan.edu.tr

ÖZ

Mermer çıkarma endüstrisi, dijital teknolojilerin benimsenmesiyle önemli bir dönüşüm geçirmektedir. Geleneksel doğal taş ocak üretim yöntemleri, mermer bloklarının en uygun kesim yönlerini belirlemek için büyük ölçüde deneyimli çalışanların uzmanlığına dayanmaktadır. Ancak bu yöntemler genellikle hassasiyet, verimlilik ve ölçeklenebilirlik açısından eksiklikler göstermektedir. Bu çalışma, şerit metre ölçümleri, sondaj verileri ve Yer Radarı (GPR) girdileri gibi çeşitli veri kaynaklarını kullanarak mermer blok üretim süreçlerini optimize etmek için tasarlanmış, web tabanlı ve bulut entegrasyonuna sahip bir yazılım sistemini sunmaktadır. Sistem, ocak modellemesi yapmak, mermer yataklarının çokyüzlü (polihedral) temsillerini oluşturmak ve her bir polihedral içinde çıkarılabilecek en büyük hacimli küboitleri belirlemek için hesaplamalı teknikleri içermektedir. Ayrıca, yazılım gelişmiş 3B görselleştirmeler sağlayarak ocak operatörlerinin daha bilinçli kararlar almasına yardımcı olmaktadır. Bulut bilişimden yararlanılarak bu yaklaşımın ölçeklenebilirlik, uzaktan erişim ve ocak operasyonlarıyla sorunsuz entegrasyon sağladığı görülmektedir. Araştırma ayrıca dijital dönüşümün ocakçılık üzerindeki etkilerini değerlendirerek verim artışı, atık azaltma ve ekonomik uygulanabilirlik gibi kazanımları vurgulamaktadır. Sonuçlar, bu tür akıllı yazılım çözümlerinin benimsenmesinin kaynak yönetimini önemli ölçüde geliştirdiğini ve mermer endüstrisinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Mermer, süreksizlik, optimizasyon, yapay zekâ, 3B modelleme

ABSTRACT

The marble extraction industry is undergoing significant transformation with the adoption of digital technologies. Traditional natural stone quarrying methods have largely relied on the expertise of experienced workers to determine the optimal cutting directions for marble blocks. However, these methods often lack precision, efficiency, and scalability. This study presents a web-based software system with cloud integration designed to optimize marble block production processes by utilizing various data sources such as scanline measurements, drilling data, and Ground Penetrating Radar (GPR) data. The system incorporates computational techniques to perform quarry modeling, create polyhedral representations of marble deposits, and identify the largest volume cuboids that can be extracted within each polyhedron. Additionally, the software provides advanced 3D visualizations to support more informed decision-making by quarry operators. By leveraging cloud computing, this approach offers scalability, remote accessibility, and seamless integration with quarry operations. The research also evaluates the impacts of digital transformation on quarrying, highlighting benefits such as increased efficiency, reduced waste, and improved economic feasibility. The results demonstrate that the adoption

of such intelligent software solutions significantly enhances resource management and contributes to the sustainability of the marble industry.

Keywords: Marble, discontinuity, optimization, artificial intelligence, 3D modeling.

GİRİŞ

Mermer endüstrisi, küresel inşaat ve tasarım sektörlerinde önemli bir rol oynamakta olup Türkiye, İtalya ve Çin gibi ülkelerden büyük katkılar sağlamaktadır. Özellikle Türkiye, geniş mermer rezervlerine sahip olup yüksek kaliteli mermer ihracatında sektördeki darboğaza rağmen lider ülkeler arasındadır. Ancak, sektörün ekonomik önemi göz önüne alındığında, geleneksel ocakçılık yöntemleri çoğu zaman verimsizliğin temel nedeni olmaktadır ve bu da hammadde israfının artmasına ve çevresel sorunlara yol açmaktadır.

Dijital dönüşüm, mermer üretimindeki zorluklara çözüm sunarak ocak modelleme, verimlilik ve sürdürülebilirlikte yenilikler sağlamıştır. Web tabanlı uygulamalar ve bulut bilişim sayesinde ocak operasyonlarının gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve analiz edilmesi mümkün hale gelmiştir, böylece planlama aşamasında veri odaklı kararlar alabilmesi sağlanabilecektir. Ayrıca, yapay zekâ ve makine öğrenimindeki gelişmeler, akıllı çıkarma tekniklerinin geliştirilmesini kolaylaştırarak blok kesim süreçlerini optimize etmekte, atıkları en aza indirmekte ve verimi maksimize etmektedir. Ayrıca, hesaplamalı modellemenin ortaya çıkmasıyla birlikte, ocak yapılarının oldukça ayrıntılı temsillerinin oluşturulması mümkün hale gelmiştir. Şeritmetre ölçüm hattı (Scanline) verileri, sondaj verileri ve GPR girdilerinin entegrasyonu, kaya kütlelerinin daha doğru analiz edilmesini sağlamak ve süreksizliklerin yanı sıra çıkarılabilir ticari hacimlerin daha iyi belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Ekonomik açıdan bakıldığında, Türkiye'nin mermer rezervleri ülkeyi küresel pazarda kilit bir oyuncu haline getirmektedir. Türk doğaltaş sektörü, Avrupa, Uzak Doğu, Orta Doğu ve Amerika kıtalarında çok sayıda ülkeye ihracat gerçekleştirmektedir. Sektör, yüksek kaliteli üretim kapasitesiyle küresel pazarda güçlü konumunu sürdürmektedir (İMİB, 2025). Dijital dönüşüm stratejilerinin entegrasyonu, Türkiye'nin rekabet avantajını daha da artırabilir ve kaynak kullanımını iyileştirerek operasyonel maliyetleri düşürebilir. Benzer şekilde, küresel eğilimler mimari ve dekoratif uygulamalarda artan mermer talebini göstermekte olup bu da daha verimli çıkarma ve işleme tekniklerini zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışma, mermer blok üretim süreçlerinin hassasiyetini ve verimliliğini artırmak için tasarlanmış bir web tabanlı ocak modelleme sisteminin geliştirilmesini ele almaktadır. Şeritmetre, sondaj ve GPR verilerinden yararlanan sistem, ocak yapısını temsil eden polihedral modellerin oluşturulmasına olanak tanıyarak en uygun çıkarma sektörlerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bunun yanı sıra, ocak operasyonlarında web uygulamalarının avantajları, kullanım kolaylığı, uzaktan erişim ve gerçek zamanlı iş birliği gibi yönleri ele alınmaktadır.

LİTERATÜR ÖZETİ

Son yıllarda, dijital teknolojilerin ve akıllı sistemlerin entegrasyonu sayesinde blok mermer üretim sektörü önemli bir dönüşüm geçirmektedir. Dijital dönüşüm özellikle ocak modelleme süreçlerini devrim niteliğinde değiştirerek, akıllı karar destek araçları ve gerçek zamanlı veri analizleri sunmuştur (Liu et al., 2022; Khan and Lee, 2024). Bulut bilişim ve web tabanlı platformlar, ocak yönetim sistemlerinde erişilebilirlik, ölçeklenebilirlik ve iş birliği sağlamak amacıyla yaygın olarak benimsenmiştir (García and Fernández, 2022; Chen et al., 2023). Martinez vd. (2018), bulut tabanlı çözümlerin doğaltaş ocağı operatörleri arasındaki veri erişilebilirliğini ve iş birliğini nasıl iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, taş ocağı modellemesinde dijital ikiz teknolojileri araştırılmış ve çıkarma senaryolarının gerçek zamanlı simülasyonuna olanak sağlanmıştır. Web tabanlı sistemlerin en büyük

katkılarından biri, ölçüm hattı, delme ve Yeraltı Radar (GPR) verileri kullanarak tüm ocağın 3B olarak görselleştirilmesi ve modellenmesi yeteneğidir (Yamamoto et al., 2020; García and López, 2023). Bu platformların, kullanıcıların jeolojik kesişim noktalarını belirlemelerine ve poligonal kaya modelleri oluşturmalarına olanak tanıdığı, bunun da çıkarılabilir mermer bloklarının hacim hesaplamalarını ve optimizasyonunu kolaylaştırdığı belirtilmektedir (Gupta and Sharma, 2021; Delmonte et al., 2023).

Üretim verimliliği bağlamında birçok çalışma, yazılım çözümlerine jeoteknik parametrelerin entegre edilmesiyle kesim stratejilerinin ve malzeme veriminin optimize edilmesine odaklanmıştır (Hernández et al., 2022; Ivanov et al., 2023;). Bu optimizasyon çalışmaları, atıkları azaltmayı ve ocak operasyonlarının kârlılığını artırmayı hedeflemektedir. Smith vd. (2020), taş ocağı planlamasında coğrafi uzamsal analizin rolünü araştırmış ve GIS teknolojilerini entegre etmenin faydalarını vurgulamıştır. Benzer şekilde, Jones ve Brown (2019), yapay zekanın mermer yataklarındaki çatlak desenlerini tahmin etmedeki uygulamasını araştırmış ve çıkarma süreçlerini optimize etmedeki potansiyelini göstermiştir. Ayrıca, gerçek zamanlı karar destek sistemleri geliştirilmiş ve bu sistemler, jeolojik koşullara dinamik olarak uyum sağlamaya olanak tanımaktadır (Khan et al., 2021; Rossi et al., 2021). Ek çalışmalar, doğaltaş ocağı operasyonlarında simülasyon yazılımının rolünü vurgulamaktadır. Patel ve Singh (2023) verimi en üst düzeye çıkarmak için optimum çıkarma sırasını tahmin etmede makine öğrenimi algoritmalarının kullanımını incelemiştir. Zhao vd. (2023), mermer çıkarmada akıllı üretim tekniklerini araştırmış ve yapay zekâ destekli karar almanın verimliliği ve sürdürülebilirliği artırdığını vurgulamıştır.

Ülkemiz mermer endüstrisi, yüksek rezerv kapasitesi, çeşitlilik açısından zengin litolojisi ve güçlü ihracat altyapısıyla, küresel doğaltaş ticaretinde stratejik bir konuma sahiptir. 2023 yılı itibarıyla Türkiye, dünya doğaltaş ihracatında Çin ve Hindistan ile birlikte ilk üç ülke arasında yer almakta, özellikle blok mermer ihracatında dünya lideri konumunda bulunmaktadır (İMİB, 2024; OEC, 2024). Türkiye, dünyanın en büyük mermer rezervlerine sahip olup güçlü bir ihracat pazarına sahiptir (İMİB, 2023). Ülkemiz mermer üreticilerinin rekabet gücü, giderek daha fazla modern ocak yönetimi ve optimizasyon sistemleri benimsenmektedir (Çelik and Yılmaz, 2021). Uluslararası düzeyde, mermer pazarı, kentsel gelişim ve lüks inşaat projeleri ile artan talep doğrultusunda genişlemektedir (Grand View Research, 2023). Pazar taleplerine yanıt verebilmek için, ocak operasyonları daha verimli, çevre dostu ve dijital olarak bütünleşmiş hale gelmek zorundadır. Bu ihtiyaç, mermer üretim iş akışlarında otomasyon, makine öğrenmesi ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin entegrasyonuna yönelik yenilikleri tetiklemiştir (Zhou & Li, 2020; Khan et al., 2021). Literatürde, ocak yönetimini desteklemek amacıyla simülasyon platformları, otomatik raporlama sistemleri ve bulut tabanlı paneller gibi yazılım araçlarının önerildiği görülmektedir (Tuncel et al., 2020; Chen et al., 2023). Bu araçlar, operasyonel şeffaflığı artırmanın yanı sıra, planlama doğruluğunu iyileştirmekte ve insan hatalarını azaltmaktadır.

Web uygulamalarının, platform bağımsızlığı, işbirlikçi çalışma ortamları ve gerçek zamanlı izleme yetenekleri gibi avantajları da literatürde vurgulanmaktadır (García and Fernández, 2022). Akıllı mermer üretimi bağlamında, bu özellikler, ocağın geometrilerini modelleyebilen, geri kazanılabilir blok hacimlerini hesaplayabilen ve manuel müdahaleyi en aza indirerek karar destek sistemi geliştiren akıllı sistemlerin oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır (Torres et al., 2022). Ayrıca, literatür, ocak planlamasına sürdürülebilirlik metriklerinin entegrasyonunun ekonomik verimlilik ile çevresel sorumluluğu dengeleme açısından önemini de vurgulamaktadır (Uğur and Acar, 2020; Bianchi and Martinelli, 2022). Yaşam döngüsü değerlendirme araçları ve enerji tüketimi izleme yazılımları, modern ocak operasyonlarının bir parçası haline gelmektedir.

Yazılım ve dijital platformlar geliştikçe, bunların sürdürülebilir-akıllı ocak yönetimindeki rolünün artması beklenmektedir ve bu da mermer üretim endüstrisinde yeni bir dönemi işaret etmektedir. Dijital dönüşüm ve akıllı sistemler, mermer çıkarma süreçlerini daha verimli hale getirirken çevresel etkileri

en aza indirmekte ve sektördeki sürdürülebilir üretim yöntemlerinin benimsenmesine olanak sağlamaktadır.

WEB TABANLI BİR OCAK MODELLEME SİSTEMİ

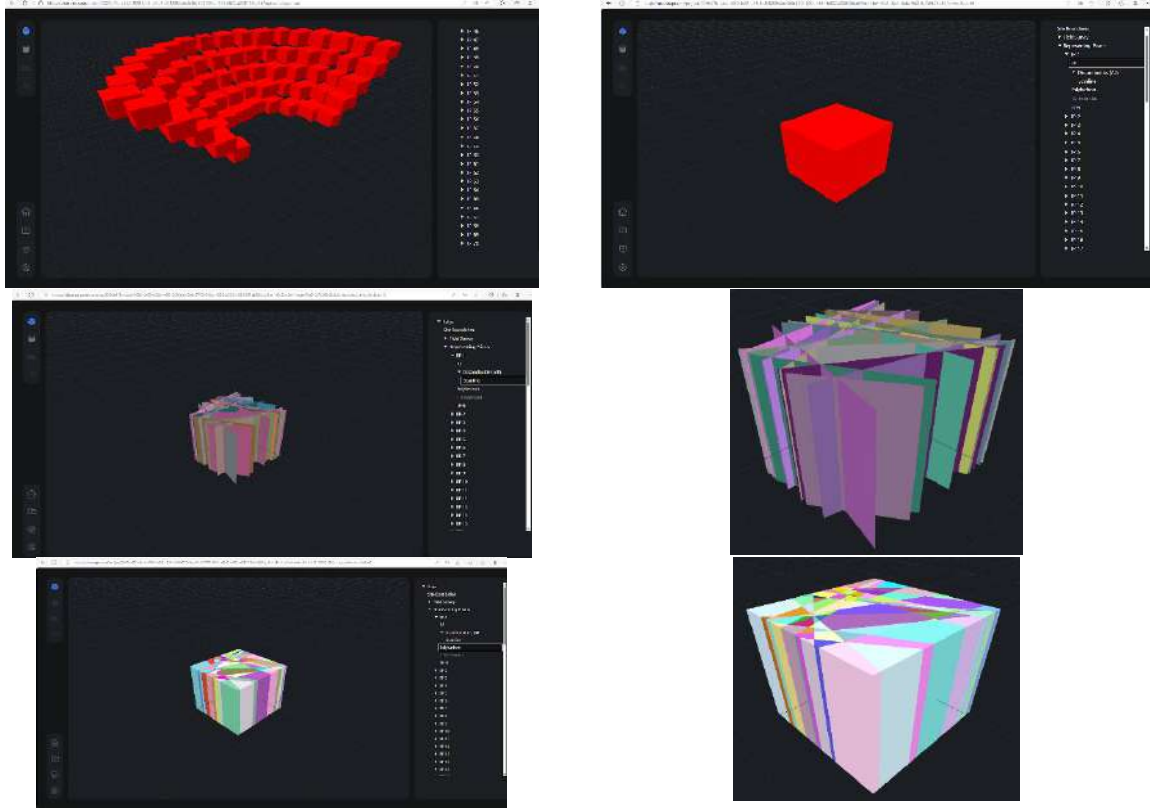
Doğaltaş ocağındaki planlama ve işleme aşamalarında birincil amacı, mümkün olan en düşük maliyetle maksimum hacim ve düzenli şekilli blokların çıkarılması olmalıdır. Faylar, eklemler, yataklanma düzlemleri, kesme bölgeleri, çatlaklar ve mikro çatlaklar gibi süreksizlikler bir doğaltaş rezervindeki yapısal kusurlardır ve bunlar öncelikle üretimin her aşamasında mevcudiyeti, sıklığı ve konumları açısından değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada, doğaltaş yataklarındaki üç boyutlu (3B) süreksizlik sistemlerinin analizini otomatikleştirecek ve verilen koşullar altında ocağı modelleyebilecek bir web tabanlı sistem geliştirilmiştir. 3B süreksizlik ağı için, klasik ve tahribatsız (non-destructive) arazi tetkik ve ölçümleri, yeraltı radarı (Ground Penetrating Radar (GPR)) ve sondaj dijital görüntüleme (Borehole Digital Imaging (BDI)) teknikleri kullanılarak alınan veriler kullanılabilir ve elde edilen verilerin entegrasyonu sağlanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, mermer ocağının üç boyutlu (3B) modellenmesi ve görselleştirilmesi amacıyla WebGL ve Three.js tabanlı teknikler kullanılmıştır. Çalışmanın temel amaçlarından biri, WebGL ve Three.js teknolojilerini entegre eden etkileşimli bir web uygulaması geliştirerek doğaltaş ocaklarının 3B ortamda gerçek zamanlı olarak modellenmesi ve görsel analizinin sağlanmasıdır. WebGL, modern web tarayıcılarında donanım hızlandırmalı 3B grafiklerin yüksek performansla render edilmesini sağlayan bir JavaScript API'si olup herhangi bir eklenti gerektirmeden çalışabilmektedir. Three.js ise, WebGL altyapısını basitleştirerek kullanıcıların karmaşık 3B sahneleri, nesneleri ve etkileşimleri daha erişilebilir ve etkili bir biçimde oluşturmalarını sağlayan açık kaynaklı bir kütüphanedir.

Geliştirilen uygulamada, 3B görselleştirmesi gerçekleştirilecek sahnelerin tüm verileri doğrudan buluttaki veri tabanından beslenmektedir. Kullanıcı etkileşimleri de peyder pey portala entegre edilmektedir (İnt. Kyn.). 3B görselleştirmedeki ihtiyaç duyulacak veriler için Tablo ve Özellik/Alan tanımlamalarını barındıran güncel bir Bilgi Sistemi Tablosu (Information System Table((IST)) içeriği de üretilmiştir.

Süreksizlik düzlemlerinin de doğrudan Temsili bir Prizma (TP) içerisinde üretilbileceği bir yapıya ulaşılmıştır. TP, kısaca ocak içindeki belirli bir bölgeyi üç boyutlu olarak temsil eden geometrik yapı olarak tanımlanır. Küboit ise, polihedral içindeki çıkarılabilir en büyük dikdörtgen prizma hacmidir. TP mevcut ve/veya planlanan kesim sektörlerinde boyutları seçilebilen dörtgen prizmadır ve TP lerin içerisinde süreksizliklerin sınırladığı Poligon ve ilgili hesaplamaları ve çıktıları da elde edilebilir durumdadır. Veriler buluttaki tanımlanmış farklı veri tabanı teknolojilerinden alınabilmektedir. Örnek olarak, 70 farklı TP için üretilen örnek bir ocak kesimine ait sistemin toplu TP leri ve seçilen bir TP özelinde süreksizlik düzlemlerinin TP' den geçirilerek elde edilen poligonları gösteren bazı örnek arayüz ekran alıntıları canlı sistemden elde edilerek Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Örnek Temsili Prizma (TP) için süreksizlik düzlemleri ve polihedraların web uygulaması arayüz görüntüleri: a) 70 farklı TP üretilen örnek bir sistemin toplu TP leri, b) seçilen bir TP için 3B gösterimi, c) saha çalışmalarından elde edilen süreksizlik düzlemleri görüntüleri ve d) süreksizlik düzlemlerinin TP’ den geçirilerek elde edilen poligonlar

Geliştirilen uygulamada, TP’ nin içerisinde tüm süreksizlikler başarılı bir şekilde geçirilebilmektedir. Nihai oluşan çok yüzlü ağlarına ve TP’ nin tam bir gösterimine ulaşılabilmektedir. Süreksizlik verileri istenildiği şekilde güncellenebilir, değiştirilebilir veya farklı dosyalarla çalışılabilir. Her durumda da polihedral üretimleri kolaylıkla yapılabilir duruma getirilmiştir.

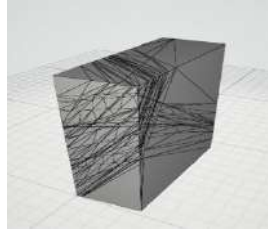
Sisteme girilen süreksizlik verileri sağlıklı olduğu sürece tüm polihedraller anında hesaplanabilmekte, geometri bilgileri OBJ formatına dönüştürülebilmekte ve veritabanına kayıt işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Her bir süreksizlik düzlem kaynağı için uygun IST tabloları mevcuttur ve süreksizlik düzlemleri için kullanılan veri kaynaklarının deterministik veya stokastik olması süreçte herhangi bir olumsuzluğa meydan vermeksizin çalıştırılabilmektedir. Deterministik veri kaynağı doğrudan ölümle elde edilmiş somut veriler iken Stokastik veri kaynağı Monte Carlo, Fischer ve benzeri istatistiksel dağılım tabanlı zenginleştirmelerle üretilen olası verilerdir. Polihedraller hem bireysel hem de toplu olarak elde edilebilir ve görselleştirilebilir durumdadır. Şekil 2’ de örnek bir TP üzerinden geçirilmiş tüm süreksizlik düzlemlerine göre oluşan polihedrallerin bir görseli sunulmaktadır. Bu TP için dokulama (Texture) yapılmış ve patlatılmış (polihedrallerin ayrık gösterimi) şekilde bir gösterimin uygun olacağı değerlendirilmiştir. Hem patlatma yapılmadan önceki hem de patlatma yapıldıktan sonraki halinin polihedraller uzayı şeklindeki gösterimi paylaşılmıştır (Şekil 2).



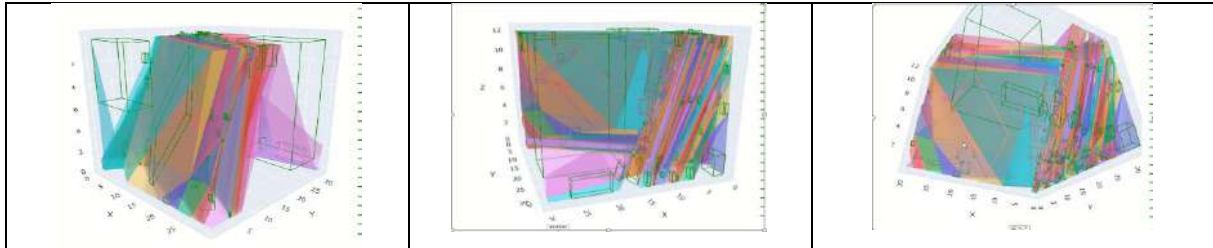
Şekil 2. Bir TP'ye ait süreksizlik düzlemleri kullanılarak oluşturulan polihedrallerin 3B görselleştirilmesi (patlatılmış ve dokulu gösterim)

Düzensiz çokyüzlülerden maksimum küboit tanımlama süreci için yazarların önceden yapılmış yayınları bulunmaktadır (Ülker and Turanboy, 2009). Bu çalışmada genetik algoritma kullanılarak her bir çokyüzlü içine sığabilecek maksimum hacimli düzgün dikdörtgen prizmaya ulaşılabilir. Nesneye yönelik bir programlama dili kullanılarak dışbükey polihedraller ve bu polihedrallere sığabilecek maksimum küboitler (MaxQ) tanımlanmıştır. Ayrıca, IST tablosundan test edilecek polihedrallerin OBJ dosya formatında okunabildiği sağlanmıştır. Uygulama ile birden çok polihedral de oluşturulabilir, MaxQ lar hesaplanabilir ve kaydedilebilir.

Nihai ulaştığımız durumu göstermek için, farklı sayılarda süreksizlikleri barındıran empirik bir polihedral üzerinde algoritma çalıştırılarak elde edebildiğimiz kadar küboit elde edilmiştir ve elde edilen örnek seçilen TP Şekil 3' de gösterilmiştir. Bu prizmaya yerleştirilen küboitleri göstermek için sonuçları içeren 3B nesneyi x-y-z eksenlerinde döndürerek farklı açılardan ekran görüntüsü alınmış ve sonuçlar Şekil 4' de sunulmuştur.



Şekil 3. Örnek seçilen temsili prizma



Şekil 4. Bu prizmaya yerleştirilen küboitleri göstermek için sonuçları içeren 3B nesneyi x-y-z eksenlerinde döndürerek farklı açılardan alınmış ekran görüntüleri

Çalışmanın amacı olan, maden endüstrisindeki bir ihtiyaca cevap vererek maden alanlarında modellenecek TP lerin ve süreksizliklerinin modellemesini sağlayan bir Taş Ocakları Optimizasyon Yazılımı Sistemi, SaaS (Sistem olarak Yazılım (Software as a System)) mimarisinde web uygulaması

geliştirilmiş ve sistemimizin ilk versiyonu web de kullanıcının erişimine açılmıştır. Sistem, Amazon Web Servisleri olarak (AWS) bulut platformunda, veritabanı yönetimi için Amazon RDS ve 3B görselleştirme için ölçeklenebilir hesaplama kaynakları sağlayan EC2 servislerini kullanmaktadır. Mevcut sistemin canlıdaki arayüzü Şekil 5’ de gösterilmiştir.



Şekil 5. AICOSTSQO.com proje giriş sayfasının arayüzü

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, dijital teknolojilerin mermer çıkarma sektöründeki dönüştürücü etkisini vurgulamaktadır. Geliştirilen web tabanlı ocak modelleme sistemi, ileri düzey veri işleme tekniklerini entegre ederek blok mermer üretim süreçlerini optimize etmede önemli bir adımı temsil etmektedir. Klasik şeritmetre, sondaj ve GPR verilerinin kullanımı sayesinde sistem, ocak yapılarını doğru bir şekilde modellemektedir. Bu modellerin üç boyutlu olarak görselleştirilmesi ve özel raporların üretilmesi, ocak yöneticileri için değerli içgörüler sağlayarak kaynak kaybını azaltacağı ve genel verimliliği artıracığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, bulut bilişim entegrasyonu, sistemin esnekliğini ve ölçeklenebilirliğini artırarak herhangi bir yerden erişilebilir hale getirmektedir.

Gerçekleştirilen modelleme çalışması, klasik yöntemlerin yanı sıra daha hassas tahribatsız arazi tetkikleriyle elde edilen verileri entegre ederek süreksizlik verilerini hem deterministik hem de stokastik yaklaşımlarla işleyebilen bir yapı üzerine kurulmuştur. Bu sayede, süreksizlik ağına dayalı maksimum düzgün polihedral(küboit) hesaplamaları rasyonel bir zeminde gerçekleştirilebilmektedir. Model, bu yönüyle hem bakir hem de faal mermer ocaklarında, maksimum verimi sağlayabilecek düzgün blok geometrilerinin teorik olarak hesaplanmasına olanak tanımakta; böylece ocak blok verimi daha sayısal ve görünür biçimde değerlendirilebilmektedir.

Sistem, süreksizlik analizleri üzerinden uygulanarak sezonluk üretim planlaması, ocak yöneliminin maksimum verime göre belirlenmesi ve bakir rezervlerin ekonomik olarak işletmeye açılıp açılmayacağına dair karar süreçlerinde kritik bir karar destek aracı şeklinde işlevsel olarak kullanılabilir. Ayrıca, sistem hem uzun vadeli planlama süreçlerinde hem de aktif üretim aşamasında, kesim stratejilerinin oluşturulmasına ve ocak ilerleme yönelimine katkı sağlayabilecek özelliكتedir.

Sonraki çalışmalarda, model yalnızca süreksizlik analizleriyle sınırlı kalmayıp, doğaltaşın ticari (örneğin renk, desen, pazar değeri) ve fiziksel (örneğin yoğunluk, sertlik, su emme oranı) parametreleriyle entegre edilerek ocak blok veriminin daha duyarlı ve çok kriterli bir yaklaşımla değerlendirilmesine olanak sağlayabilir.

Bu sistemin uygulanmasıyla sezgisel olarak ocaklardaki blok verimliliğinde artış ve atık malzeme oranlarında azalma sağlanacağı açıktır. Ayrıca, operasyonel maliyetlerde sağlanacak tasarruflar, küçük ve orta ölçekli işletmelerin rekabet gücünü artıracaktır.

Gelecekteki çalışmalarda, taş ocağı modelleme ve optimizasyonunda otomasyonu geliştirmek için yapay zekâ ve makine öğrenim uygulamalarının sıklıkla kullanılacağı açıktır. Özellikle, gerçek zamanlı veri işleme, derin öğrenmeye dayalı kırık analizi ve dijital ikiz uygulamalarının dahil edilmesi taş ocağı

operasyonlarını daha da iyileştirebilir. Bu şekilde, mermer sektöründe dijital dönüşümün kapsamının genişletilmesi, sürdürülebilir ve akıllı madencilik uygulamalarının daha geniş bir şekilde benimsenmesine yol açacak ve sonuçta hem sektör paydaşlarına hem de çevre korumaya fayda sağlayacaktır.

Geliştirilen bu uygulama, doğaltaş ocaklarının geometrik yapılarına dayalı dijital temsili mümkün kılarken; saha mühendisleri, üretim planlamacıları ve akademik araştırmacılar için pratik, erişilebilir ve yüksek görsel doğrulukta bir analiz aracı işlevi görmektedir.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma, “Doğaltaş Ocakları Optimizasyonu İçin Yapay Zeka ve Bileşik Arazi Tetkikleri (Artificial Intelligence and Combined Survey Techniques for Stone Quarries Optimization)” ismiyle proje (Proje No: [122N037](#)) Proje TÜBİTAK ve A.B. Eramin2 tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

Anderson, J., Clark, R. (2023). Advancements in quarry management software: Digital modeling for efficient resource utilization. *Journal of Mining Technology*, 58(3), 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.jmt.2023.01.015>

Bianchi, M., Martinelli, F. (2022). Sustainable quarry planning: Integration of environmental metrics in modern extraction processes. *Environmental Impact Assessment Review*, 85, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.06.005>

Çelik, B., Yılmaz, M. (2021). The competitiveness of Turkish marble industry in the digital age. *Journal of Turkish Marble Studies*, 15(2), 102–115. <https://doi.org/10.1016/j.jtms.2021.03.010>

Chen, H., Zhang, L., Li, J. (2023). Cloud-based platforms for marble quarrying: Enhancing accessibility and collaboration. *Journal of Digital Mining*, 33(4), 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.jdm.2023.02.004>

Delmonte, F., Rossi, P., Malatesta, L. (2023). Optimizing marble extraction with 3D modeling and geotechnical data. *Geotechnical Engineering Journal*, 45(2), 256–271. <https://doi.org/10.1016/j.geej.2023.03.005>

García, M., Fernández, D. (2022). The role of web-based systems in modern quarry management. *Journal of Mining Engineering*, 58(3), 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.jme.2022.05.010>

García, M., López, R. (2023). 3D visualization of marble quarries using scanline and GPR data. *Journal of Mining Technology*, 52(1), 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.jmt.2023.01.002>

Grand View Research. (2023). Marble market size, share, & trends analysis report by application (construction, furniture), by region, and segment forecasts, 2023–2030. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/marble-market>

Gupta, S., Sharma, R. (2021). Volume optimization in marble quarrying using 3D modeling techniques. *Mining Science & Technology*, 58(2), 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.mst.2021.07.010>

Hernández, J., Martín, A., Rodríguez, P. (2022). Geotechnical optimization of marble quarrying using integrated software solutions. *Journal of Applied Geology*, 39(5), 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.01.003>

Ivanov, S., Popov, K., Dimitrov, D. (2023). Sustainable quarrying: Integration of geotechnical data for optimizing marble extraction. *Journal of Mining Research*, 49(6), 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2023.02.008>

İMİB. (2023). Turkey's marble sector: Global leadership and future trends. Istanbul Mineral Exporters' Association. <https://www.imib.org.tr>

İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB). (2024). Doğaltaş Sektör Görünümü Raporu. <https://imib.org.tr>

Jones, L., Brown, D. (2019). Artificial intelligence in marble extraction: Predicting fracture patterns. *International Journal of Artificial Intelligence in Mining*, 12(3), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijaim.2019.03.004>

Khan, A., Zhang, T., Liu, Q. (2021). Smart decision-making in marble extraction: Integration of machine learning and IoT. *Journal of Smart Mining*, 21(2), 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2021.02.003>

Khan, A., Lee, J. (2024). Revolutionizing marble quarry management through real-time data analytics and decision support systems. *Mining & Materials Processing Journal*, 32(4), 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.mmpj.2024.01.005>

Kim, Y., Lee, S., Park, H. (2022). Automated quarry optimization for sustainable marble extraction. *Journal of Sustainable Mining*, 44(1), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2022.05.006>

Liu, Y., Zhang, J., Wang, T. (2022). Impact of digital transformation on quarry operations: A case study in marble extraction. *Journal of Digital Transformation*, 6(3), 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.jdt.2022.09.007>

Martínez, J., Gómez, A., Fernández, P. (2018). Cloud computing in mining operations: Enhancing data accessibility and collaboration. *Journal of Cloud Computing in Mining*, 8(1), 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.jccm.2018.01.004>

OEC World. (2024). Marble, Travertine and Alabaster Exports – Turkey Profile. <https://oec.world>

Patel, R., Singh, A. (2023). Machine learning in marble quarrying: Predicting optimal extraction sequences. *Journal of Mining Automation*, 30(3), 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.04.012>

Patel, R., Singh, V. (2023). Machine learning in marble extraction. *Artificial Intelligence in Mining*, 32(2), 187–205.

Rossi, P., Delmonte, F., Malatesta, L. (2021). Real-time optimization in quarrying: A machine learning approach to dynamic decision-making. *International Journal of Mining Technology*, 34(2), 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.ijmt.2021.07.009>

Smith, R., Williams, P., Johnson, S. (2020). Geospatial analysis in quarry planning: A case study for improved efficiency. *Journal of Geospatial Mining*, 15(4), 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.jgm.2020.06.004>

Torres, G., Martínez, J., Rodríguez, F. (2022). Smart systems for marble quarry optimization: From 3D modeling to decision support. *International Journal of Advanced Mining Technology*, 49(3), 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijamt.2022.07.005>

Tuncel, M., Aydın, F., Gökçek, R. (2020). Cloud-based dashboards for quarry management: Improving planning and accuracy. *Journal of Cloud Computing in Mining*, 10(2), 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.jccm.2020.02.008>

Uğur, M., Acar, A. (2020). Sustainability in quarry management: A life cycle assessment approach. *Journal of Sustainable Mining*, 25(5), 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2020.04.011>

Ülker, E., Turanboy, A. (2009). Maximum volume cuboids for arbitrarily shaped in-situ rock blocks as determined by discontinuity analysis—A genetic algorithm approach. *Computers & Geosciences*, 35(7), 1470–1480.

Yamamoto, N., Suzuki, Y., & Watanabe, T. (2020). Application of GPR and scanline data for 3D modeling in marble quarries. *Journal of Mining Geophysics*, 8(3), 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.jmg.2020.05.001>

Zhao, Z., Chen, L., & Zhang, Q. (2023). AI-powered decision-making in marble quarry optimization for sustainability. *Journal of Smart Mining*, 42(1), 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2023.01.002>

Zhou, S., & Li, J. (2020). Automation and machine learning in quarry production: Towards efficient marble extraction. *Journal of Mining Automation*, 28(4), 211–225. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.08.004>

TAM MEKANİZE DOĞALTAŞ KESİM HATLARI VE VERİMLİLİK

FULLY MECHANIZED CUTTING LINES IN NATURAL STONE AND EFFICIENCY

E. Kundak^{1*}, M. Yurdakul²

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Kuyumculuk ve Mücevher Tasarımı Bölümü

*Sorumlu yazar: ecekundak@gmail.com

ÖZ

Günümüzde otomasyon sistemlerinin genişleyen sınırları ve işgücü piyasasındaki dalgalanmalar nedeniyle her sektörde olduğu gibi doğaltaş sektöründe de tam mekanize kesme ve işleme sistemlerine geçiş ihtiyacı artmaktadır. Doğaltaş işleme tesislerinde, üretim süreçleri; ağır, yüksek işgücü gerektiren ve iş kazası riskinin görece yüksek olduğu süreçlerdir. Bu bağlamda, doğaltaş işleme tesislerinde tam mekanize kesim hatlarının kullanılmasının oldukça önemli olduğu söylenebilir. Genel olarak doğaltaş işleme tesislerinde blok kesme makinalarından çıkan plakaların nihai ürün haline gelene kadar süreçlerinin tamamının insan gücü kullanılmadan ya da görece az insan gücü kullanılarak, otomasyon sistemleri ile yürütüldüğü sistemler tam mekanize sistemler olarak tanımlanabilir. Kesim süreçlerinin tam mekanize sistemlerle yönetilmesi pek çok avantajı da beraberinde getirir. Bu çalışmada, bir doğaltaş işleme tesisindeki tam mekanize kesim hatları hakkında bilgi verilerek ve bu sistemin konvansiyonel kesim yöntemleri ile karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırma işlemlerinde, hem konvansiyonel hem de tam mekanize kesim hatlarının yer aldığı örnek bir doğaltaş işleme tesisinden gerçek veriler değerlendirilmiştir. Kesme ve işleme verileri; ilk yatırım giderleri, bakım onarım maliyetleri ve üretim verimliliği perspektifinde incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; tam mekanize sistemler ilk yatırım giderleri anlamında yüksek maliyetli olmasına rağmen; işletme giderleri, bakım onarım maliyetleri ve iş gücüne olan bağımlılık bağlamında avantajlıdır denilebilir.

Anahtar Kelimeler: Doğaltaş, tam mekanize kesim hatları, otomasyon, verimlilik

ABSTRACT

Due to the expanding boundaries of automation systems and changes in the labor market, the need for fully mechanized cutting and processing lines is increasing in all sectors, including the natural stone industry. Production processes in natural stone processing plants are typically heavy, labor-intensive, and involve a relatively high risk of occupational accidents. In this context, the use of fully mechanized cutting systems in natural stone processing plants is important. Generally, systems in natural stone processing plants where the entire process—from the slabs produced by block cutting machines to the final product—is carried out with minimal human labor, and is instead driven by automation systems, are defined as fully mechanized systems. Managing cutting processes through fully mechanized systems brings many advantages. This study provides information about fully mechanized cutting systems in a natural stone processing plant and compares this system with conventional cutting systems. During this comparison, data from a natural stone processing plant containing both conventional and fully mechanized cutting systems were evaluated. The cutting and processing data were examined from the perspectives of initial investment costs, maintenance and repair costs, and production efficiency. According to the results obtained from this study, although fully mechanized cutting lines are expensive

in terms of initial investment, they are advantageous in terms of operating costs, maintenance and repair costs, and dependence on labor.

Keywords: Natural stone, fully mechanized cutting lines, automation, productivity

1. GİRİŞ

Çalışma ortamında insan gücünün daha az kullanılmasını sağlayan otomasyon sistemlerinin doğaltaş sektöründe yaygınlaşması üretim sürecindeki iş kazalarının önlenmesine önemli bir katkı sağlayacaktır. Uluslararası Çalışma Örgütü (İLO) tarafından 2025 yılı için Dünya İş Sağlığı ve Güvenliği Günü'nün teması "Sağlık ve güvenliğin devrimi: İşyerinde yapay zeka ve dijitalleşmenin rolü" olarak belirlenmiştir. Bu durum, sadece Türkiye’de, sadece doğaltaş ya da madencilik sektöründe değil; tüm dünyada ve tüm sektörlerde dijitalleşmenin iş sağlığı ve güvenliği açısından önemini de ortaya koymaktadır.

Bir doğaltaş işleme tesisinde en büyük maliyet kalemlerinden birisinin işçilik olduğu söylenebilir. Bu nedenle, yarı ya da tam otomasyonlu sistemlere geçişin maliyetlerde düşüşe neden olacağı söylenebilir. Ayrıca Bunların yanı sıra sektörde otomasyona geçiş, üretim hızının artmasına ve kalite standartlarının sürdürülebilir şekilde korunmasına da katkı sağlar.

Doğaltaş işleme tesislerinde özellikle seleksiyon işlemlerinde farklı otomasyon sistemlerinin kullanımına dair pek çok bilimsel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların hemen hemen hepsi nihai ürün bandında taşın yüksek çözünürlüklü çekilen fotoğrafı üzerinden kalitenin belirlenmesi ve uygun sınıflamanın yapılabilmesine yöneliktir (Akkoyun, 2010; Akkoyun ve Fırat, 2023; Ardalı, 2008; Yaman, 2015; Kemaloğlu, 2017; Temiz, 2018; Önder ve Göksu, 2019; Torun vd., 2019; Fırat, 2022). Literatürde, görüntü analiz yöntemleri kullanılarak plakaların yüzey özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır (Dönmez ve Sarı, 2005; Turhal vd., 2015). Ancak literatürde doğaltaş üretiminde tam mekanize kesim hatlarını konu alan çalışmalara rastlanmamıştır. Bu çalışmada, doğaltaş işleme tesislerine kurulan tam mekanize kesim hatları ile ilgili genel bilgiler verilip sonrasında bir doğaltaş fabrikasında kurulmuş ve çalışmakta olan tam mekanize bir kesim hattı hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

2. DOĞALTAŞ İŞLEME TESİSİ ÜRETİM HATLARI

Doğaltaş işleme tesislerinde üretim süreci ocaktan gelen ve işleme tesisinin stok sahasında bekletilen blokların üretim hattına alınmasıyla başlar. Stok sahasından blok kesme makinalarıyla kesilen bloklardan plaka üretilir. Sonrasında, üretilen plakalar gönyeye getirilir ve müşteri talebine göre istenen yüzey işleme yöntemi (genellikle cilalama) uygulanır. Son olarak da istenen ebatta boyutlandırılan nihai ürün seleksiyona tabii tutulup uygun şekilde paketlenir ve satışa yollanır. Bu üretim sürecinde doğaltaş bloktan, blok kesme makinalarıyla yapılan konvansiyonel üretimden sonraki üretim süreci bazı doğaltaş işleme tesislerinde satışa kadar konvansiyonel olarak devam ettirilirken; bazı tesislerde de otomasyonlu üretim hatları kurularak plaka üretiminden sonraki süreç tam mekanize olarak devam etmektedir.

Konvansiyonel üretim, yoğun iş gücü gerektiren, tesis içi lojistiğe ihtiyaç duyulan ve mekânsal kısıtları olan bir süreçtir. Bu nedenle, doğaltaş işleme tesislerinde tam mekanizasyona geçiş başlamış ve hızla yaygınlaşmaktadır. Hem konvansiyonel hem de tam mekanize kesim hatları için doğaltaş bloktan, blok kesme makinaları ile plaka üretme süreci aynı şekilde gerçekleştirilmekte, sonraki süreç konvansiyonel ya da tam mekanize kesim hatları ile devam etmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada, her iki üretim hattı içinde ortak olan blok kesme sürecinin tanımlanmasından sonra konvansiyonel kesim hatları ve tam mekanize kesim hatları sırasıyla anlatılmıştır.

2.1. Blok Kesme Makinaları

Ocaktan gelen doğaltaş bloklar, doğaltaş işleme tesislerinde kesilip ebatlanarak nihai ürün haline getirilmektedir. Bu sürecin ilk adımı, blokların ebatlama öncesinde plaka haline getirilmesi için blok kesme makinaları ile kesilmesi sürecidir. Bu işlem, bloğun boyutuna ve şekline göre katrak ve dairesel testereli blok kesici olmak üzere iki farklı tip blok kesme makinası kullanılarak gerçekleştirilebilir. Monoteller, nadir de olsa büyük çaplı dairesel testereler de kullanılmaktadır.

2.1.1. Katraklar

Katraklar genellikle daha büyük boyutlu ve şekilli bloklardan çoklu kesim yöntemi ile plaka üretilmesi prensibine dayanarak kesim yapan blok kesme makinalarıdır. Katraklar kullandıkları kesici takıma göre, lamalı ve telli katraklar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki katrak türünde de kesilecek olan doğaltaş blok, taşıyıcı vagon vasıtasıyla makinanın altına yerleştirilmektedir. Kesim esnasında sürtünmeden kaynaklı aşırı ısınmayı önlemek, kesim alanındaki kesilen kırıntıları kesim alanından uzaklaştırarak kesici takımın hızlı aşınmasını engellemek ve toz problemi yaşanmasını engellemek için her iki katrak türünde de kesim esnasında sisteme su beslemesi yapan sulama sistemleri bulunmaktadır (Kundak ve Yurdakul, 2023).

Lamalı katraklarda kesim işlemi, lama adı verilen testerelerin üzerindeki kesici soketler ile sağlanmaktadır. Lamalar birbirine paralel şekilde testere çerçevesine kesilecek plakanın kalınlığına göre sıra ile takılmakta ve çerçevedeki lama sayısı tek seferde kesilecek plaka sayısını belirlemektedir. Lamalı katraklarda kesim, ana tahrik motorunun 3-4 metre çaplı kasnağı döndürmesi ve bu kasnak ile testere çerçevesini birbirine bağlayan kasnak kayışının dairesel hareketi doğrusal harekete çevirmesi ile gerçekleşmektedir. Böylece, kesici soketlerin üzerinde bulunduğu lamaları taşıyan testere çerçevesi ileri-geri hareket eder ve kesici takımın bu ileri-geri hareketi ile doğaltaş blok plakalara ayrılır (Bayram, 2002).

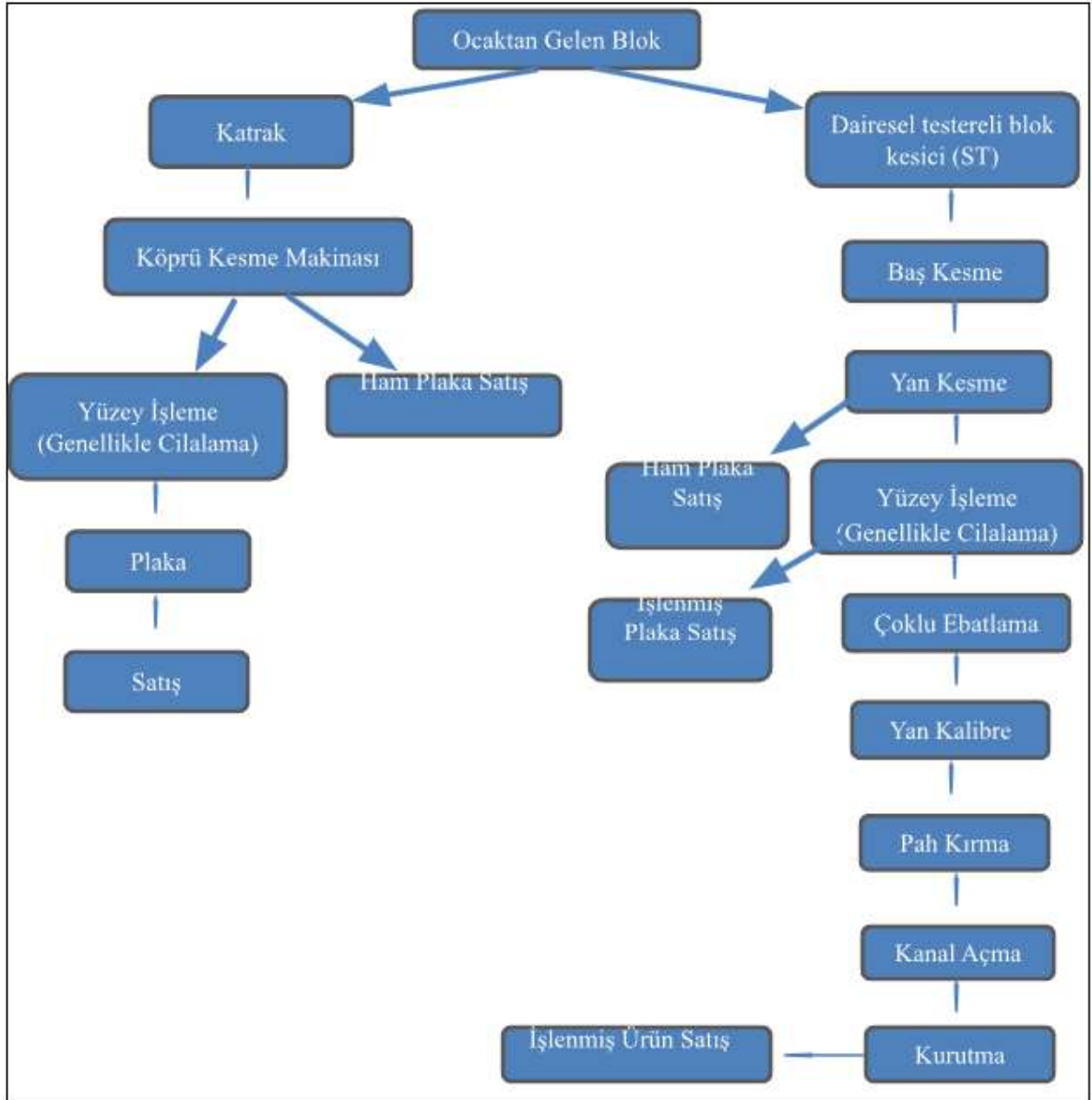
Genellikle, sert taş kesiminde yaygın olarak kullanılan tel katraklar son yıllarda Türkiye’de karbonat kökenli doğaltaşların kesiminde de kullanılmaya başlanmış ve hızla yaygınlaşmaktadır (Harmandal, 2025). Tel katraklarda kesim işlemi, çelik bir telde takılı olan elmas boncuklar ile yapılmaktadır. Kesici takımın farklı olduğu gibi, kesim işlemi de tel katraklarda lamalı katraklara göre farklılık göstermektedir. Bir tambur sisteminde takılı olan tellerin sonsuz döngüde döndürülmesiyle kesim işlemi gerçekleştirilir. Bu tambur sistemi genellikle üç farklı tamburdan oluşmaktadır. Bunlar; ana tahrik tamburu, istikamet tamburu ve gergi kasnak tamburudur. Kesici takımın üzerinde bulunduğu tellerin sayısı kadar kanalın bulunduğu bir plastik kaplama ile kaplı olan ana tahrik tamburu, gücünü makinanın ana motorundan alır. İstikamet tamburu, tellere yön verme işlemini gerçekleştirir ve tellerin kesme hattında döndürülmesini sağlar. Makinadaki tel sayısı kadar kasnağın bir araya gelmesiyle oluşmuş gergi kasnak tamburu tellere gergi verilmesini ve kesilecek plakanın kalınlığının ayarlanmasını sağlar (Kundak ve Yurdakul, 2023).

2.1.2. Dairesel testereli blok kesici (ST)

Dairesel testereli blok kesiciler, şekilsiz ya da yarı şekilli ve küçük boyutlu doğaltaş bloklardan plaka üretilmesinde kullanılan blok kesme makinalarıdır. Bu makina; güç kaynağı, kesim işlemini gerçekleştiren yatay ve dikey dairesel testereler, testerelerin üzerinde bulunduğu ana mil, güç kaynağını ve ana mili taşıyan kızaklar, kesilecek bloğun yerleştirildiği sabit vagon ya da hareketli kesim tablası ve beton ayaklardan oluşmaktadır. Kesim işlemi, genellikle bir tane (bazen de birkaç tane) düşey dairesel testere ve bir tane yatay dairesel testere ile gerçekleştirilir. Bu testereler, çelik dairesel disklerin etrafına yerleştirilmiş elmas soketlerden oluşmaktadır. Düşey dairesel testere ile yapılan kesim y eksenini boyunca kesim yaparak kesimi yapılan plakanın kalınlığını belirlerken; yatay dairesel testere x eksenini boyunca kesim yaparak plakanın genişliğini belirlemektedir (Yurdakul, 2009; Kun, 2013).

2.2. Konvansiyonel Kesme Hatları

Blok kesme işlemi katraklar ya da dairesel testerele blok kesicilerle gerçekleştirilip doğaltaş bloklar plaka haline getirildikten sonra tam mekanize kesim hattı olmayan tesislerde konvansiyonel kesim hattı ile müşteri talebi doğrultusunda nihai ürün üretimi gerçekleştirilir. Konvansiyonel kesim hattı ile nihai ürün üretilen bir doğaltaş işleme tesisi için oluşturulan örnek bir akım şeması Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Konvansiyonel doğaltaş üretim hattı genel akım şeması

Katraklarda üretilen plakalar, plaka arabasından bazı işletmelerde vinçler vasıtasıyla; bazı işletmelerde vakumlu kaptırmalar vasıtasıyla köprü kesme makinasının kesim tablasına yerleştirilir. Köprü kesme makinaları katraktan çıkan plakaların ebatlanması veya geniş bant cila hattına doğaltaşlar beslenmeden önce plakaların kenarlarının düzleştirilmesi için geliştirilmiş kesme makinalardır (Kun, 2013). Diğer bir deyişle, yan kesme makinalarının çok amaçlı kullanım sağlayan, büyük boyutlu ve köprülü tipleridir (Kulaksız, 2007). Bu makinalarda kesim, düşey tek diskli kesici ile gerçekleştirilir.

Dairesel testereli blok kesicilerle plaka üretimi yapılan hatlarda üretim hızı arttırılmak istendiğinde dairesel testereli blok kesicilerden sonra yatay ya da düşey yarma makinaları konulabilir. Bu makinalar, dairesel testereli blok kesicinin ürettiği plakaları karşılıklı yerleştirilen kesici disklerin bulunduğu bir sistem ile plakaları ikiye bölerek plaka üretim hızını arttırmayı sağlamaktadır. Dairesel testereli blok kesici ile plaka üretiminin yapıldığı hatlarda üretim hızının arttırılmasına ihtiyaç olmadığında yarma makinalarının kullanım zorunluluğu yoktur. Dairesel testereli blok kesicilerde üretilen plakaların gönye uygunluğunun sağlanması için tek testereli dairesel kesiciler kullanılmaktadır. Bu kesiciler plakanın düzleştirdiği yüzeye göre baş (kafa) kesme makinası ya da yan kesme makinası adını almaktadır.

Doğaltaş işleme tesisinde plaka satışı yapılacak ise plaka katraş ya da dairesel testereli blok kesicide kesildikten sonra, köprü kesme ya da baş ve yan kesme makinalarında plakaların kenar düzeltme işleminin tamamlanmasının ardından müşteri talebinde herhangi bir yüzey işleme yöntemi uygulanması isteniyorsa, istenen yöntem uygulanmakta ve plakalar paketlenerek satış yapılmaktadır. Genel olarak yüzey işleme yöntemlerinden cilalama yapılması talep edilmektedir.

Konvansiyonel üretim hatlarında plaka üretimi bittikten sonra yine müşteri talebine göre, plakaların farklı boyutlarda ebatlanması söz konusu olabilmektedir. Bu hatta genel olarak fayans hattı adı verilmekte ve bu hat; polisaj, çoklu ebatlama, yan kalibre, pah kırma, kanal açma makinaları ve kurutma sistemi gibi makinalardan oluşmaktadır. Cilalanmış plakalar yine dairesel testereleri bulunan çoklu ebatlama makinalarına yerleştirilerek istenen boyutlarda ebatlamaları gerçekleştirilir. Çoklu ebatlama makinalarının kesici takımının yatay eksende hareketli olması sayesinde kesim ölçüleri istenilen şekilde kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Çoklu ebatlama makinaları ile kesimi gerçekleştirilen fayanslar yan kalibre, pah kırma ve kanal açma işlemlerinin yapıldığı makinaya yerleştirilir. Üretilen fayans ölçülerinin son kontrolü yan kalibrede yapılır. Sonrasında fayansın montaj sırasında düşeneceği zemine daha iyi tutmasını sağlamak amacıyla fayansın altına bir ya da iki kanal açılır ve kenar pah kırması da gerçekleştirildikten sonra fayanslar satışa hazır hale gelir. Doğaltaş işleme tesisindeki tüm kesim ve işlemler su kullanılarak gerçekleştirildiğinden paketleme öncesi sıcak hava verilerek kurutma işlemi gerçekleştirilir. Son olarak da fayansların renk ve desenlerine göre gruplanarak paketlenildiği kalite kontrol sürecinin yürütüldüğü seleksiyon hatlarına yerleştirilir. Burada sınıflanan nihai ürünler paketlenerek satışa sunulur (Kun, 2013).

Konvansiyonel üretim hatlarında bulunan tüm bu makinalarda yapılan işlemlerde ve bu makinalar arasında yapılan plaka ya da ebatlı ürün transferlerinde oldukça yoğun iş gücü kullanılmaktadır.

2.3. Tam Mekanize Kesim Hatları

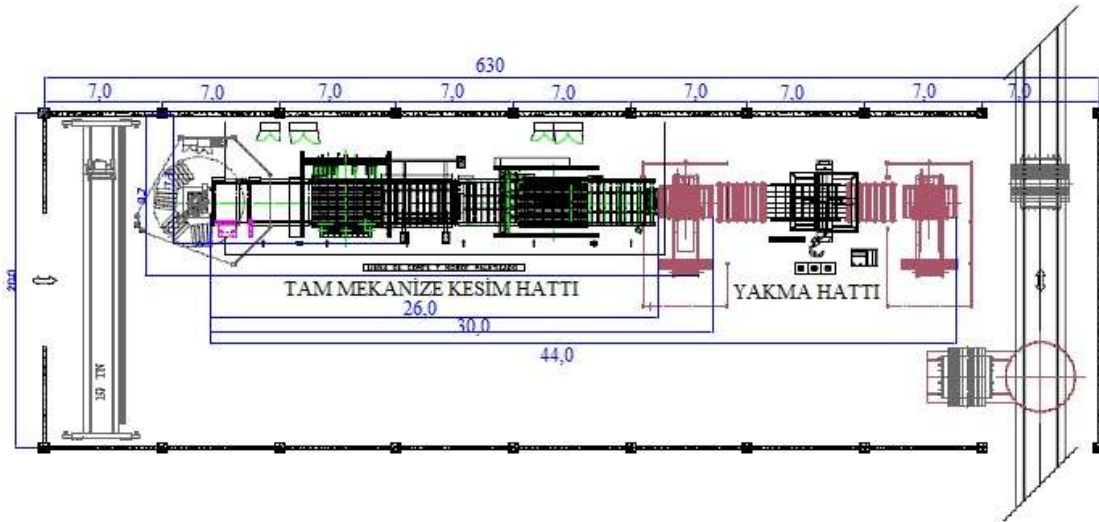
Tam mekanize kesim hatları genellikle birden fazla makinanın bir araya getirilmesiyle oluşan ve üretimin mümkün olduğunca kesintisiz olmasının sağlandığı sistemlerdir. Deneyimli ve kalifiye işçi bulmanın zor olması, işçilik maliyetlerinin yüksek olması, özellikle fiziksel iş gücü gerekliliğinin fazla olduğu sektörlerin iş sağlığı ve güvenliği açısından daha riskli olması gibi pek çok sebepten dolayı tam mekanize sistemler tercih edilmektedir. Ayrıca bu sistemler kullanılarak yapılan üretimin takip edilmesinin kolay olması da tercih edilmelerinde etkilidir. Doğaltaş işleme tesislerinde kurulan tam mekanize sistemler tüm bu sebeplerden dolayı gittikçe yaygınlaşmaktadır.

Tam mekanize kesim hatları bir doğaltaş işleme tesisinde genellikle blok kesme makinalarından sonraki üretim süreci için planlanarak tasarlanmaktadır. Katraklar, dairesel testereli blok kesiciler, monoteller ve tek disklerden tam mekanize kesim hatlarına besleme yapılmaktadır. Ancak sadece blok kesici makinalardan sonra değil, köprü kesme makinalarından ya da yüzey işleme hatlarından sonra da mekanize hatlara besleme yapılabilir.

Tam mekanize hatlarda her zaman ilk tasarlandığı şekliyle üretim yapma zorunluluğu yoktur. Hattın kurulduğu dönemdeki ihtiyaçlar sonraki dönemde bir ihtiyaç olmaktan çıkarsa, bazı makinalar çalıştırılmayarak aradan besleme yapılarak hattın ihtiyaç olan kısmıyla üretim yapılabilir. Yani, bu hatlara ara besleme yapmak da mümkün olmaktadır. Özellikle yeni bir ürün üretme ihtiyacının olduğu, üretim hızının arttırılmak istendiği ya da farklı yüzey işlemleri uygulanan ürünlerin aynı ebatta üretilmesinin istendiği gibi pek çok farklı durumda halihazırda çalıştırılan tam mekanize hattın ihtiyaç duyulan herhangi bir noktasından ara besleme yapılacak şekilde hattın revize edilmesi kolaylıkla sağlanabilmektedir. Bu aradan besleme işlemi, bazen insan gücüyle yapılabilir gibi bazen de yine mekanize sistemlerden olan robotlar kullanılarak da gerçekleştirilebilir.

Doğaltaş işleme tesislerine kurulan tam mekanize hatlar genellikle, tesis içinde hattın yerleştirilmesinin planlandığı alanın boyutlarına ve üretilecek nihai ürünün özelliklerine göre özel olarak tasarlanarak üretilirler. Tesis koşulları uygunsa, mekanize hattın art arda sıralanması tercih edilebilir. Böylece, üretim mümkün olduğunca az kesintiye uğrayacak ve zaman kayıpları daha da azaltılacaktır. Ancak, tesiste sistemin kurulmasının planlandığı alanın, ihtiyaç olan üretim hattından daha kısa olduğu durumlarda da bu hatları kurabilmek mümkündür. Tam mekanize kesim hatları tesise özel tasarlandıkları için oldukça esnek kurulum imkanları sunarlar. Bazen hattın bir kısmını tesisin başka bir bölümüne kurularak iki hat sonrasında birleştirebilir, bazen de birbirini takip etmesi gereken iki hat yan yana kurularak ilk hattın çıkan ürün ilk hattın altına yerleştirilen bir bant sistemiyle tekrar hattın başına taşınarak ikinci hattın başından sisteme tekrar besleyebilen, tesisin koşullarına uygun esnek tasarımlar yapılabilir. Tesis koşullarının yanı sıra, nihai ürün de tam mekanize hattın planlanmasında önemli bir parametredir. Genel hatlarıyla mekanize kesim hatlarının tasarımı birbirine benzer olsa da üretilen nihai üründe yüzey işleme istenip istenmemesi, isteniyorsa hangi yüzey işleminin istendiği, nihai ürünün geometrik şekli, ürünün ebatları ve kalınlığı gibi pek çok parametre dikkate alınarak tam mekanize hatlar tasarlanmaktadır.

Bu çalışmanın yapıldığı doğaltaş işleme tesisinde, ocaktan gelen doğaltaş bloklar lamalı ve tel katraklarda plaka haline getirilmektedir. Sonrasında bu plakalar hem konvansiyonel hem de tam mekanize sistem ile nihai ürüne dönüştürülmektedir. Şekil 2’de bu tesiste katraklardan sonraki süreç için tasarlanan tam mekanize kesim hattının teknik çizimi verilmiştir.



Şekil 2. Tam mekanize doğaltaş üretim hattının teknik çizimi

Tam mekanize hatlarda ilk olarak hatta plaka beslemesinin sağlandığı otomatik plaka yükleme robotu yerleştirilir. Şekil 2’de görüldüğü gibi bu işletmede de iki tane plaka yükleme robotu bulunmaktadır. Bunlardan ilki hattın en başındaki besleme noktası, ikincisi yakma hattından sonraki ara besleme noktası olarak konumlandırılmıştır. Tesiste hem yakma işlemi uygulanan hem de uygulanmayan nihai ürün üretimi olduğundan iki besleme noktasına ihtiyaç duyulmuştur. Ayrıca, ara besleme noktası bazen başka bir hatta yakma işlemi gerçekleştirilen plakaların tam mekanize kesim hattına aradan bir besleme yapılarak kesim hattının üretim hızının artırılması için de kullanılmaktadır.

Plaka yükleme aşamasında otomatik plaka yükleme robotunun kolu yatay halden düşey hale gelir ve üzerindeki vakum pompasına bağlı emme kaptırmaları ile plakayı hattın yanında duran plaka arabasından alır (Şekil 3a). Sonrasında kol tekrar yatay hale gelerek aldığı plakayı giriş makaralarının bulunduğu masaya yerleştirir (Şekil 3b). Bu masadaki hizalama sistemi sayesinde plakaların kesim öncesi aynı hizaya getirilme işlemi de otomatik olarak gerçekleşmiş olur. Bu yüklemenin yapıldığı masa sadece plaka yükleme arabasından plaka olarak sisteme besleme görevi yapmakla kalmayıp aynı zamanda, ara depo olarak da görev yapmaktadır. Böylece, üretimde malzeme beslemesindeki bekleme zamanı kayıplarının da en aza indirgenmesi sağlanmış olur.



Şekil 3.a) Yükleme robotu plakayı alırken, b) Yükleme robotu plakayı masaya yerleştirdiğinde

Hatta yerleştirilen plaka, tam mekanize hat boyunca üzeri kauçuk kaplı çelik transfer ruloları ile taşınır. Bu sayede, taşıma süreci ekstra işçilik gerekmeden yapılmış olur (Şekil 4).



Şekil 4. Transfer ruloları

Bu tesiste tam mekanize hattın ikinci işlemi, bir yüzey işleme işlemi olan yakmadır. Plaka yükleme robotuyla hatta yüklenen plaka transfer ruloları ile yakma hattının içine taşınır. Bu hatta plakaların yüzeyleri açık alev uygulanarak yakılır ve ham yüzeylere göre daha pürüzlü yüzeyler elde edilir. Yakma hattından çıkan plakalar yine transfer rulolarıyla çoklu ebatlama makinalarına gelir.

Genellikle tam mekanize hatlarda plakaların kesim işlemi çoklu ebatlama makinalarla sağlanmaktadır. Bu makinalara boy ebatlama ve en ebatlama makinaları adı verilmektedir. Bu hatlarda kullanılan çoklu kesicilerin kafa sayıları hattın kullanılacağı tesisin ihtiyaçlarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Bazen 3 kafalı, bazen 5, 7 ya da 9 kafalı kesiciler de tasarlanabilmektedir.

Çalışmanın yapıldığı tesiste, yakma işleminden sonra transfer ruloları ile yakma hattından gelen ya da ara beslemeyle hatta yeni beslenen plakalar boy ebatlama makinasına gelir. Bu tesisteki boy ebatlama makinası, maksimum disk çapı 60 cm olan 5 adet dairesel kesici diskin bulunduğu, hat uzunluğu 600 cm ve hat genişliği 422 cm olan bir kesim hattıdır (Şekil 5). Bu kesicide, maksimum 15 cm kalınlıklı plakaların kesimi gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 5. Boy ebatlama makinası

Boy ebatlama makinasında, kesimi yapan köprü tipi diskli kesiciler lineer bir otomatik kılavuzlama sistemi kullanmaktadır. Köprü, kesim masasına paralel ve dik olan iki çelik kiriş üzerinde kayan iki başlıkla desteklenmektedir. Kesim kafaları ise, köprü boyunca yatay ve dikey olarak hareket ederken bilyeli raylar üzerinde kaymaktadır. Bu tasarım, hızlı ve hassas bir konumlandırma sağlamaktadır. Konumlandırma işlemi için manyetik ve optik ölçümler içeren bir sistem kullanılmaktadır. Dikey ve yatay hareketler birbirinden ayrı invertörlerle kontrol edildiği için iki eksen de eş zamanlı konumlandırma yapmak mümkün olmaktadır. Ayrıca, sistemin tozdan zarar görmesini engellemek için plastik kapaklarla koruma sağlanmaktadır. Plakaların kesiminin yapıldığı esnada üzerinde bulundukları kesim masalarının üstünde kesim esnasında plakaların kaymasını önlemek amacıyla kauçuk ile kaplanmış özel çelik bantlar bulunmaktadır.

Boy kesimi yapılan doğaltaşlar, her döngüde yalnızca uygun kesim yapılmış taşın bir sonraki işleme geçmesinin sağlandığı pnömatik tahrikli mekanik sistemlerin olduğu bir tezgahtan geçerek en ebatlama makinasına geçer. Bu arada, en ebatlama işleminden önce mekanik itme-çekme sistemi ile çalışan ikinci bir tezgahta da artık ayırma işlemi tam mekanize olarak yapılmaktadır. Kesimden kaynaklı artık taş parçaları hattın dışına bantlı sistemle taşınarak artık konteynırlarına atılmaktadır (Şekil 6). Konvansiyonel sistemlerde bu artık parçalar genellikle ciddi bir iş gücü gerektirerek yapıldığından bu artık hattının da mekanize olması avantaj sağlamaktadır.



Şekil 6. Tam mekanize artık ayırma sistemi

Çalışmanın yapıldığı tesisteki en ebatlama makinası, maksimum disk çapı 60 cm olan 7 adet dairesel kesici diskin bulunduğu, hat uzunluğu 550 cm ve hat genişliği 537 cm olan bir kesim hattıdır (Şekil 7). Boy ebatlama makinasında olduğu gibi bu makina da maksimum 15 cm kalınlıklı plakaların kesimi gerçekleştirilebilmektedir. 15 cm kalınlık tamamen bu işletmeye özgü bir tasarımıdır. Bu işletme, bordür, yer döşemesi, su kanalı gibi ağırlıklı olarak kalın taş üretimi yaptığından bu işletme için 15 cm'e kadar taşların kesilebileceği disk ve çalışma takımları seçilmiştir.



Şekil 7. En ebatlama makinası

En ebatlama makinasının tüm çalışma prensipleri boy ebatlama makinası ile aynıdır. Kılavuzlama ve kesme işlemlerinde kullanılan sistemler aynı olmakla birlikte disk başına su sarfiyatları 15-20 lt/dk'dır. En ebatlamadan sonra kauçuk taşıma bandına sahip çelik profilli bir iskeletten oluşan boşaltma masası bulunmaktadır. Bu sayede, son kesicide hem yükleme hem de boşaltma işlemleri eş zamanlı yapılabildiğinden üretimde zaman kaybı yaşanması engellenmektedir.

Çalışmanın yapıldığı tesisteki tam mekanize üretim hattının en son ekipmanı ise, paletleme robotudur (Şekil 8).



Şekil 8. Paletleme robotu

Paletleme robotu maksimum paletleme verimliliği sağlayabilmek için özel tasarlanmış bir ekipmandır. Vakumlu başlığı ile boşaltma masasındaki nihai ürünü alarak paletlere yerleştirme işlemini gerçekleştirir. Taşıma kolu 360° hareket kabiliyetine sahiptir. Bu robot, özel olarak tasarlanmış taşıma vantuzu sayesinde yatayda 120 kg'ye kadar yük taşıyabilmektedir. Genel olarak bu robotların tasarım parametreleri nihai ürün özellikleriyle bire bir ilişkilidir. Nihai ürünün özellikleri dikkate alınarak paletleme robotunun vakum vantuzlarının teknik özellikleri, vantuz sayısı, robotun kol boyu, kol genişliği, motor gücü gibi özellikleri belirlenmektedir. Bu tesiste hattın sonuna tek bir robot yerleştirilmiş olmasına rağmen ihtiyaca göre robot sayısını arttırmak da mümkündür.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Son yıllarda, otomasyon sistemlerindeki gelişmeler sayesinde insan gücünün yoğun kullanıldığı sektörlerde mekanizasyona geçiş için yeni pazar fırsatları oluşmuştur. İnsan gücünün yoğun kullanıldığı doğaltaş işleme tesislerindeki üretim sürecine otomasyon sistemlerinin entegre edilmesiyle birden fazla makinanın bir araya getirilmesi sonucunda tasarlanan tam mekanize üretim hatlarının kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

Bu çalışmada, genel olarak konvansiyonel kesme hatları ve tam mekanize kesme hatları incelenmiş ve bir doğaltaş işleme tesisindeki tam mekanize hat tüm detayları ile değerlendirilmiştir. Doğaltaş işleme tesisindeki tam mekanize üretim hattı, otomatik plaka yükleme robotuyla başlamaktadır. Plakalar, transfer ruloları ile yakma yüzey işlemi uygulanan hatta gelmekte, sonrasında ise çoklu kesici disklerin olduğu tam mekanize kesim hattında ebatlanmaktadır. Bu kesim hattında, 5 diskli boy ebatlama ve 7 diskli en ebatlama makinası bulunmaktadır. Hem boy ebatlama makinasından hem de en ebatlama makinasından sonra oluşan kesim artıklarının otomatik olarak sistemden artık konteynırlarına atılmasını sağlayan otomatik artık ayırma sistemleri bulunmaktadır. Mekanize hattın en sonunda ise üretilen nihai ürünleri paletlere yerleştirilmekte kullanılan otomatik paletleme robotu bulunmaktadır. Bu tam mekanize hat tamamen bu işletmenin ihtiyaçlarına göre tasarlanmış bir hattır. Tam mekanize hatlar tamamen işletme ihtiyaçlarına göre işletmeye özel şekilde farklı makineler da eklenerek tasarlanabilmektedir. İstenilen ürün ve işletme kapasitesine bağlı olarak makine özellikleri de değişebilmektedir. Disk çapları, kesici kafa sayısı, kesme yüksekliği, kesme şekli (ileri, ileri-geri) gibi parametreler hat tipine göre farklılık göstermektedir.

Tam mekanize kesim hatları ile üretim yapılan işletmelerde ekstra iş gücüne ihtiyaç olmadığından ve bu hatlardaki tüm tehlikeli çalışma alanları, personel girişini engelleyecek şekilde metal çitlerle ve optik sensörlü bariyerlerle çevrili olduğundan iş sağlığı ve güvenliği açısından oldukça avantajlı koşullar sağlanmaktadır. Bu optik bariyerlerin ihlal edilmesi halinde sistemin tüm elektriği kesilerek hattın tamamında üretim durmaktadır.

Tam mekanize hatlarda birbirine entegre makinalar bulunması nedeniyle hattın yönetimi ve makinelerin bakımı daha organize şekilde yapılabilir. Bu sayede önleyici bakım maliyetlerinde de azalma olmaktadır. Ayrıca hattaki süreçlerin tamamı dijital panolardan takip edilebilmekte ve gerektiğinde bu panolardan hatta müdahale edilebilmektedir.

Tüm hat boyunca doğaltaşların taşınması transfer ruloları ile ekstra iş gücü gerektirmeden yapılmaktadır. Bu çalışmadaki tam mekanize hat, bu tesisin üretim sürecine uygun tasarlanmıştır. Ancak, tam mekanize üretim hatlarının tasarımı oldukça esnek ve özelleştirilebilirdir. İşleme tesisinde hattın kurulması planlana alan, ürün gamı vb. ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak her tesis için farklı ebatla ve farklı makinalardan oluşan tam mekanize hatların tasarlanması mümkündür. Müşteri talebi doğrultusunda, hatta herhangi bir yüzey işleme yöntemi (kumlama, yakma vb.) eklenebilir ya da üretimdeki ihtiyaca göre tam mekanize hattın bir kısmı çalıştırılmayabilir.

Tam mekanize hatlarda, hatta ara besleme yapılabilmesi için hattın istenen yerine otomatik yükleme robotu yerleştirilebilir. Hatta ara besleme yapılması üretim hızını arttırmaya ya da tam mekanize hatta bulunan ve o an için ihtiyaç duyulmayan bazı hatların atlanarak üretim sürecinin devam etmesine imkan sağlayabilmektedir. Ayrıca tam mekanize hatlarda ihtiyaç duyulan ara noktalara yükleme ve boşaltma robotları da yerleştirilebilir. Bu sayede hat mekanizasyonu artırılarak yükleme ve boşaltma işlemlerindeki zaman ve iş gücü kayıpları azaltılır ve üretim hızı artırılıp iş gücü maliyetleri azaltılabilir.

Tam mekanize kesim hatlarında kullanılan çoklu kesicilerin kafa sayıları hattın kullanılacağı tesisin ihtiyaçlarına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca, tam mekanize kesim sistemlerine plaka ölçülerini tarayarak maksimum nihai ürün ebatlamayı sağlayacak sensörler yerleştirilerek otomatik ölçülendirme yapılması da mümkündür. Yani, ekstra sensörlerle tam mekanize hatlar daha da geliştirilebilir. Bunun yanı sıra, seleksiyon gerektiren doğaltaşlar için konvansiyonel üretim hattındaki seleksiyon işlemi gibi tam mekanize hatlarda da optik olarak görüntü işleme yazılımları kullanılarak tam mekanize üretim hattına optik seleksiyon da eklenebilir.

Tam mekanize kesim hatları, iş süresi kaybını azaltmasından dolayı verimliliğin artması ve otomasyondan kaynaklı daha az iş gücü kullanımına bağlı olarak işçilik maliyetlerinin azalması ile iş sağlığı ve güvenliği anlamında pek çok avantaj sağlaması bakımından konvansiyonel üretim hatlarına göre oldukça avantajlıdır denilebilir. Son dönemde artan işçilik maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda tam mekanize sistemlerinin ilk yatırım maliyetinin kısa vadede amorti edilebileceği söylenebilir. Ancak, tam mekanize hatların verimli ve konvansiyonel hatlara göre avantajlı hale gelebilmesi için, işleme tesisinde üretimi gerçekleştirecek olan doğaltaşın özellikleri, işleme tesisinde üretilen ürün gamı, tesiste tam mekanize hattı yerleştirmek için planlanan alanın büyüklüğü, müşteriden gelen yüzey işleme talepleri, yatırımcının ilk yatırım maliyetiyle ilgili yatırımı yapabilir güçte olup olmaması vb. etkenlerin detaylı olarak analiz edilmesi önemlidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında sağladıkları katkılardan dolayı Gökyar Mermer A.Ş.'nin yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akkoyun, Ö. (2010). An Evaluation of Image Processing Methods Applied To Marble Quality Classification. 2010 2nd International Conference on Computer Technology and Development (ICCTD 2010).

Akkoyun, Ö., Fırat, Y. (2023). Görüntü İşleme ile Doğaltaş Seleksiyonunda İşlem Süresini Azaltan Yeni Bir Yöntem Önerisi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 14(3), 471–477.

Ardalı, E. (2008). Classification Of Marble Textures Using Neural Networks and Image Processing Methods. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bayram, F. (2002). Elmas Lamalı Katraklarda Kesme Verimliliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dönmez, S., Sarı, D. Y. (2005). Sayısal Görüntü Analizi Tabanlı Bir Yüzey Parlaklık Ölçüm Sistemi. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(3), 401–405.

Fırat, Y. (2022). Görüntü İşleme Yöntemleri ve Mermer Üretimine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Harmandal, Z. (2025, 12 Mart). Hartek Mermer Granit İnşaat Makine ve Ekipmanları San. Tic. Ltd. Şti. Genel Müdürü (Özel görüşme), (Görüşme tarihi: 12.03.2025).

Kemaloğlu, N. (2017). Traverten Plakaların Damar Yapılarına Göre Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Sınıflandırılması ve Kalite Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kulaksız, S. (2007). Doğaltaş (Mermer) Madenciliği ve İşleme Teknolojileri (Genişletilmiş 2. Baskı). TMMOB Maden Mühendisleri Odası.

Kun, N. (2013). Mermer Jeolojisi ve Teknolojisi (Geliştirilmiş 2. Baskı). Akare Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti.

Kundak, E., Yurdakul, M. (2023). Doğaltaş Blok Kesme Proseslerinde Yeni Teknoloji: Tel Katraklar. Türkiye 28. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi (IMCET2023) Bildiriler Kitabı (ss. 402–411).

Önder, A. S., Göksu, T. (2019). OpenCL ile Gerçek Zamanlı Doğaltaş Tasnifi ve Performans Analizi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(3), 689–698.

Temiz, M. (2018). Doğaltaş Karolarının Görüntü İşleme ve Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Sınıflandırılması. Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Torun, Y., Akbaş, M. R., Çelik, M. A., Kaynar, O. (2019). Development a Machine Vision System For Marble Classification. IEEE 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU).

Turhal, Ü. Ç., Aydın, S., Dener, G. (2015). Mermer Plakalarında Görüntü İşleme Teknikleri ile Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1).

Yaman, Ö. (2015). Mermer Fabrikalarında Ürün Kalite Kontrolünün Görüntü Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yurdakul, M. (2009). Karbonat Kökenli Doğaltaşların Yapay Sinir Ağları ile Kesilebilirlik Tayini. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

DOĞALTAŞ ENDÜSTRİSİNDE 4,3 MM ÇAPLI ELMAS TEL KULLANIMININ KESİM VERİMLİLİĞİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞE ETKİSİ: HARTAŞ MERMER TESİSİNDE UYGULAMALI BİR ÇALIŞMA

THE EFFECT OF 4,3 MM DIAMETER DIAMOND WIRE USAGE ON CUTTING EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY IN THE NATURAL STONE INDUSTRY: AN INDUSTRIAL CASE STUDY IN THE HARTAŞ MARBLE FACTORY

Y.E. Erbay^{1 2*}, I. Kerti², M.S. Eken³

¹*HARTEK Kesme Teknolojileri Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye*

²*Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul, Türkiye*

³*Sivas Cumhuriyet Üniversitesi. Hafık Meslek Yüksek Okulu, Sivas, Türkiye*

*Sorumlu yazar: yunus@hartek.com.tr

ÖZ

Doğaltaş endüstrisinde artan üretim hacmi, çevresel kaygılar ve maliyet baskısı, kesim teknolojilerinde daha verimli ve sürdürülebilir çözümlerin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Bu kapsamda, geleneksel elmas soketli katrik makinelerine kıyasla daha az enerji tüketen, ince kesim iziyle daha fazla levha verimi sağlayan çok telli (multiwire) kesim sistemleri yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada, HARTEK Kesme Teknolojileri Ltd. Şti. tarafından geliştirilen 4,3 mm çapındaki plastik kaplı elmas boncuklu tel sisteminin, HARTAŞ Mermer Sanayi tesislerindeki endüstriyel uygulamaları değerlendirilmiştir. Gerçek saha koşullarında yürütülen bu çalışmada; tel çapının kesim verimliliği, yüzey kalitesi, tel ömrü, enerji tüketimi ve atık oluşumu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Daha ince çaplı tel kullanımı sayesinde geleneksel olarak kullanılan 7,3 mm veya 6,3 mm boncuklu tellere göre kesim süresi kısalmış, kesim kaybı azalmış ve enerji tüketiminde %20'nin üzerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Ayrıca, karbon ayak izinin düşmesi ve atık yönetiminin kolaylaşması gibi çevresel kazanımlar da ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, 4,3 mm tel sistemlerinin doğaltaş kesim süreçlerinde hem teknik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğaltaş kesimi, multiwire teknoloji, elmas tel, kesim verimliliği, sürdürülebilir üretim

ABSTRACT

The increasing production volume in the natural stone industry and environmental and cost concerns have made it necessary to use more efficient and sustainable solutions in cutting technologies. In this context, multiwire cutting systems have become widespread, consuming less energy and providing more slab efficiency with thin cutting kerfs compared to traditional diamond segment gangsaw machines. This study evaluated the industrial applications of the 4.3 mm diameter plastic coated diamond bead wire system developed by HARTEK Cutting Technologies Co. Ltd. in HARTAŞ Marble Industry factory. This study was carried out under real field conditions; the effects of the wire diameter on cutting efficiency, surface quality, tool life, energy consumption and waste generation were

analyzed. Thanks to the thinner diameter wire, cutting time was shortened, cutting loss was reduced, and more than 20% improvement was observed in energy consumption compared to traditionally used 7.3 mm or 6.3 mm diamond wires. In addition, environmental gains such as reducing carbon footprint and facilitating waste management were also revealed. The results show that 4.3 mm wire systems significantly contribute to technical and environmental sustainability in natural stone-cutting processes.

Keywords: Natural stone cutting, multiwire technology, diamond wire, cutting efficiency, sustainable production

GİRİŞ

Doğaltaşlar, insanlık tarihinin en eski yapı malzemelerinden biri olup M.Ö. 4000’li yıllarda Antik Mısır, Mezopotamya ve Roma uygarlıkları tarafından tapınak, saray ve anıt yapımında yaygın şekilde kullanılmıştır (Ashurst and Dimes, 1998). Zamanla hem estetik hem de dayanım özellikleri nedeniyle mimari, şehircilik, iç mekân kaplama, mezar taşı üretimi ve sanat objelerinde vazgeçilmez hale gelmiştir. Doğaltaşa duyulan ihtiyaç, kentleşmenin artması, inşaat sektöründeki büyüme ve estetik/kişiselleştirilmiş yaşam alanlarına yönelik taleplerle paralel olarak artmaktadır. Dünya genelinde doğaltaş üretimi 2023 yılı itibarıyla yıllık yaklaşık 150 milyon ton seviyelerine ulaşmış olup başlıca üretici ülkeler Çin, Hindistan, Türkiye, İran ve İtalya’dır (Günay, 2023). Türkiye, dünya doğaltaş rezervlerinin yaklaşık %33’üne sahip olup mermer, traverten ve granit gibi çeşitlilik açısından zengin kaynaklara sahiptir (MTA, 2021). 2022 yılında Türkiye’nin işlenmiş doğaltaş ihracatı yaklaşık 1,2 milyar dolar olarak gerçekleşmiş ve en büyük ihracat pazarları ABD, Suudi Arabistan ve Hindistan olmuştur (İMİB, 2023). Türkiye’de Afyonkarahisar, Balıkesir, Muğla, Bilecik ve Denizli gibi iller başlıca üretim ve işleme merkezleri olarak öne çıkmaktadır. Afyonkarahisar ili, özellikle “Afyon Mermeri” olarak bilinen beyaz, gri ve damarlı türleriyle Türkiye’nin en tanınmış doğaltaş merkezlerinden biridir ve etrafındaki bölgede 500’e yakın ocak faaliyet göstermektedir (Karakaya ve Yüzer, 2020). Muğla, açık renkli Muğla beyazı mermeri ile başta Çin ve Hindistan olmak üzere Asya pazarında büyük talep görmektedir. Bilecik bölgesi, “Bilecik Beji” olarak bilinen bej renkli mermerleri ile hem iç piyasa hem de Avrupa pazarı için önemli bir tedarik noktasıdır (Demirtaş, 2022). Denizli ise traverten yatakları ile öne çıkmakta ve özellikle Pamukkale çevresinde çıkarılan travertenler hem mimari hem de peyzaj projelerinde yoğun kullanılmaktadır (Gültekin, 2019). Bu illerde bulunan modern ocaklar ve entegre işleme tesisleri sayesinde Türkiye, işlenmiş doğaltaş ihracatında küresel ölçekte rekabetçi bir konuma sahiptir. Ayrıca, bu bölgelerdeki taşların fiziksel, kimyasal ve estetik özelliklerinin bilimsel olarak karakterize edilmesi, ürünlerin uluslararası standartlara uygunluğunu artırmakta ve katma değeri yüksek ihracata olanak sağlamaktadır (TİM, 2023).

Doğaltaş üretimi, taşın ocak ortamında yerinden kontrollü şekilde sökülmesiyle başlar. Blok çıkarımı genellikle elmas tel kesme, zincir kolu kesme gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Elmas tel kesme yöntemi, düşük titreşimli ve yüksek hassasiyetli olması nedeniyle günümüzde kireçtaşı ve hakiki mermer gibi yumuşak-orta sertlikte olan taşların ocaklardan bütün bloklar halinde çıkarılmasında yaygın şekilde tercih edilmektedir (Ersoy and Atıcı, 2005). Elde edilen ham bloklar, özel taşıma araçlarıyla mermer ve doğaltaş fabrikalarına taşınarak, burada kesme, kalibrasyon, silme-cilalama, kenar şekillendirme ve alternatif yüzey işlemleri (tarama, fırçalama, kumlama vb) gibi adımlardan geçirilmektedir. Kesim aşaması, blokların levha (slab) haline getirilmesini sağlar ve üretim hattının en kritik bölümünü oluşturur.

Genellikle geleneksel olarak elmas soketli katrik makineleri kullanılsa da bu sistemler yüksek enerji tüketimi, kalın kesim izi (kerf) ve düşük verim gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle sektörde çok telli kesim sistemleri (multiwire) ön plana çıkmaya başlamıştır (Tuncer, 2020). Çok telli kesim makinelerinde (multiwire), metre başına sabit sayıda elmas boncuk içeren plastik kaplı çelik tel paralel şekilde hareket ettirilerek, taş blokların levha haline getirilmesi sağlanır. Her tel üzerinde belirli

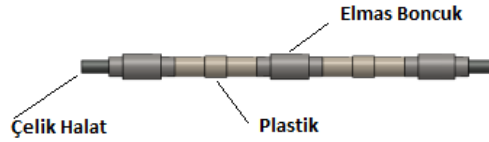
aralıklarla dizilmiş, genellikle 5,3–8,3 mm çapında değişen, elmaslı kesici boncuklar yer almaktadır. Bu elmas boncuklar, plastik veya kauçuk esaslı kaplamalar ile telin çevresine sabitlenerek kesim sırasında sürtünmeye ve yüksek sıcaklığa karşı dayanım kazanmaktadır (Singh et al., 2017). Tel sistemleri, makinenin iki ucundaki tahrik kasnakları ve germe düzenekleri ile yüksek hızda çalıştırılır. Bu sistemlerde tel çapı 7,3 mm'den 4,3 mm'ye küçüldükçe, kesim sırasında oluşan kesim izi (kerf) kalınlığı azalmakta, bu da daha fazla levha elde edilmesini, daha az taşın çamura dönüşmesini ve enerji verimliliğinin artmasını sağlamaktadır (Dursun ve Arslan, 2019). Ayrıca, kesim kuvvetinin tel başına düşen dağılımı, hem yüzey kalitesine hem de tel ömrüne doğrudan etki etmektedir. Tel çapı, boncuk dizilimi, kaplama malzemesi ve tel gerilimi gibi parametreler, kesim performansını belirleyen en kritik teknik değişkenler arasında yer almaktadır (Bonetto and Gattamelata, 2021). Geliştirilen 4,3 mm çapındaki plastik kaplı elmas boncuklu teller, geleneksel 7,3 mm veya 6,3 mm çapındaki sistemlere kıyasla hem üretim verimliliği hem de kaynak kullanımı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Daha ince çap sayesinde kesim izi (kerf) minimuma indirilmekte, bu da blok başına daha fazla levha elde edilmesini sağlamaktadır. Kesim sırasında daha az malzeme toza dönüşmekte, kesim süresi kısalmakta ve enerji tüketimi düşmektedir. Ayrıca, daha düşük tel ağırlığı, makineye gelen yükü azaltmakta ve tel çekiş sistemlerinin mekanik ömrüne de olumlu katkı sağlamaktadır (Zhang and Lin, 2022). Enerji verimliliği açısından multiwire sistemler, özellikle yüksek adetli kesim operasyonlarında geleneksel katrik sistemlerine göre %20–30 arasında daha az enerji tüketmekte, birim levha başına düşen karbon ayak izini azaltmaktadır (Karakurt and Aydın, 2020). Bu bağlamda, 4,3 mm tel sistemlerinin kullanımı yalnızca üretim maliyetlerini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda doğaltaş endüstrisinin çevresel sürdürülebilirliğine de katkı sunmaktadır. Kullanılan tel miktarının ve boncuk hacminin azalması, üretimde hammadde ve kimyasal bağlayıcı kullanımını da düşürmekte; atık yönetimini daha etkin hale getirmektedir.

Bu çalışma, HARTEK Kesme Teknolojileri Ltd. Şti. tarafından geliştirilen 4,3 mm çapındaki elmas boncuklu tellerin HARTAS Mermer Sanayi tesislerinde endüstriyel ölçekte gerçekleştirilmiş uygulamalarına dayanarak, sistemin teknik ve ekonomik performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Gerçek saha verileri üzerinden yapılan analizlerle; kesim verimliliği, yüzey kalitesi, enerji tüketimi ve tel ömrü gibi parametreler ortaya konmuş, ince çaplı tel sistemlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla sağladığı katkılar çok yönlü olarak incelenmiştir.

YÖNTEM VE ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, HARTEK Kesme Teknolojileri Ltd. Şti. tarafından geliştirilen ve üretilen, 4,3 mm çapındaki elmaslı kesicilerden oluşan plastik kaplı tel sistemlerinin performansını değerlendirmek amacıyla yürütülmüştür. Çalışmada, söz konusu tel sistemlerinin gerçek saha koşullarındaki kesim verimliliği, yüzey kalitesi, enerji tüketimi ve tel ömrü gibi parametreler üzerinden analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ince çaplı tel kullanımının geleneksel yöntemlere göre sağladığı avantajlar karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Deneysel uygulamalar, Bilecik ilinde faaliyet gösteren HARTAS Mermer Sanayi A.Ş.'ye ait endüstriyel çok telli (multiwire) kesim makinelerinde gerçekleştirilmiştir. Farklı sertlik ve yapı özelliklerine sahip taş blokları üzerinde kesme çalışmaları yapılarak, sistemin performansı gerçek üretim koşulları altında değerlendirilmiştir. Bu çalışmada deneysel kesim işlemleri, başta Akhisar Bej olmak üzere, Kütahya Gri, Blue Jean, Diana Royal, Kuvarslı Beyaz (Kemalpaşa), Sivrihisar Gri, Giresun Vizon ve Bergama Graniti gibi farklı sertlik (yumuşak-orta sert-sert) ve kökene (kireçtaşı, metamorfik, mağmatik) sahip taş türleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Böylece tel performansı yalnızca tek tip doğaltaş değil, farklı köken ve sertlik düzeylerindeki taşlar üzerinde de gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan tel sistemi, çelik halat üzerine dizilmiş sinterize elmaslı kesicilerden oluşmaktadır. Her bir metre telde 37 adet elmas boncuk yer almakta olup boncuklar arasındaki boşluklar plastik malzeme ile kaplanarak telin dış etkenlere ve aşınmaya karşı korunması ve sistemin bütünlüğünün sağlanması hedeflenmiştir. Bu yapı, hem telin mekanik dayanımını artırmakta hem de kesim sırasında telin düzgün çalışmasını sağlamaktadır. Kullanılan çok telli kesim

makinesinde (multiwire), her bir tel 20 metre uzunluğunda ve kendi ekseninde burulmuş olup kapalı çevrimde, yani sonsuz döngüsel hareketle çalışmaktadır. Bu tasarım sayesinde telin sürekli olarak aynı hat üzerinde dönmesi sağlanmakta, böylece kesim süreci boyunca stabil kesim hızı ve doğrultusu korunmaktadır. Şekil 1’de kullanılan plastik kaplı tel şematik olarak sunulmuştur. Deneysel kesim işlemleri, HEDEL markasına ait DELTAWIRE-2 model, endüstriyel çok telli kesim (multiwire) makinesi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Plastik kaplı elmaslı kesici tel

Bu makine, aynı anda 50 adet plastik kaplı elmaslı telin senkronize biçimde çalışmasına olanak tanımakta olup yüksek hassasiyetli kesim ve düşük kalınlık toleransı ile endüstriyel levha üretimi gerçekleştirebilmektedir. Her bir kesim döngüsünde, 4,3 mm çapındaki teller ile 20 mm kalınlığında toplam 50 adet levha üretilebilmektedir. Kesim ünitesini tahrik eden ana motorun gücü 150 kW olup bu sayede sistem yüksek blok yoğunluğunda dahi kesintisiz ve kararlı performans gösterebilmektedir. Deneysel çalışmalar süresince makinenin 50 adet tel ile tam performansla çalıştığı kesim verileri esas alınmıştır. Makine üzerine yerleştirilebilecek maksimum blok boyutları 340c mx130 cmx220 cm olup bu ölçüler uygulama sırasında kullanılan tüm blokları kapsamaktadır.



Şekil 2. Hedel DeltaWire-2 şematik gösterimi

Şekil 2’de Makinenin şematik gösterimi verilmiştir. Kesim süreci boyunca tel gerginliği (sehim), ilerleme hızı, enerji tüketimi ve makine duruş süreleri, makinenin dijital üretim ekranları üzerinden eşzamanlı olarak izlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Her bir kesim döngüsü sonunda elde edilen levhaların kalınlık ölçümleri dijital kumpas ile 0,1 mm hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmada elde edilen veriler doğrultusunda, kullanılan 4,3 mm çapındaki çok telli kesim sisteminin performansı, geleneksel katarak sistemine kıyasla çeşitli açılardan değerlendirilmiştir. Tel ömrü, kesim süresi, blok başına elde edilen levha sayısı, fire oranları enerji tüketimi gibi teknik parametreler gözlenmiştir. Ayrıca, elde edilen levhaların metrekare bazında oluşan toplam yüzey maliyeti, elektrik tüketimi, işçilik süresi ve sarf malzeme giderleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler, çok telli kesim sistemi ile geleneksel katarak teknolojisinin teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında multiwire makinede kesilen 200 adet 300 cmx130 cmx200 cm ölçülerinde kesilen blokların çeşitleri Çizelge 1’de belirtilmiştir.

Çizelge 1. Multiwire kesme makinelerinde kesilen doğaltaş türleri ve kesme parametreleri

Doğaltaş	Blok Adeti	Toplam Yüzey(m ²)	Ortalama kesme iniş hızı (m/s)	Ortalama kesme hızı (m ² /s)
Akhisar Bej	34	10200	50	1,5
Bazalt	17	5100	55	1,65
Bilecik Bej	11	3300	60	1,80
Blue Jean	5	1500	40	1,20
Burdur Bej	9	2700	60	1,80
Diabaz	6	1800	35	1,05
Diano Royal	17	5100	60	1,80
Kütahya Gri	12	3600	60	1,80
Kemalpaşa (Quartz damarlı)	4	1200	50	1,50
Limra	5	1500	120	3,60
Muğla Beyaz (Silisli)	7	2100	70	2,10
Söğüt Bej	8	2400	50	1,50
Sivrihisar Granit	10	3000	25	0,75
Traverten	50	15000	85	2,55
Vizon	5	1500	20	0,60

Deneyisel çalışmalar kapsamında yaklaşık toplam 60.000 m² doğaltaş yüzeyi kesilmiş olup bu üretim hacmi farklı sertlik ve yapıya sahip çok çeşitli taş türleri üzerinden elde edilmiştir. En yüksek kesme miktarı, yaklaşık 15.000 m² ile traverten taşında gerçekleşmiş ve bu miktar toplam yüzeyin yaklaşık %25’ine karşılık gelmiştir. Traverten’i sırasıyla Akhisar Bej (%17) ve Bazalt (%8,5) takip etmiştir. Ortalama kesme hızı genel olarak 1,68 m²/s düzeyinde gerçekleşmiş, bu hız taşın fiziksel ve mineralojik özelliklerine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermiştir. Örneğin, görece yumuşak ve homojen yapıya sahip Limra taşı, 3,60 m²/s ile en yüksek kesim hızına ulaşırken; yüksek sertlik ve yoğunluk özellikleri gösteren Giresun Vizon ve Diabaz gibi taş türlerinde bu hız sırasıyla 0,60 m²/s ve 1,05 m²/s seviyelerine kadar düşmüştür. Benzer şekilde, Sivrihisar Granit ve Blue Jean gibi granitik ya da yüksek kuvars içeriğine sahip taşlarda da kesim hızlarının düşük seyrettiği görülmüştür. Buna karşılık, Muğla Beyaz (Silisli), Burdur Bej ve Kütahya Gri gibi taş türlerinde kesim hızları ortalamanın üzerinde kaydedilmiş ve sistemin bu taşlar üzerinde daha verimli çalıştığı anlaşılmıştır. Bu veriler, kullanılan 4,3 mm çapındaki çok telli kesim sisteminin taşın türüne ve yapısal özelliklerine bağlı olarak gösterdiği performans farklılıklarını ortaya koymakta, aynı zamanda kesim parametrelerinin süreç optimizasyonu açısından ne denli kritik olduğunu göstermektedir. Geleneksel katarak sistemlerinde kesim süreci sabit iniş hızı prensibine dayandığından, taş türüne bağlı olarak Akhisar Bej için 15–17 cm/h, Bilecik Bej için 20–25 cm/h, Burdur Bej ve Kütahya Gri için 20 cm/h, traverten için ise 35–40 cm/h gibi sabit aralıklarla ilerleme sağlanmaktadır. Bu kesim değerleri, çalışmada kullanılan HARTAS Mermer üretim hattındaki mevcut katarak uygulamalarından alınmıştır. Bu yöntemde blok büyüklüğü değişse bile birim zamandaki kesim hızı sabit kalmakta, sistem taş sertliğine göre belirlenmiş sabit inme değerleriyle çalışmaktadır. Buna karşılık çok telli kesim sistemlerinde kesim hızı, doğrudan birim zamanda kesilen yüzey alanı (m²/s) üzerinden tanımlanmakta ve bu sayede her taş türü için daha hassas ve esnek bir hız optimizasyonu yapılabilmektedir. Böylelikle multiwire sistem, taşın özelliklerine göre gerçek zamanlı verimlilik artışı sağlamaktadır. Çok telli kesim (multiwire) sistemiyle elde edilen levhalar, ortalama 20 mm kalınlıkta ve düşük tolerans aralığında ($\pm 0,5$ mm) üretilmiş olup yüzey kalitesi

açısından oldukça homojen ve düzgün bir yapı sunmuştur. Bu sistemde kesim esnasında oluşan titreşimler minimum seviyede tutulduğu için levha yüzeylerinde kalibrasyon-silme-cilalama gibi ikincil işlem süreleri önemli ölçüde azalmıştır. Öte yandan, katarak sistemiyle yapılan kesimlerde ise levha kalınlıkları taş türüne bağlı olarak değişmekte, kalınlık toleransları ise $\pm 1,5$ mm seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Ayrıca, katarakla gerçekleştirilen kesimlerde daha fazla titreşim olduğundan, levha yüzeylerinde dalgalanma, yüzey bozulması ve yüksek kalibrasyon ihtiyacı daha sık gözlemlenmektedir. Bu yönüyle multiwire sistem, hem kalınlık hassasiyeti hem de yüzey düzgünlüğü açısından geleneksel kesim yöntemlerine kıyasla belirgin bir üstünlük sunmaktadır. Şekil 3 katarak yüzey kalitesi ve tel ile kesim yüzey kalitesi gösterilmiştir.



Şekil 3. a. Katarak kesim yüzeyi b. çok telli kesim yüzeyi

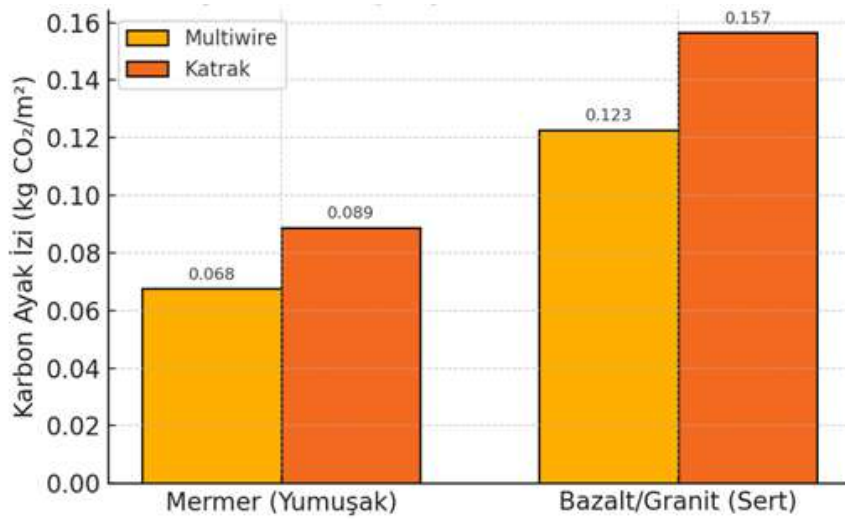
Magmatik kökenli taş grubu olan granit, bazalt, diyabaz gibi yüksek sertlik ve aşındırıcılık özelliğine sahip malzemeler, geleneksel olarak çelik granüllü katarak makineleri ile kesilmektedir. Ancak bu sistemlerde birim kesim hızları oldukça düşüktür ve kesim süresi boyunca oluşan yoğun titreşim ve düzensiz yüklenmeler nedeniyle levhalarda ciddi yüzey bozulmaları, dalgalanmalar ve kalibrasyon ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, yüksek dirençli bu taş türlerinde çelik granüllerin kesim performansı sınırlı kaldığı için enerji tüketimi artmakta, işçilik süresi uzamakta ve verimlilik ciddi ölçüde azalmaktadır. Bu çalışmada çok telli kesim sistemiyle yapılan uygulamalarda ise, elmas boncuklu telin yüksek sertlikteki taşlarla temasında dahi stabil kesim hızı, düşük titreşim ve homojen yüzey kalitesi elde edilmiştir. Özellikle bazalt ve granit gibi taş türlerinde çok telli sistemin, geleneksel çelik granüllü kataraklara kıyasla daha yüksek kesim hızı, daha düşük yüzey toleransı ve daha düşük maliyet sunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, multiwire teknolojisinin sadece mermer grubu değil, aynı zamanda magmatik taşlar için de ileri düzey bir kesim çözümü olduğunu göstermektedir.

Gerçekleştirilen kesim uygulamaları sonucunda, plastik kaplı elmaslı tel sisteminin birim yüzey başına maliyeti de taşın aşındırıcılığına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Kireçtaşı ve hakiki mermer grubu gibi görece yumuşak ve aşındırıcı olmayan taş türlerinde, tel sarfiyatı ortalama $0,60 \text{ €/m}^2$ düzeyinde gerçekleşmiştir. Öte yandan, diyabaz, granit, bazalt gibi yüksek aşındırıcılığa sahip magmatik kökenli taş türlerinde ise bu değer $2,00 \text{ €/m}^2$ seviyelerine kadar çıkmaktadır. Bu farklılık, tel ömrü üzerindeki etkiyle doğrudan ilişkili olup sistem tasarımında taş türüne göre optimizasyon yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Elektrik tüketimi açısından değerlendirildiğinde, kireçtaşı ve hakiki mermer gibi görece yumuşak gruplarda ortalama $0,16 \text{ €/m}^2$, sert ve aşındırıcı magmatik kökenli taşlarda ise yaklaşık $0,29 \text{ €/m}^2$ maliyet ortaya çıkmıştır. Bu fark, kesim sırasında uygulanan ilerleme hızları, soğutma ihtiyacı ve toplam enerji tüketimi gibi süreç parametrelerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, çok telli kesim sistemiyle elde edilen yüksek üretim kapasitesi, blok başına alınan levha sayısını ve toplam üretim hızını artırdığı için, birim ürün başına düşen işçilik maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Geleneksel katrak yöntemine kıyasla daha kısa sürede daha fazla ürün elde edilmesi, işletme açısından hem zaman hem de emek verimliliği sağlamaktadır. Bu yönüyle multiwire sistem, yalnızca teknik değil aynı zamanda operasyonel ve ekonomik anlamda da avantaj sunmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan 4,3 mm çapındaki multiwire sistemin çevresel etkileri, enerji tüketimi üzerinden hesaplanan karbon ayak izi (CO_2 emisyonu) ile değerlendirilmiştir. Türkiye elektrik şebekesi için önerilen ortalama emisyon faktörü $0,423 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ olarak alınmıştır (Kaynak: IEA, 2022). Bu doğrultuda, kesim işlemi sırasında birim yüzey başına tüketilen elektrik miktarına göre CO_2 emisyonları aşağıda hesaplanmıştır: Mermer (ör. Akhisar Bej, Bilecik Bej): Ortalama enerji tüketimi $\approx 0,16 \text{ kWh/m}^2$, Karbon ayak izi $\approx 0,068 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ Bazalt ve granit gibi sert taşlar: Ortalama enerji tüketimi $\approx 0,29 \text{ kWh/m}^2$ Karbon ayak izi $\approx 0,123 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ Geleneksel katrak makinelerinde ise aynı taş türleri için ortalama enerji tüketimi $0,21\text{--}0,37 \text{ kWh/m}^2$ aralığında değişmekte ve bu da $0,089\text{--}0,157 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ seviyelerinde karbon salımına yol açmaktadır. Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, multiwire sistemle yapılan kesimlerde karbon ayak izinde ortalama %20–25 oranında bir azalma sağlandığı görülmektedir. Bu azalma, hem daha düşük enerji tüketimi hem de daha kısa kesim süresine bağlı olarak ortaya çıkmakta; doğaltaş sektöründe çevresel sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sunmaktadır.

Çizelge 2. multiwire ve katrak sistemlerinin karbon ayak izi karşılaştırması.



Katrak sisteminde yapılan kesimlerde, özellikle blokların zamanla aşınmış lamaların darbesiyle çatlama, kenar kırılması veya istenmeyen iç yapı kusurlarının açığa çıkması gibi nedenlerle fire oranının yüksek seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu sistemde, blok ölçüsü küçük ya da büyük olsun, kesim parametreleri sabit olduğundan ani yüklenmeler ve dalgalı kesim hatları meydana gelmekte, bu da blok bütünlüğünü olumsuz etkilemektedir. Nitekim deneysel veriler doğrultusunda, katrak kesiminde fire oranı %3–5 aralığında gerçekleşmiştir. Buna karşılık, çok telli (multiwire) sistemle yapılan kesimlerde ise telin düzgün inişi, düşük titreşimle çalışan yapısı ve hassas gergi sistemi sayesinde blok bütünlüğü yüksek oranda korunmuştur. Deney süresince kesilen 200 adet blokta herhangi bir yapısal fire oluşmamış ve levha çıkışında ise kırık, çatlak ya da yüzey bozulmasına rastlanmamıştır. Bu durum,

multiwire teknolojisinin hem blok değerlendirme oranını artırdığını hem de fire kaynaklı ekonomik kayıpların önüne geçtiğini ortaya koymaktadır.

SONUÇLAR

Bu kapsamlı bulgular ve analizler ışığında çalışmanın genel sonuçlarını madde madde şu şekilde özetlenmiştir.

1. Kesim Verimliliği Açısından Üstünlük: 4,3 mm çapındaki çok telli kesim sistemi, ortalama 1,68 m²/s kesim hızı ile farklı sertlikteki taşlarda yüksek verimlilik sağlamış; özellikle görece yumuşak taşlarda bu hız 3,60 m²/s'ye kadar çıkmıştır.
2. Kalınlık Hassasiyeti ve Yüzey Kalitesi: Multiwire sistemiyle üretilen levhalar $\pm 0,5$ mm toleransla ve yüksek yüzey düzgünlüğüyle elde edilirken, elmas soketli katrik kesimlerinde bu değer $\pm 1,5$ mm'ye kadar çıkmakta ve yüzeyde bozulmalar gözlemlenmektedir.
3. Ekonomik Maliyet Avantajı: Multiwire sisteminde mermer gibi yumuşak taşlar için tel maliyeti 0,60 €/m², elektrik tüketimi ise 0,16 €/m² olarak gerçekleşmiş, bu da toplam üretim maliyetinde elmas soketli katrik makinelerine göre belirgin düşüş sağlamıştır.
4. Fire Oranlarının Karşılaştırması: Elmas soketli katrik makinelerindeki kesimlerde %3–5 seviyesinde fire oluşurken, multiwire sistemle kesilen 200 blokta hiçbir yapısal fire tespit edilmemiştir; bu da ekonomik kayıpların önüne geçilmesini sağlamıştır.
5. Multiwire sistemiyle yapılan kesimlerde, birim yüzey başına düşen elektrik tüketimi mermer gibi yumuşak taşlarda ortalama 0,16 kWh/m², bazalt ve granit gibi sert taşlarda ise 0,29 kWh/m² olarak gerçekleşmiştir. Türkiye elektrik şebekesi için geçerli 0,423 kg CO₂/kWh emisyon faktörü esas alınarak yapılan hesaplamalara göre, multiwire sistemin karbon ayak izi mermer kesiminde yaklaşık 0,068 kg CO₂/m², sert taş kesimlerinde ise 0,123 kg CO₂/m² seviyesindedir. Geleneksel katrik sistemine kıyasla %20–25 oranında daha düşük karbon salımı sağlaması, sistemin çevresel sürdürülebilirliğe olan katkısını ortaya koymaktadır.
6. İşçilik ve Üretim Süresi Etkisi: Aynı sürede daha fazla levha üretilebilmesi ve sistemin daha az kalibrasyon ihtiyacı duyması nedeniyle, multiwire teknolojisi işçilik süresini azaltarak üretim akışını daha verimli hâle getirmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine olanak sağlayan, tüm teknik ve operasyonel imkânları sunan HARTEK Kesme Teknolojileri Ltd. Şti. Genel Müdürü Sayın Zafer HARMANDAL'a ve deneysel uygulamaların sahada yürütülmesi sürecinde desteklerini esirgemeyen HARTAS Mermer Sanayi A.Ş. yönetimine ve çalışanlarına içten teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Ashurst, J., Dimes, F. G. (1998). Conservation of Building and Decorative Stone. Butterworth-Heinemann.

Bonetto, R., Gattamelata, D. (2021). Advanced wire sawing technologies for marble and granite. Stone Industry Technology Review, 19(1), 23–29.

Demirtaş, A. (2022). Türkiye doğaltaş sektörü ve bölgesel rekabet analizi. Madencilik Türkiye Dergisi, (111).

Dursun, A., Arslan, M. (2019). Doğaltaş kesiminde çok telli elmas tel kullanımının enerji tüketimine etkisi. Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, 7(2), 105–112.

Ersoy, A., Atıcı, U. (2005). Diamond wire cutting performance in natural stone quarries: a review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(3), 378–387.

Gültekin, A. H. (2019). Denizli bölgesi travertenlerinin jeolojik özellikleri ve kullanım alanları. *Mühendislik Jeolojisi Dergisi*, 23(3), 80–94.

Günay, Y. (2023). Doğaltaş sektör raporu. Türkiye Mermer Doğaltaş ve Makinaları Üreticileri Birliği (TÜMMER).

İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birlikleri (İMİB). (2023). Doğaltaş sektör analizi.

Karakaya, M., Yüzer, E. (2020). Afyonkarahisar mermer yataklarının jeolojik özellikleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 63(2), 145–160.

Karakurt, I., Aydın, G. (2020). Energy efficiency assessment in multiwire sawing systems. *Sustainable Manufacturing Review*, 4(1), 41–48.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). (2021). Türkiye doğaltaş potansiyeli raporu.

Singh, M., Sharma, R., Jain, N. (2017). Development and performance analysis of diamond bead wires for granite cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 247, 54–61.

Türkiye İhracatçılar Meclisi (TİM). (2023). Doğaltaş ürünlerinin katma değerli ihracat potansiyeli raporu.

Tuncer, B. (2020). Çok telli elmas kesme teknolojisinin doğaltaş üretimine etkisi. *Mermer Teknolojileri Sempozyumu Bildirileri* (ss. 45–52).

Zhang, Q., Lin, W. (2022). Analysis of thin wire diamond cutting efficiency on natural stone. *Journal of Cleaner Production*, 331, 129954.

DOĞALTAŞ OCAKLARINDA ELMAS TELLİ KESME HIZI, DELİCİ DELME HIZI VE KAYAÇLARIN BAZI MEKANİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN DIAMOND WIRE CUTTING RATE, DRILLING RATE AND SOME MECHANICAL PROPERTIES OF ROCKS IN NATURAL STONE QUARRIES

Y. Özçelik, E. Yılmazkaya *, Y. Entok

** Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06800*

ÖZ

Elmas tel kesme makineleri (ETKM) ve delici makineler doğaltaş ocaklarının vazgeçilmez parçalarıdır ve blok doğaltaş üretiminde birlikte kullanılırlar. ETKM'ler mermer, kireçtaşı, traverten, vb. doğaltaş ocaklarında blok üretimi için yaygın olarak kullanılan makinelerdir. Kesme işleminden önce, elmas telin doğaltaşın etrafından geçmesi için delici makineler kullanılarak bir kanal (elmas telin geçmesi için dikey ve yatay delikler) açılır. Bu nedenle, delme işleminin elmas tel kesiminin ilk adımı olduğu söylenebilir. Yüksek delme ve kesme oranlarını yakalamak, yüksek miktarlarda blok üretebilmek için önemlidir, bu değerler kayaç özelliklerinden ve kayacın yapısından büyük ölçüde etkilenir. Ocaklarda ortalama kesme hızı (OKH), ortalama delme hızı (ODH) ve kayaç özellikleri arasındaki ilişkileri araştırmak için Türkiye'deki 11 farklı taş ocağı ziyaret edilmiş ve ocaklarda yapılan analizlerle OKH ve ODH değerleri ölçülmüştür. Sahadan alınan örnekler Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarına getirilmiş, kayaçların bazı fiziksel ve mekanik kaya özellikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, farklı kayaçlar için OKH ve ODH arasındaki ilişkiler ortaya koyulmuştur. Ayrıca, kesme ve delme hızları ile kaya örneklerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri arasında ilişkiler bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elmas telli kesme, Delme, Kesme Hızı, Kayaç Özellikleri.

ABSTRACT

Diamond wire cutting machines (DRCMs) and drilling machines are indispensable parts of natural stone quarries and are used together to produce natural stone blocks. DRCMs are widely used for block production in natural stone quarries such as marble, limestone, travertine, etc. Before cutting, a channel (vertical and horizontal holes for the diamond wire to pass through) is drilled using drilling machines to allow the diamond wire to pass around the natural stone. Therefore, it can be said that drilling is the first step in diamond wire cutting. Achieving high drilling and cutting rates is important to be able to produce large quantities of blocks, which are greatly influenced by rock properties and rock structure. In order to investigate the relationship between average cutting rate (ACR), average drilling rate (ADR) and rock properties, 11 different quarries in Turkey were visited and ACR and ADR values were measured by analyzing the quarries. Field samples were taken to the Rock Mechanics Laboratory of Hacettepe University, Department of Mining Engineering and some physical and mechanical rock properties of the rocks were determined. As a result, the relationships between ACR and ADR for different rocks were revealed. Also, relationships between cutting and drilling rates and some physical and mechanical properties of rock samples were found.

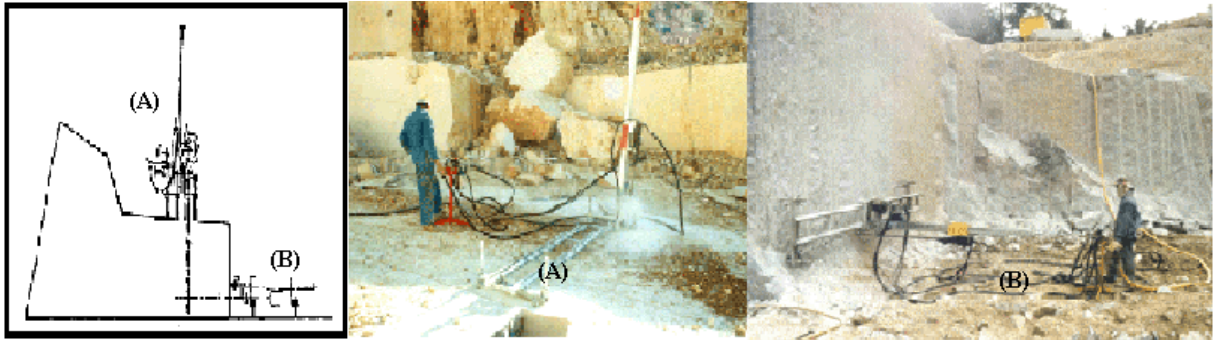
Keywords: Diamond wire cutting, drilling, cutting rate, rock properties.

GİRİŞ

Doğaltaş ocaklarında blokların çıkarılması için kullanılan elmas telli kesme makinaları ve kesim işlemine hazırlıkta kullanılan delici makinalar doğaltaş ocaklarının önemli parçalarıdır. Elmas telli kesme yöntemi, doğaltaş ocaklarında blok üretiminden nihai ürüne kadar olan birçok aşamadaki makinelerde kullanılan vazgeçilmez ekipmanlardır. Doğaltaş ocaklarının %90'ından fazlasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem, kullanıcıların talepleri doğrultusunda geçmişten günümüze kadar sürekli gelişim göstermiştir. Elmas telli kesme makinelerinin ocaklarda kullanımının yaygınlaşması, doğaltaş madenciliğinde yeni bir dönem açmıştır (Özçelik vd., 2007).

Elmas telli kesme işleminde kesme performansına etki eden parametrelerle ilgili araştırmacılar tarafından bugüne kadar birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, elmas boncuğun aşınmasının, motor gücü ve tel hızının, telin yapısının, kesilecek mermer bloğun boyutlarının, kesim esnasındaki kesme geometrisinin, boncuk yapısının; kayaç özellikleri ve kesme performansı parametreleri üzerine etkileri araştırılmıştır (Berry, 1989; Capuzzi, 1989; Wright, 1992; Biasco, 1993; Cook and Smith, 1993; Ozcelik, 1999; Ozcelik et al., 2002; Ozcelik et al., 2004; Ozcelik and Bayram, 2004; Ozcelik, 2005).

Elmas telli kesme yönteminde kesim doğrultusuna göre birbirleri ile irtibatlı yatay ve dikey deliklerin delinip bir kanal açılması gerekmektedir (Şekil 1). Delici makinalar yardımıyla deliklerin delinmesi sonrasında açılan bu kanaldan elmas tel geçirilir ve kesme işlemine başlanılabilir. Bu ise motor güçleri 7,5-25 kW arasında değişebilen delici makinalar yardımıyla mümkün olmaktadır. Delme makinası delik delinecek nokta saptandıktan sonra o noktaya getirilir. Tam dikey olacak konuma (yatay ile tam 90°'lik açı) getirildikten sonra dört tarafından özel ve üzerinde ayarlanabilir aparatlar bulunan (çektirme) zincirler yardımı ile yere sağlamca sabitlenir. Bu sabitleme işlemlerinde kaya kütlesi içine çakılan özel kamalar kullanılmaktadır. Bu kamalar delik açılacak kayaya çakılır ve sağlamlaştırılır. Genellikle açılan bu deliklerin çapı 9 cm'dir. Bu sistemde önce düşey delik delinir, daha sonra yatay delikler bu deliğe hizalanır (Şekil 1). Doğaltaş ocaklarında yaygın olarak kullanılan tipik bir delme makinası Şekil 2'de görülmektedir (Kulaksız, 2005).



Şekil 1. Düşey ve yatay deliklerin delinmesi (A: düşey delik; B: yatay delik)

Kullanılan delik delme makinaları döner/darbe hareketli, pnömatrik veya hidrolik sistemle çalışmaktadır. Dönerli sistem daha ucuz olup su ile çalışmakta ve delme hızı da düşük olmaktadır (1-2 m/saat). Darbeli sistem basınçlı hava ile çalışmaktadır. Dönerli sistemden daha pahalı olmasına karşın delme hızı yüksektir (8-10 m/saat). Bu tür delicilerde, delik delme işlemi sırasında sapma olmaması, özellikle uzun deliklerde büyük avantaj sağlamaktadır. Dönerli sistemlerde karotiyer eklenip, delici uç

elmas kron ile değiştirilerek hem delme hızı artırılır (3-6 m/saat) hem de karotlu sıg sondaj yapılabilir (Urhan ve Şişman, 1992).



Şekil 2. Doğaltaş ocaklarında kullanılan tipik bir delme makinası ve tabancası

Delik delme makinası ile delinen iki deliğin çakışmasını sağlamak için, lazer, teodolit, su terazisi ve bar-şakul gibi çeşitli yardımcı aletler kullanılır. Ancak ülkemizde genellikle gerek ucuz gerekse ocakta pratik olarak kullanılması nedeniyle şakul kullanılmaktadır. Buna göre açılmış dikey delikten, açılacak yatay delik noktasına doğru, kesim yüzeyinin üst kısmından gergin bir ip çekilir. Bu ipin üst kesiminden bir veya iki şakullü ip sarkıtılarak yatay delik noktası bulunmuş olur. Her iki deliğin dik olması telli kesme çalışmalarını kolaylaştırır.

Delinebilirlik, kayanın delinebilme kolaylığı olarak tanımlanmakta ve kayaç dayanımı ve kırılabilirlik gibi çeşitli kaya özelliklerine bağlıdır. Yenice vd. (2009) çalışmalarında, mermerlerin sondaj hızı indeksi (DRI) ile fiziksel, mekanik ve dokusal özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiş ve UCS ile çekme dayanımının delinebilirlik üzerinde güçlü etkileri olduğu belirlenmiştir (Yenice et al., 2009; Yetkin et al., 2016). Ayrıca, Demirdağ vd. (2014), Türk mermer ocaklarında yapılan deneylerle sondaj hızlarının yönelime bağlı olarak önemli ölçülerde değiştiğini ve dikey sondajın mekanik özelliklerle yatay sondajdan daha güçlü korelasyonlar gösterdiğini ortaya koymuştur (Demirdağ et al., 2014). Bunun yanı sıra, porozite ve birim hacim ağırlığı gibi fiziksel parametrelerin de delinebilirlik performansı üzerinde belirgin etkileri olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, yüksek porozite değerleri genellikle daha kolay delinebilirliği sağlarken, düşük birim hacim ağırlıkları bu eğilimi desteklemiştir. Kaya dokusu ve bileşiminin mekanik performans üzerindeki etkisi birçok çalışma ile ortaya konmuştur. Howarth ve Rowlands (1987), kaya dokusunu niceliksel olarak değerlendirmek amacıyla bir doku katsayısı geliştirmiş ve bu katsayının delinebilirlik ve dayanım özellikleriyle yüksek korelasyon gösterdiğini belirlemiştir (Howarth and Rowlands, 1987). Çalışmada, tane şekli, boyutu, oryantasyonu, tane iç içe geçme derecesi ve matris-dane oranı gibi parametrelerin kaya dayanımı ve delinebilirlik üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle, yüksek doku katsayısına sahip kayaçların delinebilirliğinin daha düşük olduğu ve delinebilmesi için daha fazla enerji gerektiği ortaya konmuştur.

Literatürdeki çalışmaların hiçbirinde delme ve kesme hızı arasındaki ilişkilerin incelenmesi yapılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada, doğaltaş ocaklarında elmas telli kesme yönteminde elmas telin blok etrafından geçirilmesi için açılan deliğin delme hızı değerleriyle blok kesimindeki kesme hızı değerleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi ve farklı kayaçlar için ortalama kesme hızı ve ortalama delme hızı arasındaki ilişkilerin ortaya konulması amaçlanmıştır. Ayrıca, kesme ve delme hızları ile kayaç örneklerinin bazı mekanik özellikleri arasında ilişkiler incelenmiştir.

YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çalışmada doğaltaş ocaklarında elmas telli kesme makinasıyla gerçekleştirilen kesimler incelenmiş ve kesim hazırlığında yapılan delme işlemleri takip edilmiştir. Ocaklarda kullanılan delme ve kesme makineleri benzer özelliklerdeki makinelerden seçilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, doğaltaşların bazı fiziko-mekanik özellikleri belirlenmiştir. Doğaltaşlardan alınan numuneler üzerinde Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarında ISRM (1981) standartlarına uygun olarak deneyler yapılmıştır. Kullanılan doğaltaşlara ait bazı mekanik özellikler ve ortalama kesme ve delme hızı değerleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışma kapsamındaki doğaltaşların mekanik özellikleri, ortalama kesme ve delme hızları

Kayaç Tipi	TEBD (MPa)	DD (MPa)	ED (MPa)	ÇD (MPa)	ODH (m/s)	OKH (m ² /s)
Rustik Yeşil Mermer	142,6	1,0	16,7	7,6	5,11	3,74
Diana Rosa	91,6	0,3	13,8	7,3	6,10	6,01
Marmara Beyaz	86,9	0,7	18,4	6,7	6,32	7,87
Eğirdir Bej	84,8	0,9	18,6	9,4	6,97	6,65
Burdur Bej	116,3	1,1	13,5	8,7	5,2	4,83
Bilecik Bej	99,1	1,0	30,8	5,4	6,26	6,18
Emperador Dark	125,7	1,2	14,4	4,7	6,26	7,70
Marmara Mermer	70,6	0,5	22,8	5,7	7,18	7,48
Burdur Karaçal	82,8	0,8	11,6	4,3	6,94	7,5
Dolomit	109,3	1,3	22,1	6,7	6,23	5,28
Light Bej	100,0	0,3	7,9	5,7	6,32	6,85

TEBD: Tek Eksenli Basınç Dayanımı; DD: Darbe Dayanımı; ED: Eğilme Dayanımı; ÇD: Dolaylı Çekme Dayanımı; ODH: Ortalama Delme Hızı; OKH: Ortalama Kesme Hızı.

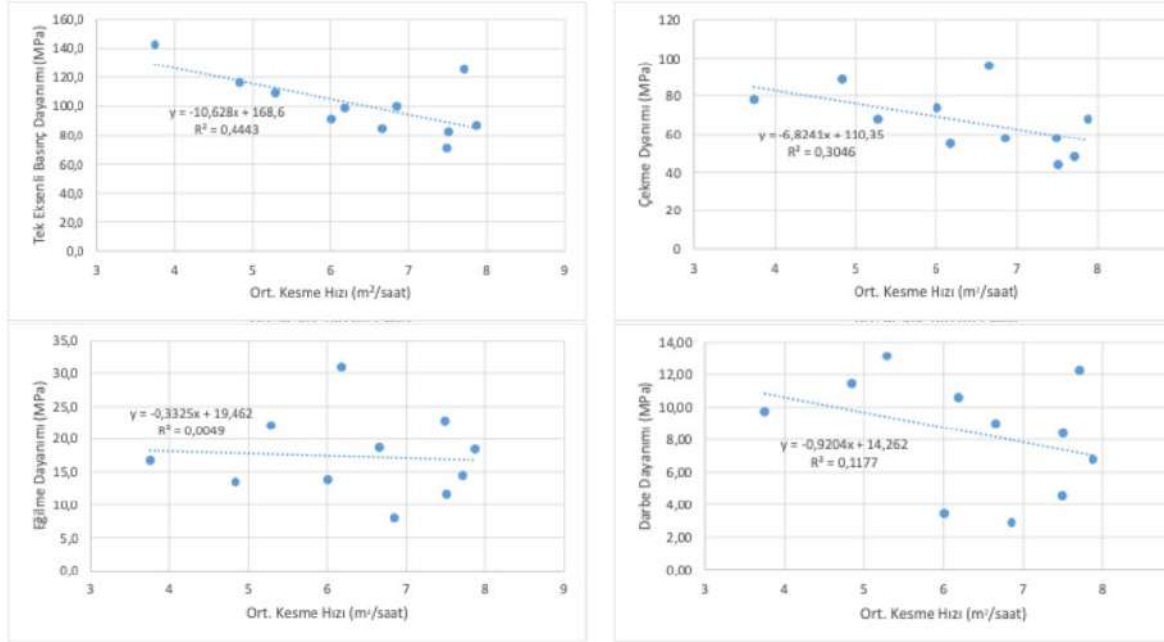
VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ortalama Kesme Hızı – Kayaç Mekanik Özellikleri İlişkileri

Doğaltaş ocaklarında yapılan kesimlerde elde edilen ortalama kesme hızları ve kesilen kayaçların mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler Şekil 3’te sunulmuştur.

Şekil 3 incelendiğinde tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerleri ile ortalama kesme hızı değerleri arasında ters bir ilişki olduğu görülmektedir. Buna göre, kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerleri arttığında elmas telli kesme hızı değerlerinin düştüğü görülmektedir. Eğilme dayanımı ve darbe dayanımı değerleri ile ortalama kesme hızı değerleri arasında

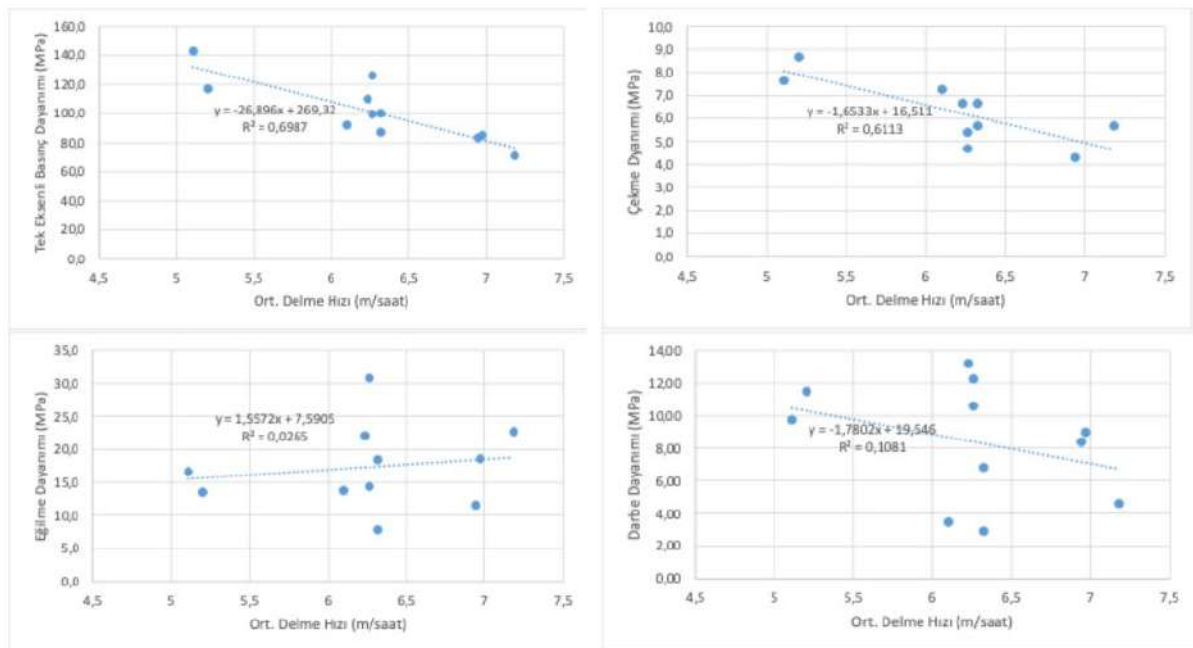
net olmamakla birlikte benzer bir ilişki olduğu görülebilmektedir. Eğilme dayanımı ve darbe dayanımı değerleri arttığında kesme hızı değerlerinin azalma eğiliminde olduğu söylenebilir.



Şekil 3. Ortalama kesme hızı ile kayaçların bazı mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler

Ortalama Delme Hızı-Kayaç Mekanik Özellikleri İlişkileri

Doğaltaş ocaklarında kesim hazırlığında yapılan delme işlemlerindeki ortalama delme hızları ve delinen kayaçların mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler Şekil 4'te gösterilmiştir.

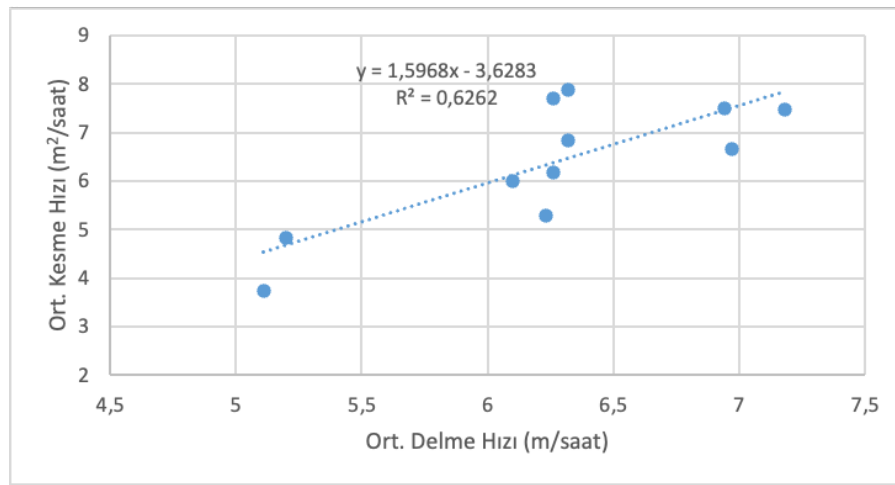


Şekil 4. Ortalama delme hızı ile kayaçların bazı mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler

Şekil 4 incelendiğinde tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerleri ile ortalama delme hızı değerleri arasında ters bir ilişki olduğu görülmektedir. Buna göre, kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerleri arttığında delme hızı değerlerinin düştüğü görülmektedir. Darbe dayanımı değerleri ile ortalama delme hızı değerleri arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır, ancak darbe dayanımı değerlerinin azalmasıyla delme hızı değerlerinin artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Eğilme dayanımı değerleri ile delme hızı değerleri arasında da anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir.

Ortalama Kesme Hızı – Ortalama Delme Hızı İlişkisi

Doğaltaş ocaklarında yapılan kesimlerde elde edilen ortalama kesme hızları ve kesim hazırlığında yapılan delme işlemlerindeki ortalama delme hızları arasındaki ilişki Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Ortalama delme hızı ile ortalama kesme hızı arasındaki ilişki

Ortalama delme hızı ve ortalama kesme hızı değerleri arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR

Doğaltaş ocaklarında elmas telli kesme hızı, delicilerin ortalama delme hızı ve kayaç mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri araştırmak için gerçekleştirilen bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerleri ile ortalama kesme hızı değerleri arasında ters bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerleri arttığında elmas telli kesme hızı değerlerinin düştüğü belirlenmiştir.
2. Tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerleri ile ortalama delme hızı değerleri arasında ters bir ilişki olduğu, kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerleri arttığında delme hızı değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir.
3. Anlamlı bir ilişki bulunmamakla birlikte; eğilme dayanımı ve darbe dayanımı değerleri arttığında kesme hızı değerlerinin azalma eğiliminde olduğu söylenebilir.
4. Darbe dayanımı değeri azaldığında delme hızı değerlerinin artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.

5. İncelenen bu 11 doğaltaş örneğinde; ortalama delme hızı ve ortalama kesme hızı değerleri arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Sonraki çalışmalarda; araştırmanın daha çok sayıda doğaltaş örneği kullanılarak daha kapsamlı hale getirilmesi, kayaçların fiziksel özelliklerindeki değişimlerin kesme ve delme hızına etkilerinin araştırılması önerilebilir.

KAYNAKLAR

Berry, P. (1989). Optimum use of diamond wire equipment in stone quarrying. *21st APCOM* (pp. 351–365). Las Vegas.

Biasco, G. (1993). Diamond Wire for Quarrying Hard Rocks. *Industrial Diamond Review*, (5), 252–255.

Cappuzi, Q. (1989). Diamond Wire Cutting Technology in Granite Quarry. *ACIMM for Marble*, 24, 24.

Cook, M., Smith, B. A. (1993). A Study of Diamond Wire Bead Rotation. *Industrial Diamond Review*, (2), 79–81.

Demirdağ, S., Sengun, N., Uğur, İ., Efe, T., Akbay, D., Altındağ, R. (2014). Variation of Vertical and Horizontal Drilling Rates Depending on Some Rock Properties in the Marble Quarries. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(2), 269–273.

Howarth, D. F., Rowlands, J. C. (1987). Quantitative Assessment of Rock Texture and Correlation with Drillability and Strength Properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20(1), 57–85.

ISRM. (1981). Rock characterization testing and monitoring; suggested methods. Oxford.

Kulaksız, S. (2005). Doğaltaş (mermer) maden işletmeciliği ve işleme teknolojileri. TMMOB Maden Mühendisleri Odası.

Özcelik, Y. (1999). Mermercilikte Elmas Tel Kesme Makinalarının Çalışma Koşullarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özcelik, Y., Kulaksız, S., & Çetin, M. C. (2002). Assessment of the Wearing on Diamond Beads in the Cutting of Different Rock Types by the Ridge Regression. *Journal of Materials Processing Technology*, 127(3), 392–400.

Özcelik, Y., Bayram, F. (2004). Optical Investigations of Bead Wear in Diamond Wire Cutting. *Industrial Diamond Review*, 64, 60–65.

Özcelik, Y. (2005). Effect of Mineralogical and Petrographical Properties of Marble on Cutting by Diamond Wire. *CIM Bulletin*, 98 (1085), 1–6.

Özcelik, Y. (2005). Optimum working conditions of diamond wire cutting machines in marble industry. *Industrial Diamond Review*, 65, 58–64.

Urhan, S., Şişman, N. (1992). Blok Mermer Üretiminde Kullanılan Tel Kesme Yönteminin Gelişim ve Önemi. *Madencilik Dergisi*, 31(2), 35–39.

Wright, N. D. (1992, Ekim). Marble and Granite Quarries Turn to Diamond Wire. Stone World, 77–80.

Yenice, H., Özfırat, M. K., Kahraman, B., Özdoğan, M. V. (2009). Examination of Drilling Rate Index DRI of Rocks. 3rd Balkan Mining Congress.

Yetkin, M. E., Özfırat, M. K., Yenice, H., Simsir, F., Kahraman, B. (2016). Examining the relation between rock mass cuttability index and rock drilling properties. Journal Of African Earth Sciences, 124, 151–158.

ADVANCEMENTS IN MARBLE SLAB PROCESSING: *FULLY INTEGRATED RESIN AND POLISHING LINES*

C. Kılınç^{1*}, N. Atar²

¹*Breton Makine, Denizli, Türkiye*

²*Pamukkale University, Chemical Engineering Department*

**Corresponding author: kilinc.celil@breton.it)*

ABSTRACT

The transformation of natural marble into finished slabs for architectural and decorative applications is a multi-stage process in which structural reinforcement and surface quality are decisive factors of product value. Conventional workflows include cutting, resin treatment, extended storage for resin curing, and polishing. However, the curing stage introduces significant inefficiencies due to long storage times and discontinuous operations. This study identifies the curing stage as the main operational bottleneck and presents the innovative integrated resin and polishing line developed by IonBreton. By combining resin application, accelerated curing, and polishing into a continuous process, this system eliminates intermediate storage requirements and reduces curing times from 16–18 hours at 30 °C to 4–7 hours at 50 °C. The most commonly used epoxy resins in marble reinforcement penetrate pores and micro-cracks due to their low viscosity, enhancing mechanical strength while forming a chemically resistant layer on the surface. Epoxies are typically produced through the reaction of bisphenol-A diglycidyl ether (DGEBA)-based resins with amine hardeners. This reaction involves the opening of epoxide rings and the formation of covalent bonds, resulting in a three-dimensional polymer network. As a result, cured epoxy provides strong adhesion and high durability on marble surfaces. Advantages of epoxy resins include high mechanical strength, chemical resistance, and long service life, while their tendency to yellowing, relatively high cost, and environmental concerns represent the main limitations. In conclusion, the integrated line results in a fully automated, high-efficiency production system that reduces floor space requirements, shortens lead times, and enhances overall stability. This advancement offers both economic and sustainability benefits, marking a significant evolution in marble slab processing.

Keywords: stone processing, integration, epoxy, resin, polishing

INTRODUCTION: CONVENTIONAL PROCESSING WORKFLOW AND RESINS

Cutting, Reinforcement, and Finishing in Marble Processing

The initial and most delicate stage in marble processing is the cutting of raw blocks into slabs of a specified thickness. Modern methodologies employ diamond multi-wire saws, which facilitate high-precision cuts with exceptional speed. This technique ensures superior dimensional accuracy and uniformity across the slab surface, which is fundamental for all subsequent procedures (Pinto et al., 2020). The optimisation of this process allows for the production of slabs as thin as one-centimetre, maximising material yield and minimising waste—a key consideration for sustainable and cost-effective manufacturing. Following the sawing process, slabs frequently undergo resin treatment to enhance their structural integrity and aesthetic value. This involves the application of a polymer resin that penetrates the stone, filling micro-fissures, cracks, and inherent porosity (Demirci et al., 2019). Subsequent to the application of the resin, slabs need to be stored to allow resin polymers to undergo bonding—i.e. polymerisation or curing. This intermediate storage phase introduces logistical

complexities, increases production lead times, and constitutes a notable bottleneck in the production chain. The final stage of marble processing involves honing and polishing, which imparts the desired surface finish, ranging from a matte appearance to a high gloss. These mechanical finishing processes remove any surface imperfections and prepare the slab for its final application.

Epoxy Resins in Marble Reinforcement

Epoxy systems play a critical role in the reinforcement of marble slabs, transforming a naturally porous and fragile stone into a more durable and resilient material. This enhancement begins with the application of a two-component epoxy formulation consisting of a resin and a hardener. The low viscosity of this liquid mixture is essential, as it enables the epoxy to penetrate deeply into the microscopic pores, fissures, and cracks within the marble (May and Tanaka, 2021). Heat treatment in industrial curing towers is often applied to further promote saturation.

Epoxy resins are commonly produced through the controlled polymerization of bisphenol-A (BPA) and epichlorohydrin, yielding bisphenol-A diglycidyl ether (DGEBA)-based resins. These resins are subsequently cross-linked with amine-based hardeners to form a three-dimensional polymer network. This chemical structure imparts epoxy systems with high adhesion strength, thermal resistance, and excellent chemical durability.

On the reverse side of fragile slabs, a fiberglass mesh is often embedded into the epoxy layer to provide significant structural reinforcement. On the top surface, the epoxy acts as a sealant, filling residual voids and creating a smooth, non-porous finish that is more resistant to staining and chemical attack.

The curing process — the critical stage of epoxy reinforcement — involves polymerization, in which the liquid resin solidifies into a robust polymer. Typically, this reaction starts when DGEBA-based epoxy resin is mixed with an amine hardener. The amine groups open the epoxide rings in the resin molecules, generating strong covalent bonds and linking the molecules together (Pascault and Williams, 2010). This process, known as cross-linking, produces a dense three-dimensional network with exceptional rigidity. Adhesion of cured epoxy to marble occurs through two primary mechanisms:

1. Mechanical interlocking, where the hardened epoxy physically grips the stone within its porous structure.
2. Chemical bonding, where hydroxyl (-OH) groups in the cured epoxy form strong hydrogen bonds and secondary interactions with the calcium carbonate (CaCO_3) matrix of marble (Xu et al., 2018).

The application of epoxy resin enhances marble by increasing mechanical strength, reducing fracture susceptibility, improving chemical resistance, optimizing polishing quality, and enhancing aesthetic appearance. For this reason, epoxy has become the most widely used reinforcement material in both high-value decorative applications and external cladding systems.

Polymerisation Kinetics and Process Control

Polymerisation is critically influenced by both time and heat, which act as key drivers of the curing process. The reaction is not instantaneous; it requires a defined duration—the curing time—to reach completion. This period begins with the “pot life”, during which the epoxy remains sufficiently fluid for application. Following application, the resin enters an initial curing phase where it begins to solidify, eventually reaching full cure over hours or days.

Heat serves as an accelerator in this process. By increasing molecular mobility, higher temperatures enable faster cross-linking between resin and hardener, dramatically reducing curing times (Chern and Poehlein, 1978). In industrial marble processing, slabs are frequently passed through ovens or heated chambers to expedite curing, allowing for a more efficient production line. Controlled heating also ensures a uniform and complete cure throughout the slab, optimising mechanical properties. Conversely, lower temperatures slow the reaction and may extend curing times significantly; excessively cold conditions may even prevent a complete cure. The polymerisation reaction is exothermic, generating heat that sustains curing once initiated.

In typical resining operations, slabs are stored in a heat-regulated chamber for 90–160 minutes to initiate polymerisation. They are then transferred to racks or A-frames for the process to continue until a sufficient degree of cure is achieved—typically around 70–80% of full cure, corresponding to a Shore D hardness of approximately 65–75 — which enables safe handling and prevents damage during polishing (Pascualt and Williams, 2010; May and Tanaka, 2021). At this level of cure, the epoxy has developed adequate mechanical strength and surface stability to withstand polishing pressures, while final polymerisation to 100% cure proceeds in the hours that follow under ambient or slightly elevated conditions. While the storage phase can range from 8 to 48 hours, polishing usually commences after approximately 24 hours.

Additional studies on epoxy systems have shown that curing temperature, heating rate, and cross-link density strongly affect the final properties of marble slabs. Higher curing temperatures not only accelerate polymerisation but also promote denser cross-linking, which translates into greater hardness, enhanced chemical resistance, and improved adhesion to the marble matrix. On the other hand, insufficient curing or overly rapid surface polymerisation can leave uncured resin trapped inside, compromising long-term durability and potentially leading to discoloration or reduced mechanical stability. For this reason, the optimisation of epoxy curing kinetics—balancing heat input, reaction time, and resin penetration—is considered one of the most critical parameters in achieving stable and high-quality marble reinforcement.

Effect of Storage Temperature on Curing Time

The curing rate of epoxy resins used in marble reinforcement follows an Arrhenius-type kinetic pattern: as storage chamber temperature increases, the molecular mobility of reactive species improves, accelerating cross-linking and significantly reducing time to target cure levels. However, there is a trade-off—excessive heating ($>70^{\circ}\text{C}$) risks premature surface curing, trapping uncured resin inside, which can compromise long-term performance (Pascualt and Williams, 2010).

Industrial optimisation typically involves post-oven storage temperatures between 25°C and 60°C , balancing speed, resin penetration, and energy costs. At ambient 25°C conditions, time to a polishing-ready state (70–80% cure; Shore D 65–75) can exceed 24 hours. Increasing chamber temperature to 50 – 60°C can reduce this to under 5 hours. Table 1 summarises typical curing time–temperature relationships and corresponding Shore D hardness values for DGEBA–amine epoxy systems in marble slab processing.

PROBLEM AND SOLUTION; AN EXTRA TOWER FOR A CONTINUOUS LINE

A major operational inefficiency within conventional slab processing arises from the resin curing stage. In order for polymerisation to occur, slabs must undergo extended storage, frequently under controlled thermal conditions (May, 1988; Ellis, 1993). This necessitates their removal from the production line and results in a discontinuous, batch-based workflow. To mitigate this limitation, IonBreton has developed a fully integrated resin and polishing line that consolidates resin application, curing, and polishing into a single, continuous process. The integration of accelerated curing

technology within the line eliminates the requirement for intermediate storage. Consequently, slabs can transition directly from resin treatment to polishing without interruption. A further advantage of the continuous configuration is the scope for higher levels of automation, including automated resin-spraying systems (e.g., IonBreton's Resinbot) and automatic netting units (Breton, 2025).

In most industrial plant designs, once the second surface of the slabs (front/upper face) has been treated, slabs are unloaded by cranes or robotic systems into storage frames. They remain there until the epoxy has hardened sufficiently to allow safe processing in polishing machinery. Table 1 presents typical curing times required to achieve a hardness level corresponding to approximately 70–80% cure, enabling polishing. Under standard conditions, many slabs require a minimum of 16–18 hours at 30 °C before polishing can commence. At lower ambient temperatures, particularly below 0 °C in winter, curing times increase further, resulting in greater storage requirements and more complex shop-floor logistics (May, 1988; ASTM, 2025).

Conventional marble processing typically employs tower-based curing systems. One-, two-, or three-tower configurations are widely used. Moreover, recent practice in newly commissioned factories is to adopt four-tower systems, incorporating a honing machine at the midpoint of the line. This intermediate honing operation improves surface uniformity, particularly in slabs with extensive cracking, thereby improving resin penetration and subsequent processing quality (Petrie, 2006). Figure 1 illustrates representative resin plants configurations currently implemented in the industry (two- and three-tower configurations, usually employed as the prevailing layouts for resining). Figure 2 demonstrates the four-tower solutions with the integrated honing operation in recently established factories.

Table 1. Approximate Polymerisation Time vs. Storage Temperature for Marble Slab Epoxy Curing (Hardis et al., 2013)

Storage Temperature	Time to 70-80% Cure (Hours)	Time to Full Cure (Hours)	Shore D Hardness at 70-80% Cure	Industrial Notes
20 °C	24-28	48-72	65-67	Slow cure: risk of production bottleneck
30 °C	16-18	36-48	66-68	Moderate rate: common in naturally warm climates
40 °C	10-12	24-36	67-70	Balanced speed and penetration; energy cost moderate
50 °C	4-7	12-24	68-72	Favoured in controlled heated chambers
60 °C	4-5	12-18	70-73	Rapid cure; requires careful monitoring
70 °C	2-3	8-12	72-75	Very rapid cure; risk of incomplete internal polymerisation

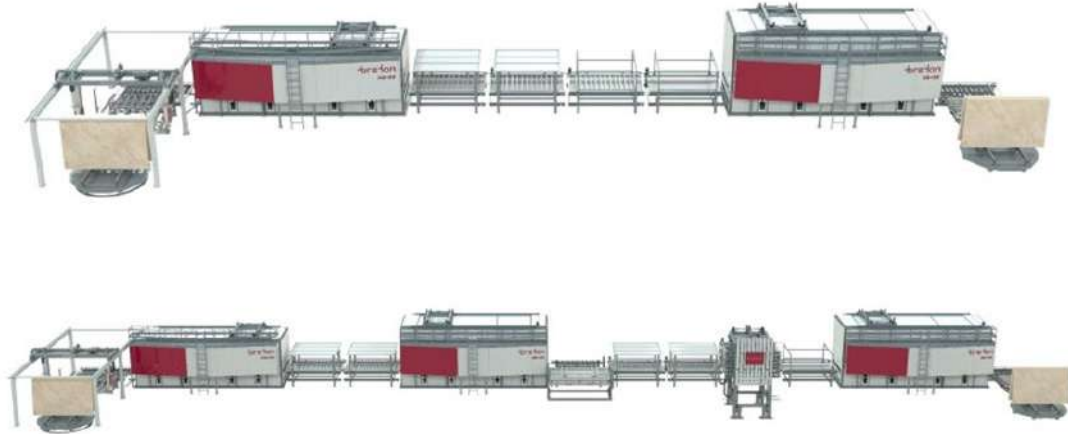


Figure 1. Two- and three-tower resin plants



Figure 2. Four-tower configuration with mid-point honing machine

IonBreton's advanced solution incorporates an additional curing tower, effectively doubling curing oven capacity and increasing residence time under controlled thermal conditions. Elevated curing temperatures within the towers further accelerate the polymerisation process, enabling slabs to achieve sufficient hardness more rapidly (Ellis, 1993; Petrie, 2006). For instance, typical slabs require only 4–7 hours at 50 °C to reach the required hardness level for polishing (Table 1). In IonBreton's system, with the additional curing tower, slabs spend a minimum of 320 minutes within the regulated curing environment. This ensures that adequate hardness is achieved prior to polishing, thereby reducing process variability and enabling a stable, high-throughput workflow (IonBreton, 2025). Figure 3 exemplifies the addition of the extra polymerisation tower to a four-tower line and the direct and continuous transition to the polishing line, making the line a five-oven tower line. The same logic could be applied to two- or three-tower systems.



Figure 3. Integrated resin and polishing lines

CONCLUSION

The application of epoxy resins within this integrated system plays a pivotal role in enhancing marble performance. Owing to their low viscosity and strong adhesion, epoxies penetrate deeply into pores and fissures, significantly increasing both mechanical strength and chemical resistance. Their durable three-dimensional polymer network not only stabilizes fragile slabs but also ensures long-term performance under demanding conditions. Although issues such as yellowing and environmental impact remain, the combination of epoxy resins with advanced continuous processing technologies underscores their indispensable contribution to both efficiency and durability in modern marble production.

The integration of resin treatment and polishing within a single continuous line marks a major advancement in slab processing. The innovative IonBreton system, equipped with an accelerated curing process and an additional oven tower, reduces curing times dramatically—from 16–18 hours at 30 °C to just 4–7 hours at 50 °C. This improvement eliminates the need for intermediate storage, simplifying logistics and freeing valuable floor space. The continuous line also supports a higher degree of automation, incorporating resin-spraying robots and automated netting systems that enhance both consistency and throughput.

The first installation of this system, commissioned at Ensar Marble's Bucak (Burdur) facility in 2023, has been operating successfully without any reported weakening of processed slabs. While direct production costs are broadly comparable to those of traditional lines, the real advantage lies in eliminating the repeated handling of slabs—unloading, storing, and reloading between separate resin and polishing stages. This benefit, although not immediately apparent, becomes significant over time, as the process proves not only more efficient but also more sustainable, shortening production cycles and reducing both labour and energy demand.

By fully integrating resin treatment and polishing, this continuous line sets a new benchmark for the stone-processing industry, offering a compelling model for future facilities and redefining standards of productivity and quality.

REFERENCES

- ASTM. (2025). Standard Guide for Selection of Dimension Stone (ASTM C1528). <https://www.astm.org>
- Breton S.p.A. (2025). Integrated Resin and Polishing Lines: Curing Efficiency and Throughput Optimisation. (Technical Bulletin).
- Chern, R. T., Poehlein, G. W. (1978). Kinetics of Epoxy–Amine Cure Reactions. *Journal of Applied Polymer Science*, 22(8), 2293–2307.
- Demirci, S., Karahan, M., Ateş, H. (2019). Polymer Resin Treatments for Natural Stone Consolidation. *Construction and Building Materials*, 218, 322–334.
- Ellis, B. (1993). *Chemistry and Technology of Epoxy Resins*. Springer Science & Business Media.
- Hardis, R., Jessop, J. L. P., Peters, F. E., Kessler, M. R. (2013). Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 49, 100–108.

- May, C. A. (1988). *Epoxy Resins: Chemistry and Technology*. Marcel Dekker Inc.
- May, C. A., Tanaka, Y. (2021). *Epoxy Resins: Chemistry and Technology* (3rd ed.). CRC Press.
- Pascualt, J. P., Williams, R. J. J. (2010). *Epoxy Polymers: New Materials and Innovations*. Wiley-VCH.
- Petrie, E. M. (2006). *Epoxy Adhesive Formulations*. McGraw-Hill.
- Pinto, S., Martins, M., Rodrigues, H. (2020). Advances in Stone Cutting Technologies. *Journal of Materials Processing Technology*, 285, 116781.
- Xu, X., Li, Y., Li, J. (2018). Chemical Interactions Between Epoxy Resin and Calcium Carbonate Surfaces. *Applied Surface Science*, 427, 539–547.

EFFECTS OF SURFACE HARDNESS ON ABRASION RESISTANCE AND SURFACE ROUGHNESS OF SOME CARBONATE STONES SUBJECTED TO FOOT TRAFFIC

I.S. Büyüksagis*, A. Cakir*, M. Gursay*, J.** Rostami

**Afyon Kocatepe University Mining Engineering Department 03200 Afyonkarahisar/Turkiye*

*** Colorado School of Mines, Mining Engineering Department, Denver, CO/USA*

ABSTRACT

This study investigated the relationship between the surface hardness of some carbonate stones subjected to foot traffic, their abrasion resistance values, and the resulting surface roughness after abrasion to facilitate accurate material selection. It is observed that natural stones used in the flooring of archaeological structures from centuries past have significantly deteriorated due to intense human and material traffic, losing much of their aesthetic appeal. Similarly, modern-day environments with heavy pedestrian traffic, such as airports, train and bus terminals, shopping centres, and city squares, face rapid abrasion of stone pavements, leading to the loss of visual quality and incurring high maintenance, repair, and replacement costs. In the European Union and the United States of America, several standardized abrasion resistance testing methods are available to identify stones with high frictional abrasion resistance from the outset. In this study, the American ASTM C-241 Abrasion Resistance standard test method was conducted on some carbonate stones, followed by surface roughness measurements of the rock samples post-test. Additionally, statistical correlations were examined between the rocks' Knoop Hardness index (HK) values and their abrasion resistance and surface roughness. As a result, strong interrelationships were observed among the Knoop hardness (HK), abrasion resistance, and surface roughness of the tested carbonate rocks.

Keywords: Natural Stones, carbonates, wear resistance, hardness, roughness, standards

1. INTRODUCTION

Natural stones used in the paving and coating of structures provide an aesthetic appearance to the buildings and ensure that the structures are resistant to external atmospheric conditions for many years. In ancient times, people made their homes and landscaping from natural stones. However, with the invention of the wheel, the need to make smooth-surfaced and durable roads arose, and for this purpose, they laid solid and durable natural stones on both the ground in settlements and the roads between settlements, ensuring their longevity. However, especially on grounds with intense human and material circulation and due to the passage of overloaded wheeled vehicles, both the aesthetic appearance of the stone roads has been lost and channels have formed as the surfaces have been worn (Fig.1). The loss of aesthetic appearance and surface smoothness has caused maintenance, repair or replacement to eliminate these problems.

Today, natural stone flooring are generally preferred in residences and places with heavy pedestrian traffic, and many studies are still being conducted to select the most suitable natural stone for long-lasting appearance and durability. In general, the research focuses on predicting the wear that will occur over a certain period and increasing the resistance to atmospheric external environment, pressure and friction by covering the surfaces with chemical materials.



Figure 1. Abrasion and undulating of carbonate stone surface at Istanbul-Hagia Sophia' floors.

In order to determine the resistance of natural stones used for flooring in places with heavy pedestrian traffic, there are standard test methods for "Determination of Abrasion Resistance" in the European Union, EN 14157 (Wide Wheel Wear – Bohme Methods) and in the USA, ASTM C-241 (Horizontal Disk Wear). In the Bohme method and Horizontal Disk Wear method, during the test, a natural stone placed on a hard steel disk is pushed with a certain weight and abrasive powder is continuously left between the steel and the stone surface. The abrasion resistance is determined by considering the mass or volumetric loss of abrasion that occurs on the stone surface in a certain period. Although the Bohme method is not widely used, the Wide Wheel Wear (Capon Disc) method is widely preferred in Europe.

The abrasion resistance values found due to the ASTM C241 (Horizontal Disk Wear) test method are compared with some limit values determined by ASTM for natural stones of different origins. Accordingly, natural stones are classified according to parameters such as being used indoors or outdoors, in light-heavy pedestrian traffic, having a low-medium-high density of stone. It is desired that the abrasion resistance is higher than the limit values.

In the European Union (EN 14157-Wide Wheel Wear, etc.) standards, no limit value is sought; "these values are left to the user's preference according to the place of use". This way, using natural stones in buildings is not prevented by considering only their wear resistance, and some raw material resources are not left idle.

This study investigated parameters such as surface hardness, abrasion resistance (ASTM C241), and surface roughness on carbonate natural stones, which are generally flooring in places with heavy pedestrian traffic. In addition, statistical relationships between these parameters were examined, and some recommendations were made for decision-makers and practitioners in natural stone selection, considering the lower limit according to the ASTM abrasion resistance requirement sought for granites.

2. MATERIALS & METHODS

This section details the samples, experiments, test methods, and tests used. Sixteen different types of carbonate rock samples were used in the experiments.

2. 1. Rock Samples

Within the scope of this study, sampled some different carbonate origin rocks, and their types, origin and locations are given in Table 1.

Table 1. Types, origin and location of sampled Turkish natural stones

Code	Type	Origin	Location
M1	Marble	Metamorphic	Balıkesir
M2	Marble	Metamorphic	Muğla
M3	Marble	Metamorphic	Bursa/M.K Paşa
M4	Marble	Metamorphic	Denizli/Kale
M5	Marble	Metamorphic	Eskişehir
L1	Limestone	Sedimentary	Denizli
L2	Limestone	Sedimentary	Diyarbakır
L3	Limestone	Sedimentary	Konya
L4	Limestone	Sedimentary	Adıyaman
L5	Limestone	Sedimentary	Karaman
L6	Limestone	Sedimentary	Alanya/Kumluca
L7	Limestone	Sedimentary	Burdur/Yeşilova
T1	Travertine	Sedimentary	Denizli
T2	Travertine	Sedimentary	Denizli/Çal
T3	Travertine	Sedimentary	Denizli/Belevi
T4	Travertine	Sedimentary	Karaman

2.2 The Standards of Performed Experiments on Rocks

In this study, the tests and relevant EN-ASTM-ISRM standards performed for the characterization of sampled rocks of carbonate origin are given in Table 2.

Table 2. Used experiments and standards on natural stones

Experiments	Standards
Abrasion Resistance (AR)	ASTM C241
Density (D)	ASTM D5550-06
Porosity (Po)	EN 1936
Knoop Hardness Index (HS)	EN 14205
Roughness	EN ISO 1302
Compressive Strength (UCS)	EN 1926

2.3 Determination of Abrasion Resistance (ASTM C241)

In the experiment, three rock samples of size 50×50×25mm are abraded by 60 mesh white fused alumina abrasive powder falling on the rotating disc. The abrasive disk is set to rotate at 45 rpm on the horizontal axis, and a vertical load of 20 N is applied to each sample. The samples are rotated 225 tours during 5 minutes. The sample weights are measured before and after the test to determine the abrasion resistance. Mass-specific gravity is also determined to determine the abrasion resistance of each sample according to the ASTM C97 standard. The abrasion test device used in the ASTM C241 is given in Figure 2, and Abrasion Resistance (Ha),

$$Ha = \frac{10,95G (2000 + Ws)}{2000Wa} \quad (1)$$

Where;

Ha: Abrasion resistance of each sample (unitless)

G: Specific gravity (g/cm³);

Ws: Mean weight of each sample (original weight + final weight/2) = (W1+W2)/2 (g);

Wa: Loss of weight during abrasion test=W1-W2 (g).



Figure 2. Abrasion test device and parts (ASTM C241)

For the test results conducted according to ASTM-C241 standard, some requirements for natural stones have been standardized by ASTM. There are some limit values (Table.3). These values are expected to be higher than these values by classifying them according to some parameters such as indoor or outdoor use of natural stones, light-heavy pedestrian traffic on the ground, low-medium-high density of the stone.

Table 3. ASTM-Abrasion Resistance requirements for natural stones

TEST	TEST METHOD	ASTM	Requirements				
			ASTM C-629	ASTM C-616	ASTM C503 Marbles	ASTM C568 Limestone	ASTM C1527

		C615- C615M Granites	Slate	Sandstone Quarts			Travertine
Abrasion Resistance (unitless)	ASTM C 241	>25	>8 (Exterior) >8 (Interior)	>2 I (Sandstone) >8 II (Quartzitic Sandstone) >8 III (Quartzite)	>10 (Light Foot Traffic) >12 (Heavy Foot Traffic)	>10 I (low density) >10 II (medium density) >10 III (high density)	>10 (Exterior) >10 (Interior)

2.4. Determination of Roughness of Surface

Natural stones used on the floors of buildings and roads, especially when exposed to heavy pedestrian and vehicle traffic, first lose their aesthetic appearance and polish. Then, with the increase in surface abrasion, roughness, deep abrasions, and undulation structures emerge due to the hardness differences in the layer texture. Depending on the variety of minerals that make up natural stones and their hardness properties, some wear more quickly, and their appearance deteriorates. In contrast, others wear relatively slowly and can maintain their appearance for many years. Some protective surface chemicals are used again at specific intervals to extend this process.

In this study, the roughness values were measured from the surface of the sampled carbonate rock samples according to the EN-ISO-1302 standard via a profilometer device (Figure 3). In these experiments, three roughness values were read from different directions of the worn surfaces of three samples previously used in ASTM C-241 abrasion tests for each sampled carbonate natural stone. The mean of nine roughness values was recorded as the surface roughness value (Ra) (Table 4). Before taking roughness readings, the rock surfaces were cleaned with a brush and then compressed air. This way, the stone and abrasion powder particles remain on the surfaces after the abrasion tests are removed.



Figure 3. Roughness measuring of abraded stone surfaces

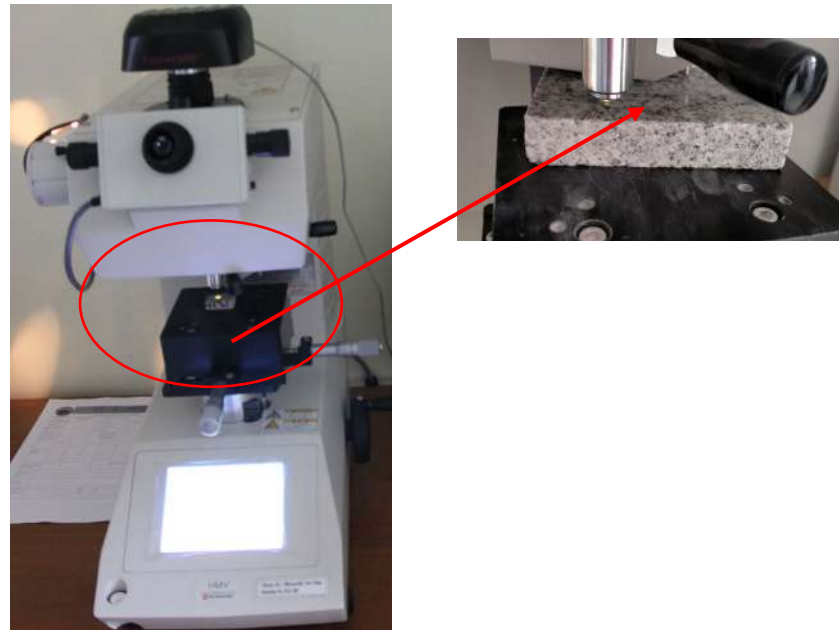


Figure 4. Knoop Hardness device and measurement

2.5. Determination of Knoop Hardness Index of Surface

The surface hardness of materials is measured especially to determine the resistance of the surface to abrasion. Generally, materials' Vickers, Brinell, and Knoop hardness indices can be measured using microhardness measuring devices. Although there are many different surface hardness measurement methods to determine the surface hardness of rocks, the European Union uses the Knoop Hardness Index test method (EN 14205). This study measured the surface hardness of sampled natural stone samples according to the EN 14205 standard. Before the ASTM C-214 abrasion resistance test, readings were made from the samples' polished surfaces with the help of a microhardness measuring device and their arithmetic averages were taken (Table 4).

2.6. Proportions of Rocks

Uniaxial Compression Strength (UCS), Density (D), Cerchar Abrasivity Index (CAI), Roughness (Ra), Knoop Hardness Index (HK) and Abrasion Resistance (AR) properties of the sampled carbonate (M, L, T) origin rocks are given in Table 4.

Table 4. Some properties of sampled carbonate stones*

CODE	UCS (MPa)	D (g/cm ³)	CAI	Ra (μm)	HK	AR
M1	100	2,73	0,90	7,86	135	11,22
M2	81	2,76	0,97	8,46	116	12,03

M3	74	2,75	0,98	8,21	144	9,24
M4	68	2,75	0,70	9,31	119	6,17
M5	52	2,66	0,78	8,42	106	8,53
L1	173	2,88	1,27	6,79	277	24,02
L2	167	2,89	1,22	6,56	251	20,48
L3	156	2,75	1,10	6,66	182	16,74
L4	128	2,75	1,12	6,91	163	16,58
L5	99	2,75	1,05	7,06	187	13,86
L6	79	2,69	1,13	8,98	136	10,09
L7	55	2,70	1,04	10,36	106	7,54
T1	92	2,69	0,85	8,23	107	9,20
T2	82	2,76	0,76	9,20	117	7,29
T3	45	2,66	0,87	9,82	161	6,88
T4	33	2,65	0,61	8,87	120	6,60

*Uniaxial Compression Strength (UCS), Density (D), Cerchar Abrasivity Index(CAI), Roughness (Ra), Knoop Hardness Index (HK), ASTM Abrasion Resistance (AR)

3. RESULTS & DISCUSSION

Statistical correlation and regression analyses between ASTM Abrasion Resistance (AR) and rock properties for sampled carbonate natural stones were performed using the SPSS package program and their reliability was tested.

3.1. Correlation analyses

Linear correlations between some physical, physico-mechanical and hardness values of rocks were examined (Table 5).

Table.5 Correlation of carbonate stones properties

	UCS	D	CAI	Ra	HK	AR
UCS	1	.839	.772	-.854	.816	.938
D		1	.652	-.639	.799	.815
CAI			1	-.588	.735	.829
Ra				1	-.713	-.860
HK					1	.891
AR						1

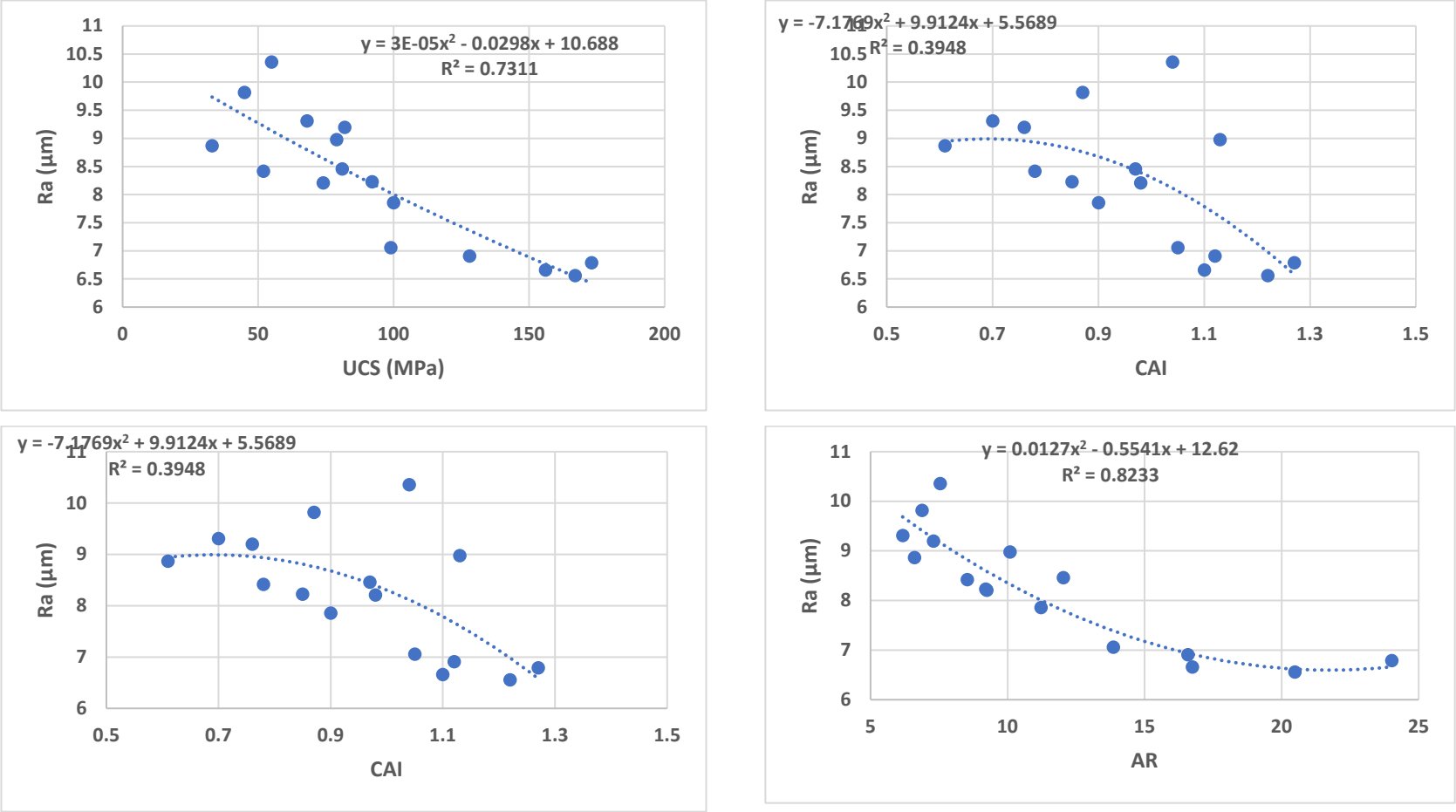
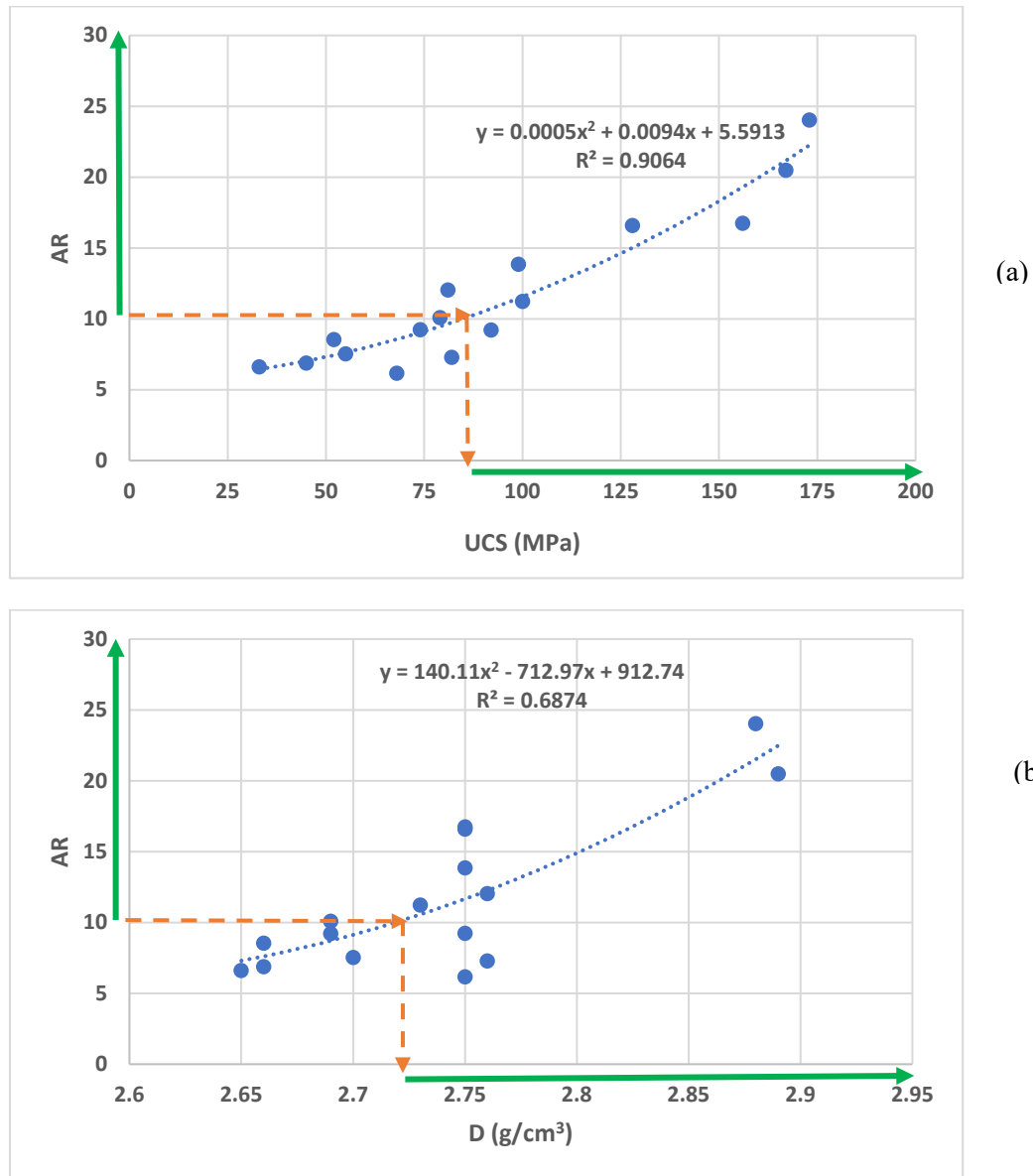


Figure 5. The relationship between the Surface Roughness values and some best-fit rock properties

The relationship between the ASTM Abrasion Resistance Test values and some best-fit rock properties selected within the scope of this study is examined (Figure 6). Additionally, considering the ASTM Natural Stone Requirements Standards (Table 3) for different natural stones, the minimum values required for light foot traffic were marked with green arrows on the graphs for Ra values > 10. Similarly, the relationship between Surface Roughness (Ra), ASTM-AR and HK, is given in Fig. 7.



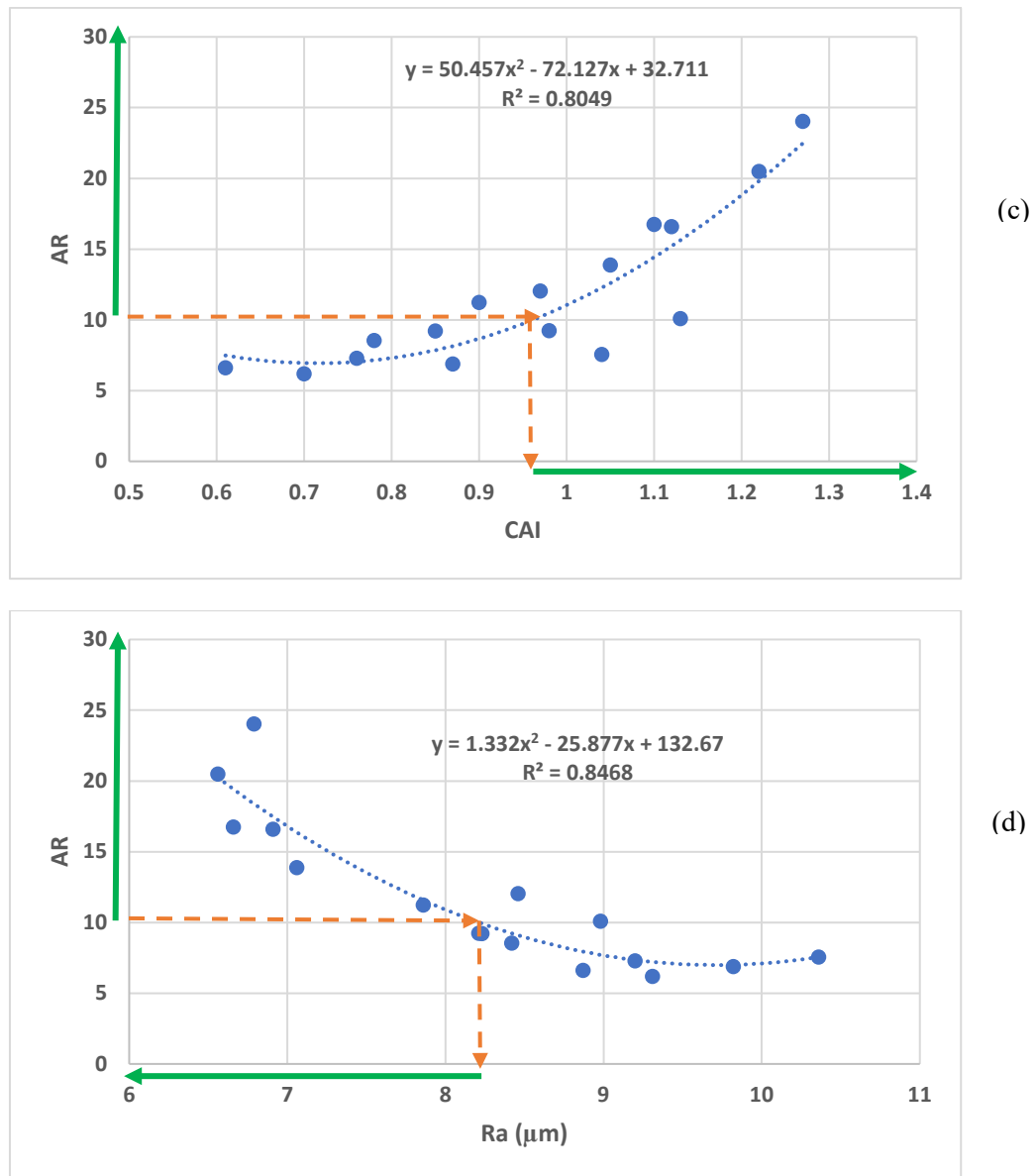


Fig. 6 (a-e). The relationship between the Abrasion Resistance (AR) Test values and some best-fit rock properties

3.2. Linear regression analyses

First, multiple linear regression analyses were performed to select the most relevant rock properties variables for the final prediction models of the ASTM AR test values via SPSS software program. For this purpose, the physical, physico-mechanical and hardness properties of all rocks (Table 4) were used as the independent variables of the regression models. The aim here is to estimate ASTM Abrasion Resistance (AR) values with high reliability, mutually and with the help of other rock properties. In this way, it is possible to estimate the abrasion resistance (AR) properties of rocks and save time and money by taking advantage of fewer properties of rocks. In this study, a 5% significance level ($p\text{-value} \leq 0.05$) was selected as statistically significant. The prediction performances of the constructed regression models were determined by considering the test statistics coefficient of determination (R^2). The R^2 is used as a measure of model accuracy, which explains the proportion of variance in the dependent variable that can be estimated from the independent variable. The R^2 values range from 0 to 1, with

values close to 1 suggesting higher prediction performance. Following the regression procedures outlined above, prediction models of the ASTM abrasion resistance (AR) values were derived using the SPSS software. The two models that best estimate the ASTM abrasion resistance (AR) values of the considered rock samples are given by Eqn. 2 and Eqn. 3, respectively:

$$ASTM_{AR} = 7,734 + 0,058 (UCS) + 0,038 (HK) - 0,885 (Ra) R^2 = 0,938 \quad (2)$$

$$ASTM_{AR} = 8,477 + 0,070 (UCS) + 0,070 (HK) R^2 = 0,927 \quad (3)$$

Regarding Eqn. 2, the coefficient of determination ($R^2 = 0,938$) for the model indicates that 91% of the variation in AR values can be explained by the independent variables UCS (p-value = 0,00), HK (p-value = 0.01) and UCS (p-value = 0,01). According to Eqn. 2, increasing values of HK and UCS correspond decreasing values of Ra to higher AR values, implying higher resistance to abrasion. The R^2 value (0,927) was determined for Eqn.3 suggests that 93% of the variance in AR values can be explained by the independent variables UCS (p = 0,00) and HK (p = 0,02). The same equation signifies that the increasing values of HK and UCS are associated with higher AR values. When the reliability of the obtained equations within the 95% confidence interval is examined, it is understood that Equation 2-3 passed the t and F Tests (Table 6).

Table 6. Results of t and F Tests for Equation 2–3 within the 95% Confidence Interval

Model	Independent variables	Coefficient	Standard error	Standard error of estimate	Computed t-value	Tabulated t-value	Computed F-Value	Tabulated F-value	Determination coefficient (R^2)
Eq.2	Constant	7,734	6,679		1,158				
	HK	0,038	0,013		2,930				
				1,4869		$\pm 1,771$	60,012	3,81	0,938
	Ra	-0,885	0,627		-1,411				
	UCS	0,582	0,21		2,800				
Eq.3	Constant	-1,533	1,255		-1,221				
	HK	0,039	0,013	1,5425	2,901	$\pm 1,761$	82,720	3,74	0,927
	UCS	0,078	0,016		4,875				

4.RESULTS

Natural stones have been widely preferred for many years in floor coverings. However, in places with subjected foot traffic, they wear out due to friction for a long time and lose their surface appearance and shine. For this reason, different standard abrasion resistance test methods (EN, ASTM, etc.) have been developed to select natural stones that are suitable for the place of use and will last a long time.

This study selected 16 different origin carbonate natural stones. Firstly, the Knoop hardness (HK) of their surfaces was measured, and then ASTM abrasion resistance tests were performed to measure

the roughness's occurring on the abraded surfaces. The correlations between the compressive strength, density, Cerchar hardness, Knoop hardness, surface roughness and abrasion resistance properties of these samples were examined and shown graphically. There is a high correlation (60-95%) between the determined properties of the sampled carbonate rocks and ASTM abrasion resistance. ASTM abrasion resistance increases as compressive strength-surface hardness-density increases, while it decreases as surface roughness increases.

In addition, by performing statistical multivariate regression analyses, it is seen that there is a high relationship between the Knoop surface hardness (HK), surface roughness (Ra) and Uniaxial Compression Strength (UCS) for determining ASTM abrasion resistance. Accordingly, for the sampled rock group, only the Uniaxial Compression Strength (UCS) is sufficient to estimate the ASTM abrasion resistance at a rate of approximately 97%. In other words, for the selection of natural stones to be covered on the floor, the approximate abrasion resistances of the rocks can be determined without performing ASTM abrasion resistance tests with the help of the Uniaxial Compression Strength value. In particular, the required values for different natural stones for ASTM are given as a standard. Consequently, with the help of the Uniaxial Compression Strength and surface hardness of the rocks, their abrasion resistances and whether they can be used in places with heavy pedestrian traffic can be easily determined.

5. REFERENCES

ASTM C241-21. (2022). Standard test method for abrasion resistance of stone subjected to foot traffic. ASTM International.

ASTM D5550-06. (2015). Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer. ASTM International.

Cakir, A. (2024). Comparison of European (EN) and American (ASTM) abrasion resistance tests on carbonate and carbonate origin natural stones subjected to foot traffic. Master's thesis, Afyon Kocatepe University, Natural Sciences Institute, Mining Engineering Department, Afyon, Türkiye.

EN 1926. (2007). Natural stone test methods – Determination of uniaxial compressive strength. European Committee for Standardization.

EN 1936. (2010). Natural stone test methods – Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. European Committee for Standardization.

EN 14157. (2017). Natural stone test methods – Determination of the abrasion resistance. European Committee for Standardization.

International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on Standardization of Laboratory and Field Results. (1978). Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(2), 89–97.

IMPACT OF ELECTRICITY MIX ON THE LIFE CYCLE PERFORMANCE OF MARBLE PRODUCTION IN TÜRKİYE

ELEKTRİK ÜRETİM KAYNAK DAĞILIMININ TÜRKİYE MERMER ÜRETİMİ YAŞAM DÖNGÜSÜ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

A. Dönmez*, M. Erkayaoğlu, N. Demirel

Middle East Technical University, Mining Engineering Department

donmeza@metu.edu.tr

ABSTRACT

Marble production is an energy and resource intensive process that generates significant environmental impacts. This study presents a cradle-to-gate Life Cycle Assessment of marble cutting and grinding processes in Türkiye using SimaPro and the ReCiPe 2016 method, investigated under three different electricity mix scenarios. Türkiye holds nearly 40% of global marble reserves, making it an important context for evaluating the environmental performance of natural stone production. Electricity use was identified as the main contributor, accounting for about 70% of total midpoint impacts, particularly in climate change and human toxicity categories. Under the 2024 electricity mix of Türkiye, climate change impacts reach 0,50-0,72 kg CO₂ eq per kg of marble plate. Transitioning toward renewable based electricity scenarios results in around 25% reductions in both midpoint and endpoint impacts, including damages to human health and ecosystems. These findings confirm that electricity mix plays a decisive role in improving sustainability within Türkiye's marble industry. This study will provide insight to future studies for a more detailed analysis conducted towards low-carbon transition pathways.

Keywords: Marble production, life cycle assessment, electricity mix, environmental impact, sustainable mining

ÖZ

Mermer üretimi, önemli çevresel etkiler yaratan enerji ve kaynak yoğun bir süreçtir. Bu çalışma, SimaPro yazılımı ve ReCiPe 2016 yöntemi kullanılarak Türkiye'deki mermer kesme ve zımparalama süreçlerinin üç farklı elektrik üretim senaryosu altında test edildiği beşikten kapıya Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmasını sunmaktadır. Türkiye, dünya mermer rezervlerinin yaklaşık %40'ına sahip olup doğaltaş üretiminin çevresel performansını değerlendirmek için kritik bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Elektrik tüketimi, özellikle iklim değişikliği ve insan toksisitesi kategorilerinde baskın olup toplam orta nokta etkilerin yaklaşık %70'ini oluşturarak başlıca çevresel yük kaynağı olarak belirlenmiştir; Türkiye'nin 2024 yılı elektrik üretimi altında, iklim değişikliği etkisi mermer plaka başına 0,50–0,72 kg CO₂ eşdeğeri düzeyindedir. Yenilenebilir enerjiye dayalı senaryolara geçiş hem orta nokta hem de son nokta etkilerinde, insan sağlığı ve ekosistem hasarları dâhil olmak üzere, %23–25 oranında azalma sağlamaktadır. Sonuçlar, elektrik üretim kaynak dağılımının Türkiye mermer endüstrisinde sürdürülebilirliği artırmada belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bu çalışmanın konu ile ilgili gelecekte yapılacak olan araştırmalara ve düşük karbon geçişi süreci hakkında yürütülecek daha detaylı incelemelere yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mermer üretimi, yaşam döngüsü değerlendirmesi, elektrik üretim kaynak dağılımı, çevresel etki, sürdürülebilir madencilik

INTRODUCTION

Marble is used mainly as a construction material and primarily consists of calcite and dolomite. Limestone, schist, and granite are different rock types considered as marble globally. (Bilgin et al., 2011) On the world stage, the marble trade is highly competitive. Countries such as Türkiye, Italy, Spain, and Greece dominate in both quarrying and exports (Fortune Business Insights, 2025). Türkiye's position is especially noteworthy as estimated to hold nearly 40% of the world's reserves, about 4 billion cubic meters of cuttable marble (Republic of Türkiye Ministry of Trade, 2025). More than 650 different types, each with unique colors and patterns, are quarried across regions like Afyon, Bilecik, Denizli, and İzmir. Famous varieties Afyon Sugar, Elazığ Cherry, Anadolu Beige, Anadolu White, Milas Lilac, and Marmara Marble are exported widely and carry strong international recognition. With more than 1,500 quarries, 200 factories, and almost 9,000 workshops in operation (İstanbul Mineral Exporters Association, 2024), while Turkey maintains its position as a major global marble producer, the environmental consequences associated with extraction and processing activities present significant concerns that requires rigorous investigation.

The construction sector, marble's main consumer, is already known as one of the world's most resource- and energy-demanding industries. Buildings require huge amounts of raw material and energy, and because they last for decades, evaluating their total impact from cradle to grave is complex (Khasreen et al., 2009). Quarrying and processing marble are particularly demanding stages, often linked with heavy fuel use, CO₂ emissions, waste, and water pollution. Studies from India and Italy show similar findings: marble production depends extensively on fossil fuels (Tazzini et al., 2024; Sodha et al., 2025) and contributes significantly to environmental burden. This highlights the urgent need for cleaner production methods, better energy management, and more efficient use of resources. Electricity is a critical resource of marble production especially in the cutting and grinding phases, where high-powered saws and grinders operate continuously (De Jesus et al., 2025). Consequently, the environmental impacts of marble production is closely tied to the electricity mix that powers these machines. In Türkiye's electricity mix where coal and natural gas together account for 53.6 of electricity production. (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2024), the indirect emissions from power use significantly shape the overall life-cycle performance.

To address these concerns, Life Cycle Assessment (LCA) offers a systematic framework to quantify environmental burden. LCA is a methodology used to evaluate the environmental impacts of a product, process, or service throughout its entire life cycle processing, transport, use, and final disposal (ISO 14040:2006). This makes it possible to see the full environmental impacts and identify where the most significant impacts occur. The method has already been applied to a range of building products, ceramics (Han, 2015), concrete, metals, and flooring materials (Potting et al., 1995), showing both trade-offs and environmental hotspots. In the field of natural stones, Bianco and Blengini (2019) highlighted the quarrying stage, paying particular attention to cutting and finishing technologies. Building on this, De Jesus et al. (2025) examined water use in the production of marble, granite, and quartz-based composites through a case study in Bahia, Brazil. Similarly, Ahmad et al. (2022) looked at the environmental, energy, and water footprints of marble tile production, evaluating the entire chain from a life cycle perspective. Earlier work by Nicoletti et al. (2002) suggested that, under certain conditions, marble may carry a lower environmental burden than ceramic tiles when comparing energy use and emissions.

Studies that deal directly with the life cycle impacts of marble are still quite limited. One of the main challenges is the lack of reliable data, which makes it hard to conduct detailed assessments. Most of the existing research has been carried out in countries like Italy and India. In Türkiye, only a handful

of works focus specifically on marble (Günkaya et al., 2018), while a few others discuss natural stones in a broader sense (Yurdakul, 2020, and Vural, 2025). Consequently, the environmental profile of marble production in Türkiye remains insufficiently explored. Considering the country's global importance in both reserves and exports, closing this gap becomes especially important.

This study applies a cradle-to-gate Life Cycle Assessment (LCA) to quantify and compare the environmental impacts of marble cutting and grinding processes in Türkiye under three electricity mix scenarios (Türkiye's Electricity Mix in 2024, Future Electricity Mix Scenario 1, and Future Electricity Mix Scenario 2). Using the SimaPro software and the ReCiPe 2016 method, which provides a state-of-the-art method to convert life cycle inventories to a number of life cycle impact scores on midpoint and endpoint levels (Huijbregts et al., 2016), both midpoint and endpoint indicators, where endpoint assessment uses indicators at the level of the areas of protection, while midpoint indicators are defined somewhere between the emission and the endpoint (Finnveden and Potting, 2014), are analyzed to identify environmental hotspots and to assess the influence of electricity decarbonization on sustainable marble production.

METHODOLOGY

LCA methodology is based on ISO 14040:2006 and consists of four distinct analytical steps: defining the goal and scope, creating the life-cycle inventory, assessing the impact and finally interpreting the results. The goal of this study is to evaluate the environmental impacts associated with marble cutting and grinding processes in Türkiye and to investigate how changes in the national electricity mix could affect these impacts. The functional unit is defined as 1 kg of processed marble (cut and ground) delivered at the factory gate, consistent with the Ecoinvent v.2.2 database structure. The system boundaries are defined as cradle-to-gate, including quarrying, transportation of marble blocks to the processing facility, and subsequent cutting and grinding operations. Polishing, packaging, use phase, and end-of-life were excluded due to the lack of data in Ecoinvent v.2.2 database to represent marble production in Türkiye. Data regarding 1 kg natural stone production was gathered from Ecoinvent v.2.2. database. The process represents the production of 1 kg of cut and ground natural stone (marble plate) and includes the main input flows relevant to cradle-to-gate system boundaries. The following inputs were considered: natural stone cut, diesel that were used in excavation, material handling and internal transportation operations, electricity represents the energy required for cutting and grinding processes, and transportation refers to the transportation of marble blocks from the quarry to the processing plant.

Table 1. General overview of system boundaries

Process	Input	Description	Unit
Quarrying	Natural Stone	Raw marble block extraction	kg
Internal Operations	Diesel	Excavation, machinery, handling	MJ
Processing	Electricity	Power supply for cutting and grinding	kWh
Transportation	Lorry (16-32t)	Quarry → Factory (EURO 5)	ton.km

The output of the system is 1 kg of ground natural stone delivered at the factory gate excluding the polishing, packaging, use phase, and end-of-life processes. As the following stage, the life cycle impact

assessment was conducted using the SimaPro software selecting the ReCiPe 2016 method. This provides both midpoint- and endpoint-level indicators, thus enabling a dual-level interpretation of the environmental consequences of marble plate production. At the midpoint level, the following impact categories were considered: climate change, ozone depletion, human toxicity, particulate matter formation (PM). These midpoint indicators show the cause-effect relationships of pollutant emissions allowing a process-oriented perspective of environmental burdens.

At the endpoint level, the same categories were analyzed to assess the broader damage implications of marble production: climate change human health (expressed in DALY, Disability Adjusted Life Years) represents the years that are lost or that a person is disabled due to a disease or accident (Huijbregts et al., 2016), climate change ecosystems (species loss, year), ozone depletion (DALY), human toxicity (DALY), particulate matter formation (PM). These endpoint indicators translate the midpoint results into damage on human health, ecosystem quality, and natural resources, providing more policy-relevant information. The use of both midpoint and endpoint levels ensures a more comprehensive assessment: midpoint results identify the most critical emission categories and operational hotspots, while endpoint results highlight the ultimate consequences of these emissions on human well-being and ecological integrity.

As the available data did not cover any specific electricity generation scenario for Türkiye, the electricity mix was modeled in order to better represent local conditions. According to Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (2024), the shares of resources in electricity generation in 2024 were as follows: Coal: 34,7%, Natural gas: 18,9%, Hydropower: 21,1%, Wind: 10,4%, Solar: 8,7% from Geothermal: 3,1%, Other Sources: 3,1% with an annual gross consumption of 353,6 TWh. To evaluate the sensitivity to energy transition, three electricity mix scenarios were defined (Table 2), representing Türkiye's base-year generation structure and two prospective decarbonization pathways.

Table 2. Electricity Mix Scenarios

Source	Türkiye's Electricity Mix in 2024 (%)	Scenario 1 (%)	Scenario 2 (%)
Coal	34,7	24,7	20,0
Natural Gas	18,9	15,0	15,0
Hydropower	21,1	26,1	26,1
Wind	10,4	15,4	16,0
Solar	8,7	12,6	16,7
Geothermal	3,1	3,1	3,1
Other Sources	3,1	3,1	3,1

Scenario 1 represents a moderate renewable expansion scenario, while Scenario 2 models an accelerated transition, reducing coal dependence to 20% and increasing the combined share of wind and solar to above 30%.

RESULTS AND DISCUSSION

The results and discussion section presents the life cycle performance of marble processing in Türkiye, focusing on the electricity-intensive cutting and grinding stages modeled with three different electricity mix scenarios. Electricity was found to be the dominant contributor, responsible for about 70% of total midpoint impacts—mainly in climate change and human toxicity—while diesel and transport had minor effects. Using the ReCiPe 2016 method at both midpoint and endpoint levels, the analysis captures how the transition from a fossil-based to a renewable-based grid leads to measurable reductions across key impact categories such as climate change, ozone depletion, human toxicity, and particulate matter formation.

The midpoint results clearly show that both the cutting and grinding stages are strongly influenced by the electricity mix.

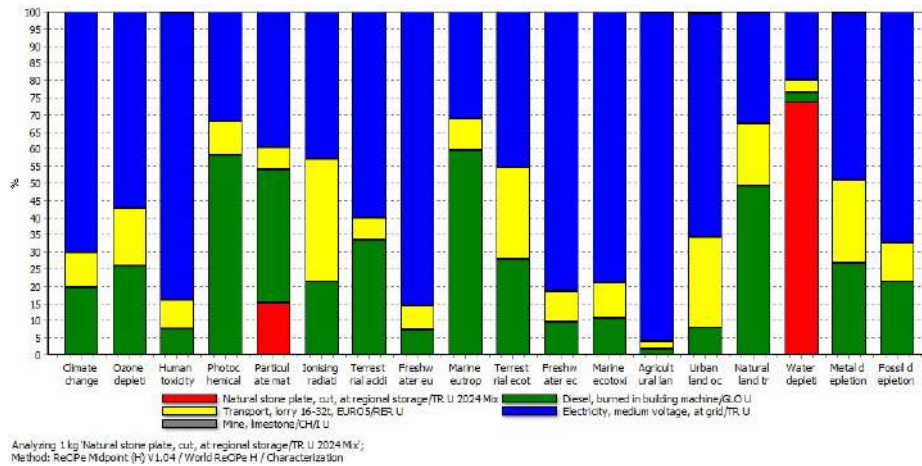


Figure 1. Midpoint Analysis Chart of Natural Stone Plate Cutting Stage with Türkiye's Electricity Mix in 2024

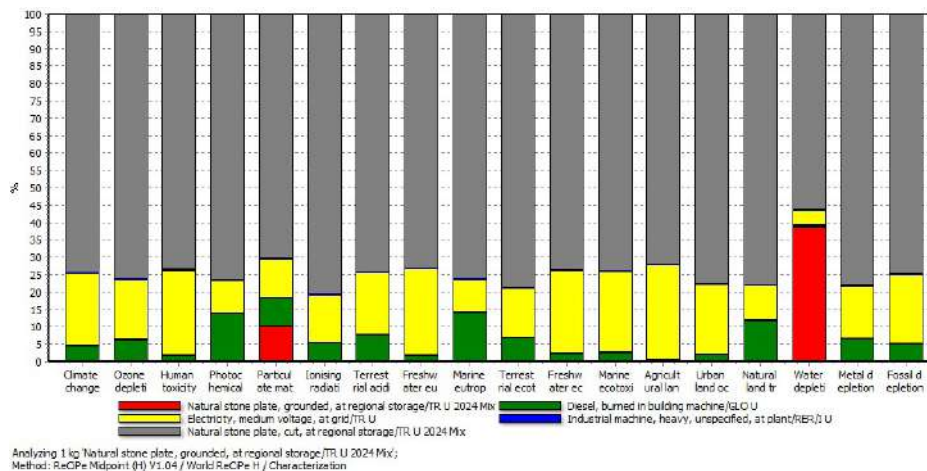


Figure 2. Midpoint Analysis Chart of Natural Stone Plate Grinding Stage with Türkiye's Electricity Mix in 2024

Under the 2024 electricity mix, the high shares of coal and natural gas lead to the greatest impacts, particularly in Climate Change and Human Toxicity categories for both cut and ground stages (Table 3 and Table 4). These reductions correspond directly to the decarbonization of Türkiye's grid, where coal's share drops from 34,7% to 20% and renewables rise from 43% to 58%.

Table 3. Midpoint Impact Results for the Marble Cutting Stage Under Different Electricity Mix Scenarios

Midpoint Natural Stone Cut	2024	Scenario 1	Scenario 2
Climate Change (kg CO ₂ eq)	0,4963573805	0,4117114577	0,3820398404
Human Toxicity (kg 1.4-DB eq)	0,0699865814	0,0579165478	0,0531489134
Ozone Depletion (kg CFC ⁻¹¹ eq)	0,0000000473	0,0000000423	0,0000000425
Particulate Matter (kg PM ₁₀ eq)	0,0010393725	0,0009372801	0,0008939064

Table 4. Midpoint Impact Results for the Marble Grinding Stage Under Different Electricity Mix Scenarios

Midpoint Natural Stone Ground	2024	Scenario 1	Scenario 2
Climate Change (kg CO ₂ eq)	0,7179038830	0,5902094623	0,5454477082
Human Toxicity (kg 1,4-DB eq)	0,1025091329	0,0843006251	0,0771083080
Ozone Depletion (kg CFC ⁻¹¹ eq)	0,0000000667	0,0000000593	0,0000000596
Particulate Matter (kg PM ₁₀ eq)	0,0015919598	0,0014379462	0,0013725138

The midpoint analysis revealed that both cutting and grinding stages are highly dependent on the electricity mix used in production. As the Turkish grid shifts from the fossil-dominated 2024 mix toward renewable-based Scenario 1 and Scenario 2, all impact categories—particularly Climate Change and Human Toxicity—show notable reductions of around 23–25%, while Particulate Matter decreases by roughly 14%. The grinding stage exhibits higher absolute values due to longer operation times, yet both processes benefit proportionally from electricity decarbonization. These findings confirm that cleaner electricity generation directly improves the environmental performance of marble processing in Türkiye. Endpoint results mirror the midpoint trends. Human Health (DALY) decreased by approximately 23–25% across scenarios. Ecosystem damage (species·yr) declined by 20–24%, mainly due to lower fossil fuel combustion in electricity generation. Particulate matter-related DALY impacts followed a similar

downward trend (~15%). Ozone depletion remained nearly constant, confirming that marble processing is not ozone-sensitive but energy-dependent.

Table 5. Endpoint Impact Results for the Marble Cutting Stage Under Different Electricity Mix Scenarios

Endpoint Natural Stone Cut	2024	Scenario 1	Scenario 2
Climate Change Ecosystems (species.yr)	0,00000000394	0,00000000326	0,00000000303
Climate Change Human Health (DALY)	0,00000069491	0,00000057641	0,00000053487
Human Toxicity (DALY)	0,00000004896	0,00000004052	0,00000003718
Ozone Depletion (DALY)	0,00000000013	0,00000000011	0,00000000011
Particulate Matter (DALY)	0,00000027024	0,00000024369	0,00000023242

Table 6. Endpoint Impact Results for the Marble Grinding Stage Under Different Electricity Mix Scenarios

Endpoint Natural Stone Ground	2024	Scenario 1	Scenario 2
Climate Change Ecosystems (species.yr)	0,00000000569	0,00000000468	0,00000000433
Climate Change Human Health (DALY)	0,00000100508	0,00000082631	0,00000076364
Human Toxicity (DALY)	0,00000007171	0,00000005897	0,00000005394
Ozone Depletion (DALY)	0,00000000018	0,00000000016	0,00000000016
Particulate Matter (DALY)	0,00000041391	0,00000037387	0,00000035685

The endpoint results show a clear decrease in both human health and ecosystem damage as the electricity mix becomes cleaner. For the cutting stage, total damages to human health (DALY) and ecosystems (species·yr) decline by about 23–25% between the 2024 and Scenario 2. A similar pattern is observed in the grinding stage, where human health impacts fall from 1.01×10^{-6} to 7.64×10^{-7} DALY and ecosystem damages from 5.69×10^{-9} to 4.33×10^{-9} species·yr. Particulate-matter-related health effects also drop by roughly 14%, while ozone depletion remains almost unchanged. Overall, the results confirm

that reducing fossil fuels in Türkiye's electricity generation directly translates into lower long-term damage to human health and ecosystems from marble processing.

This study focused on the cutting and grinding stages of marble production and excluded the polishing phase, packaging, and end-of-life processes due to data limitations. Future research should expand the system boundaries to include the polishing stage, which introduces additional chemical and water-related impacts, as well as packaging and transportation to capture the full cradle-to-gate profile of marble products. Moreover, as the share of renewable energy, particularly solar power, continues to increase in Türkiye's electricity mix, future LCAs should also account for the embedded emissions from solar panel manufacturing and disposal. Incorporating these aspects will provide a more comprehensive understanding of the evolving environmental footprint of marble production under emerging low-carbon energy systems.

REFERENCES

- Ahmad, T., Hussain, M., Iqbal, M., Ali, A., Manzoor, W., Bibi, H., Ali, S., Rehman, F., Rashedi, A., Amin, M., Tabassum, A., Raza, G., Shams, D. F. (2022). Environmental, energy, and water footprints of marble tile production chain in a life cycle perspective. *Sustainability*, 14(14), 8325. <https://doi.org/10.3390/su14148325>
- Bianco, I., Blengini, G. A. (2019). Life Cycle Inventory of technologies for stone quarrying, cutting and finishing: Contribution to fill data gaps. *Journal of Cleaner Production*, 231, 419–427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.170>
- Bilgin, N., Yeprem, H., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E., Marşoglu, M. (2011). Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, 29, 449–457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011>
- De Jesus, J. O. N., Da Silva, L. J., Parente, V., Esquerre, K. P. O., Sahin, O., De Araujo, W. C. (2025). A water consumption assessment in the production of Marble, granite, and Quartz-Based composites using life cycle assessment: a case study in Bahia, Brazil. *Water*, 17(10), 1438. <https://doi.org/10.3390/w17101438>
- Finnveden, G., Potting, J. (2014). Life cycle assessment. In Elsevier eBooks (pp. 74–77). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386454-3.00627-8>
- Fortune Business Insights. (2025, 8 Eylül). Natural stone and marble market size, share & industry analysis, by type (granite, limestone, marble, sandstone, slate, and others), by application (building & construction {flooring, wall cladding, and paving}, monumental, and others {sculptures and memorial art}), and regional forecast, 2024–2032. <https://www.fortunebusinessinsights.com/natural-stone-and-marble-market-104040>
- Günkaya, Z., Karacasulu, L., Evliyaoğlu, G., Çiftçi, M. (2018). Life cycle assessment of marble plate production. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 521. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.74350>
- Huijbregts, M. a. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., Van Zelm, R. (2016). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

International Organization for Standardization [ISO]. (2006). Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework (ISO 14040:2006). International Organization for Standardization.

Istanbul Mineral Exporters' Association. (2024). Turkish natural stones trade delegation: Australia / Melbourne. <https://imib.org.tr/wp-content/uploads/imib-avustralya-sektorel-ticaret.pdf>

Khasreen, M. M., Banfill, P. F. G., Menzies, G. F. (2009). Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A review. *Sustainability*, 1(3), 674–701. <https://doi.org/10.3390/su1030674>

Murray, C. J., Acharya, A. K. (1997). Understanding DALYs. *Journal of Health Economics*, 16(6), 703–730. [https://doi.org/10.1016/S0167-6296\(97\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0167-6296(97)00004-0)

Nicoletti, G. M., Notarnicola, B., Tassielli, G. (2002). Comparative life cycle assessment of flooring materials: Ceramic versus marble tiles. *Journal of Cleaner Production*, 10(3), 283–296. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00028-2)

Potting, J., Blok, K. (1995). Life-cycle assessment of four types of floor covering. *Journal of Cleaner Production*, 3(4), 201–213. [https://doi.org/10.1016/0959-6526\(95\)00082-8](https://doi.org/10.1016/0959-6526(95)00082-8)

Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources-Electricity. (2024). <https://enerji.gov.tr/infobank-energy-electricity>

Republic of Türkiye Ministry of Trade. (2019). Natural stones [PDF]. <https://www.trade.gov.tr/data/5b8fd5bf13b8761f041fee9b/Natural%20Stones.pdf>

Sodha, D. S., Mali, H. S., Singh, A. K. (2025). Life cycle energy assessment of Rajasthan's marble processing plant for sustainable environment planning. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 85(2), 123–135. <https://doi.org/10.56042/jsir.v84i02.9775>

Sodha, D. S., Mali, H. S., Singh, A. K. (2025). Sustainable Life cycle Assessment of the marble Processing Industry: A Gate-to-Gate Analysis in Rajasthan. *Journal of Sustainable Metallurgy*. <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00970-8>

Tazzini, A., Gambino, F., Casale, M., Dino, G. A. (2024). Managing marble quarry Waste: Opportunities and Challenges for Circular Economy implementation. *Sustainability*, 16(7), 3056. <https://doi.org/10.3390/su16073056>

Traverso, M., Rizzo, G., Finkbeiner, M. (2009). Environmental performance of building materials: life cycle assessment of a typical Sicilian marble. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(1), 104–114. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0135-z>

Vural, N., Yılmaz, M., Onat, B., Tuğrul, A. (2025). Life cycle assessment of sandstone aggregate quarry activities—a case study in Istanbul, Türkiye. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02442-x>

Yurdakul, M. (2020). Natural stone waste generation from the perspective of natural stone processing plants: An industrial-scale case study in the province of Bilecik, Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123339. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123333>

3.Bölüm

MERMER ARTIKLARIN YOL ÜST YAPISINDA TEMEL VE ALTTEMEL MALZEMESİ OLARAK KULLANIMI

THE USE OF MARBLE WASTE AS BASE AND SUBBASE MATERIALS

E. Yıldırım¹, S. A. Yıldırım^{2*}, E. B. Aydın³, G. Bulut⁴

¹ Oyak Çimento Fabrikaları A.Ş

² ABT Laboratuvar ve Müşavirlik Hizmetleri A.Ş

³ İstanbul Teknik Üniversitesi Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü

⁴ İstanbul Teknik Üniversitesi Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü

*Sorumlu yazar: seyit.yildirim@abtlab.com.tr

ÖZ

Bir yolun üstyapısı, bağlayıcısı su olan alttemel / temel ve bağlayıcısı bitüm olan bitümlü temel / binder / aşınma tabakalarından oluşmaktadır. Yol yapısının yaklaşık %95 gibi önemli bir kısmını agrega oluşturmaktadır. Bu nedenle agregaların özellikleri yol mühendisleri için oldukça önemli olup değişik agrega tiplerinin özelliklerinin bilinmesi yolların projelendirilmesinde ve tasarımların yapılmasında önem arz etmektedir. Ülkemizde yaklaşık olarak yıllık 400 milyon tonun üzerinde agrega üretimi yapılmakta ve bunun önemli bir kısmı da yol malzemesi olarak kullanılmaktadır. Beton yapıların, asfalt karışımların, yol üst yapısındaki temel ve alttemel tabakaların, demiryolları ve köprü inşaatlarının temel malzemesi olan agregalar her geçen gün artan zorluklarla elde edilmektedir. Kaynakların sınırlı oluşu, artan talep, çevre sorunları, üretim maliyetlerinin, nakliye fiyatlarının giderek artması ve taş ocaklarının işletme şartlarının ağırlaşması gibi sebepler, yol malzemesi olarak kullanılabilecek alternatif kaynak arayışlarını zorunlu kılmakta, farklı kaynaklardan açığa çıkan atıklarla ilgili çalışmalar da önemli hale gelmektedir. Bu çalışmada, farklı bölgelerde faaliyet gösteren mermer kesim fabrikalarında açığa çıkan mermer artıkların fiziksel özellikleri belirlenmiş, Karayolu Teknik Şartnamesi kriterlerine göre değerlendirilmiş, yol üst yapısında temel ve alt temel tabakalarında farklı oranlarda kullanılarak dizaynlar hazırlanmış, referans olarak yapılan dizaynla karşılaştırılarak ilave agrega olarak kullanımlarına ait uygunluk değerlendirmesi yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Agrega, yol üst yapısı, mermer artıkları, alttemel, temel

ABSTRACT

The pavement of a road consists of a subbase / foundation with a binder of water and a bituminous base / binder / wear layers with a binder of bitumen. Aggregate constitutes an important part of the road structure, approximately 95%. For this reason, the properties of aggregates are very important for road engineers, and knowing the characteristics of different aggregate types is important in designing and designing roads. In our country, over 400 million tons of aggregate is produced annually, and a significant part of it is used as road material. Aggregates, which are the basic materials of concrete structures, asphalt mixtures, foundation and sub-base layers on the road superstructure, railways and bridge constructions, are obtained with increasing difficulties day by day. Reasons such as limited

resources, increasing demand, environmental problems, increasing production costs, transportation prices and worsening operating conditions of quarries necessitate the search for alternative sources that can be used as road materials, and studies on wastes from different sources become important. In this study, the physical properties of marble wastes released in marble cutting factories operating in different regions were determined, evaluated according to the Highways Technical Specification criteria, designs were prepared using different ratios in the base and sub-base layers of the road pavement, and the conformity assessment of their use as additional aggregate was compared with the design made as a reference has been made.

Keywords: Aggregate, road structure, marble waste, subbase, base

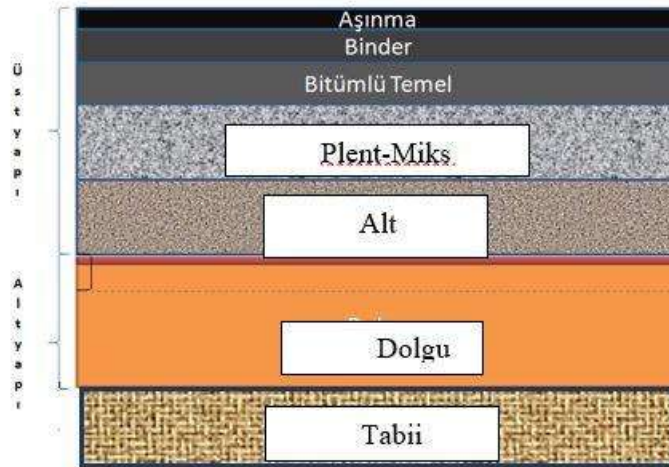
GİRİŞ

Şayet başka bir endüstri için girdi oluşturmuyor ise, değişik endüstrilerde atık olarak açığa çıkan çeşitli ürünlerin doğaya terk edilmesi, atılması veya değişik yerlerde depolanması çok büyük problemler yaratmakta, çevre kirliliği dahil büyük sorunlara yol açmaktadır. Oysa bir şekilde atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, hem çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanım miktarını azaltacak hem de malzemelerin, atılmak üzere depolanması durumunda, çevrede meydana gelecek problemlerin azalmasına ya da tamamen ortadan kalkmasına yardımcı olacaktır. Mermer kesim fabrikalarında üretim artışı olan mermerlerin ve mermer taşocaklarında açığa çıkan ancak yol malzemesi kriterlerini karşılayan mermer artıklarının, yol üstyapısında alttemel ve temel seviyelerinde değerlendirilmesi olabilecek çevre sorunlarının da ortadan kalkmasını sağlayacaktır.

KULLANILAN MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında kullanılan mermer artıklarının fiziksel özellikleri belirlenmiş, Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) kriterlerine göre değerlendirilmiş ve yol üstyapısında plent-miks temel ve alt temel tabakalarında agrega olarak kullanımı araştırılmıştır (Şekil 1).

Çalışma üç aşamada yürütülmüş, ilk aşamada alttemel tabakasında, (0-5 mm) ve (5-12 mm) boyutlarındaki mermer artıklar toplamda %25 oranında, ikinci aşamada plent-miks tabakasında, (0-5 mm) ve (12-19 mm) boyutlarındaki mermer artıklar toplamda %30 oranında kullanılmıştır. Her iki dizaynda ayrıca İstanbul/Eyüp-Çiftalan mevkiinden elde edilen değişik boyutlardaki diyabaz agrega %75 ve %70 oranlarında kullanılmıştır. Üçüncü aşamada ise referans olarak, tamamı diyabaz agrega kullanılarak Plent-miks temel (PMT) dizaynı yapılmış ve artıkların kullanıldığı dizaynlar ile mukayese edilmiştir. Plent-miks tabakasında kullanılan agregalar zaten alt temel için de uygun olacağı için, referans olarak sadece PMT dizaynı yeterli görülmüştür.



Şekil 1. Yol yapısı

Mermer Artıklar

Çalışmada kullanılan mermer artıklar, Marmara Adası ve Muğla Bölgesinde faaliyet gösteren mermer kesim tesislerinden temin edilmiştir. İki bölgeden eşit oranda karıştırılarak kullanılan artıkların fiziksel özellikleri Çizelge 1’de, elek analizleri Çizelge 2’ de verilmiştir.

Çizelge 1. Mermer artıkların fiziksel özellikleri ve şartname limitleri

Deneyler	Birim	Standart	Sonuç	KTŞ Limitleri Alttemel	KTŞ Limitleri PMT
Los Angeles Deneyi ile Parçalanmaya Karşı Direncin Tayini (500 devir)	%	TS EN 1097-2	56	≤ 45	≤ 35
Kaba Agregalarda Tane yoğunluğu (Hacim özgül Ağırlığı –Tel Sepet Metodu 4- 31,5mm	Mg/m ³	TS EN 1097-6	2,719	...	...
Kaba Agregalarda Su emme (Tel Sepet Metodu), 4-31,5 mm	%	TS EN 1097-6	0,09	≤ 3,5	≤ 3,0
İnce Agregalarda Tane yoğunluğu (Hacim özgül Ağırlığı –Piknometre Metodu, 0-4 mm	Mg/m ³	TS EN 1097-6	2,607	...	...
İnce Agregalarda Su emme (Piknometre Metodu), 0-4 mm	%	TS EN 1097-6	0,33	≤ 3,5	≤ 3,0
Plastisite İndeksi	%	TS EN ISO 17892-12	NP	≤ 6,0	NP
Metilen Mavisini, (İnce agreganın 0/2 mm kısmına)	g/kg	TS EN 933-9	0,75	≤ 4,0	≤ 3,0
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO ₄ ile)	%	TS EN 1367-2	14	≤ 25	≤ 20

Çizelge 2. Mermer artıkların elek analizi

Elek Açıklığı (mm)	0-5 mm Mermer (% geçen)	5-12 mm Mermer (% geçen)	12-19 mm Mermer (% geçen)
19,1		100	100
9,5	100	98,9	0,6
4,75	99,5	6,6	0,5

2	63,2	1	0,3
0,425	35,2	0,7	0,3
0,075	9	0,4	0,1

Agrega

Çalışmada temel agrega olarak kullanılan diyabaz, İstanbul Eyüp ilçesi Çiftalan mevki taş ocağından temin edilmiştir. Plent-Miks Temel ve Alttemel karışımlarında kullanılan gri-koyu gri, siyahımsı renkli, farklı boyutlardaki diyabaz agreganın fiziksel özellikleri Çizelge 3'te, elek analizleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3.Diyabaz agrega fiziksel özellikleri

Deneyler	Birim	Standart	Sonuç
Los Angeles Deneyi ile Parçalanmaya Karşı Direncin Tayini (500 devir)	%	TS EN 1097-2	19
Kaba Agregalarda Tane yoğunluğu (Hacim özgül Ağırlığı –Tel Sepet Metodu 4-31,5mm)	Mg/m ³	TS EN 1097-6	2,741
Kaba Agregalarda Su emme (Tel Sepet Metodu), 4-31,5 mm	%	TS EN 1097-6	0,3
İnce Agregalarda Tane yoğunluğu (Hacim özgül Ağırlığı –Piknometre Metodu, 0-4 mm)	Mg/m ³	TS EN 1097-6	2,645
İnce Agregalarda Su emme (Piknometre Metodu), 0-4 mm	%	TS EN 1097-6	1,04
Plastisite İndeksi	%	TS EN ISO 17892-12	NP
Metilen Mavisi, (İnce agreganın 0/2 mm kısmına)	g/kg	TS EN 933-9	2,5
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO ₄ ile)	%	TS EN 1367-2	3

Çizelge 4. Diyabaz agrega elek analizleri

Elek Açıklığı (mm)	0-5mm (% Geçen)	5-12 mm (% Geçen)	12-19 mm (% Geçen)	25-38 mm (% Geçen)
37,5	100	100	100	100
19,1	100	100	100	97,3
9,5	100	70	3,5	34,2
4,75	97,7	14	1,3	1,3
2	63,8	3,4	1,1	0,7
0,425	28,2	1,1	0,9	0,5
0,075	13,5	0,9	0,5	0,3

Diyabaz Agregası + Mermer Artığı

Karayolu Teknik Şartnamesinde Plent Miks Temel ve Alttemel tabakaları için istenen Los Angeles Aşınma değerini tek başına karşılamayan mermer artığı, %25 ve %30 oranında kullanılarak %75 ve %70 oranlarında diyabaz agregası ile karıştırılmış, fiziksel özellikleri test edilmiştir (Çizelge 5). Dizayn çalışmaları bu oranlarda hazırlanan numuneler ile yapılmıştır.

Çizelge 5. Mermer artığı+ diyabaz agregası karışımı fiziksel özellikler

Deneyler	Birim	Standart	%25 Mermer + %75 Diyabaz	%30 Mermer + %70 Diyabaz
Los Angeles Deneyi ile Parçalanmaya Karşı Direncin Tayini (500 d)	%	TS EN 1097-2	27	29
Kaba Agregalarda Su emme (Tel Sepet Metodu), 4-31,5 mm	%	TS EN 1097-6	0,7	0,6
İnce Agregalarda Su emme (Piknometre Metodu), 0-4 mm	%	TS EN 1097-6	0,9	0,9
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO ₄ ile)	%	TS EN 1367-2	4	5

Alttemel Dizayn Çalışması

Alttemel tabakası, maksimum ebatı 38 mm veya 50 mm olan kaba agreganın ince agregayla, belirli gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanıp su ile karıştırılarak, ince tesviyesi yapılmış üstyapı tabanı üzerine serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan temel tabakadır. (Karayolu Teknik Şartnamesi, 2023) Dizayn çalışmasında, toplamda %25 mermer artığı ve %75 diyabaz agregası karışımı kullanılmıştır. Karayolu Teknik Şartnamesi Alttemel Tip A gradasyon limitleri esas alınarak hazırlanan karışımda ince agreganın (0-5 mm) %15'lik, kaba agreganın (5-12 mm) %10' luk bölümünde mermer artıkları kullanılmıştır. Agregaların kullanım oranları Çizelge 6'da elek analizleri ve karışım gradasyonu Çizelge 7'de, Alttemel dizayn sonuçları Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 6. Agregaların kullanım oranları

	0-5 mm Diyabaz %	0-5mm Mermer %	5-12 mm Diyabaz %	5-12 mm Mermer %	12-19 mm Diyabaz %	25-38 mm Diyabaz %
Kullanım Oranı	30	15	10	10	10	25

Çizelge 7. Elek analizleri ve şartname limitleri

Elek Açıklığı (mm)	0-5 mm Diyabaz % Geçen	0-5 mm Mermer % Geçen	5-12 mm Diyabaz % Geçen	5-12 mm Mermer % Geçen	12-19 mm Diyabaz % Geçen	25-38 mm Diyabaz % Geçen	Karışım % Geçen	KTŞ Limitleri Alttemel TİPA
75							100	100

37,5						97,3	99,3	85-100
19,1			100	100	100	34,2	83,6	70-100
9,5	100	100	70	98,9	3,5	1,3	62,6	45-80
4,75	97,7	99,5	14	6,6	1,3	0,7	46,6	30-75
0,425	28,2	35,2	1,1	0,7	0,9	0,5	14,1	10-25
0,075	13,5	9	0,9	0,4	0,5	0,3	5,7	0-12

Çizelge 8. Alttemel dizayn sonuçları

Dizayn Değerleri	Birim	Deney Standartı	Sonuç	KTŞ Şartname Limitleri
Optimum Su İçeriği	%	TS 1900-1 Deney 8	5	-
Maksimum Kuru Birim Ağırlık (Modifiye Proktor Yöntemi)	ton/m ³		2,292	-
Kaliforniya Taşıma Oranı (Yaş CBR)	%	TS1900-2 Deney 1	150	≥ 50

Plent-miks Temel Dizayn Çalışması

Plent-miks temel tabakası, maksimum ebatı 25 mm veya 38 mm olan kırma taş ve ince malzeme kullanılarak belirli gradasyon limitleri içerisinde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda su ile bir tesiste karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin, serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır. (Karayolu Teknik Şartnamesi, 2023) Dizayn çalışmasında, toplamda %30 mermer artığı ve %70 diyabaz agrega karışımı kullanılmıştır. Karayolu Teknik Şartnamesi PMT Tip1 gradasyon limitleri esas alınarak hazırlanan karışımda (0-5mm) ince agreganın %20'lik, (12-19 mm) kaba agreganın %10'luk bölümünde mermer artıkları kullanılmıştır. Agregaların kullanım oranları Çizelge 9'da elek analizleri ve karışım gradasyonu Çizelge 10'da PMT Dizayn Sonuçları Çizelge 11' de verilmiştir.

Çizelge 9. Agregaların kullanım oranları

	0-5 mm Diyabaz %	0-5 mm Mermer %	5-12 mm Diyabaz %	12-19 mm Mermer %	12-19 mm Diyabaz %	25-38 mm Diyabaz %
Kullanım Oranı	25	20	10	10	10	25

Çizelge 10. Agregaların elek analizleri ve şartname limitleri

Elek Açıklığı (mm)	0-5 mm Diyabaz% Geçen	0-5 mm Mermer% Geçen	5-12 mm Diyabaz % Geçen	12-19 mm Mermer% Geçen	12-19 mm Diyabaz % Geçen	25-38 mm Diyabaz % Geçen	Karışım Gradasyonu (%)	KTŞ Limitleri PMT TİP1
37,5						100	100	100
25						97,3	99,3	72-100
19,1			100	100	100	34,2	83,6	60-92
9,5	100	100	70	30,6	3,5	1,3	55,7	40-75
4,75	97,7	99,2	14	3,5	1,3	0,7	46,3	30-60
2	63,8	73,5	3,4	0,3	1,1	0,6	31,3	20-45
0,425	28,2	47,4	1,1	0,3	0,9	0,5	16,9	8-45
0,075	13,5	12,6	0,9	0,1	0,5	0,3	6,1	0-10

Çizelge 11. PMT dizayn sonuçları

Dizayn Değerleri	Birim	Deney Standartı	Sonuç	KTŞ Şartname Limitleri
Optimum Su İçeriği	%	TS 1900-1 Deney 8	4,5	-
Maksimum Kuru Birim Ağırlık (Modifiye Proktor Yöntemi)	ton/m ³		2,308	-
Kaliforniya Taşıma Oranı (Yaş CBR)	%	TS 1900-2 Deney 1	144	≥ 120

Referans Dizayn Çalışması

Çalışmada referans olarak kullanılan dizayn, (25-38 mm), (12-19 mm), (5-12 mm) ve (0-8 mm) elek aralığındaki diyabaz agregalarla, Karayolu Teknik Şartnamesi Plent Miks Temel Tip1 tabakası gradasyon limitleri esas alınarak oluşturulmuştur. Agregaların kullanım oranları Çizelge 12’ de, elek analizleri, karışım gradasyonu ve şartname limitleri Çizelge 13’ de, dizayn sonuçları Çizelge 14’ te verilmiştir.

Çizelge 12. Agregaların kullanım oranları

	0-8 mm Diyabaz %	5-12 mm Diyabaz %	12-19 mm Diyabaz %	25-38 mm Diyabaz %
Kullanım Oranı	47	15	18	20

Çizelge 13. Agregaların elek analizleri ve şartname limitleri

Elek Açıklığı (mm)	0-8 mm Diyabaz Geçen	5-12 mm Diyabaz % Geçen	12-19 mm Diyabaz % Geçen	25-38 mm Diyabaz % Geçen	Karışım Gradasyonu (%)	KTŞ Limitleri PMT TİP1
37,5				100	100	100
25				53,6	90,7	72-100
19,1		100	97,2	9,9	81,5	60-92
9,5	100	84,8	1,1	0,1	59,9	40-75
4,75	88,1	12,7	0,3		43,4	30-60
2	57	2,7	0,3		27,2	20-45
0,425	26,8	0,4	0,2		12,7	8-25
0,075	14,5	0,1	0,1		6,8	0-10

Çizelge 14. PMT dizayn sonuçları

Dizayn Değerleri	Birim	Deney Standartı	Sonuç	KTŞ Şartname Limitleri
Optimum Su İçeriği	%	TS 1900-1 Deney 8	4,9	-
Maksimum Kuru Birim Ağırlık (Modifiye Proktor Yöntemi)	ton/m ³		2,327	-
Kaliforniya Taşıma Oranı (Yaş CBR)	%	TS 1900-2 Deney 1	161	≥ 120

SONUÇLAR

Mermer kesim fabrikalarında açığa çıkan artıkların yol üst yapısında alttemel ve temel tabakalarında kullanımının araştırıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Çalışmada kullanılan artıkların, Los Angeles Aşınma deney sonucu, KTŞ Alttemel ve Plent-Miks Temel gereklerini karşılamamaktadır.
2. %25 ve %30 oranında Mermer artığı ve %75-%70 oranında Diyabaz agreganın kullanıldığı agregaya karışımının Los Angeles Deneyi ile Parçalanma direnci, KTŞ Alttemel ve Plent Miks Temel şartname limitleri içerisinde. Diğer fiziksel özellikler de istenilen şartları sağladığı için bu oranlarda ilave agregaya olarak yol üst yapısında ilgili tabakalarda kullanılması uygun görülmektedir.
3. Mermer artıkların boyut küçültme işlemi laboratuvar ortamında yapılmış ve dizaynlardaki karışım gradasyonu, ilgili şartname limitlerini karşılamıştır. Endüstriyel ölçekli üretimlerde mermer artıkların boyut küçültme işlemi, ilgili şartnamelerdeki gradasyon limitlerine uygun olarak yapılmalıdır.
4. Mermer artığının kullanıldığı dizaynlarda ve kullanılmadığı referans dizaynda, zeminin taşıma gücünü gösteren CBR sonuçlarının birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

5. Bu çalışmada elde edilen sonuçların sadece mermer kesim fabrikalarında açığa çıkan mermer artıkları ile yapılan çalışmanın sonucu olduğu, farklı kaynaklardan elde edilecek örneklerin farklı değerler verebileceği unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

Arıoğlu, E., Vural, B., Yücel, O. (1996). Dünyadaki Geri Kazanılmış Agregası ve Üretim Politikalarının Gözden Geçirilmesi ve Ülkemiz Açısından İrdelenmesi. 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu (ss. 787–792). İstanbul.

Aydın, B. E., Demirci, A., Gündoğdu, A. (2022). Usability of marble waste for road construction. IMPS 2022, 17th. International mineral processing symposium (ss. 787–792). İstanbul.

Karayolu Teknik Şartnamesi. (2023).

Türk Standartları Enstitüsü (TSE). (2006). TS EN 1900-1: İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri-Fiziksel Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü (TSE). (2006). TS EN 1900-2: İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri-Mekanik Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

EXPLORING THE FEASIBILITY OF NATURAL STONE CUTTING WASTES AS ABRASIVES IN WATERJET MACHINING

S. Kaya*, G. Aydin, I. Karakurt

Karadeniz Technical University, Mining Engineering Department

**Corresponding author: serkan.kaya@ktu.edu.tr*

ABSTRACT

As a result of the cutting and processing activities in natural stone quarries and factories, various types and sizes of waste are generated. The discovery of new industries focused on utilizing natural stone cutting by-products holds significant importance from environmental, and economic perspectives. Natural stone wastes exhibit the potential to be used as abrasive in abrasive waterjet machining solely through size reduction-classification processes. This research examines the potential viability of utilizing natural stone cutting wastes in this manner. The suitability of natural stone wastes as abrasives is evaluated based of particle size, particle shape, hardness, density, and cost. Additionally, the preparation processes for converting these wastes into abrasives, including crushing, grinding, and screening, are discussed. It can be stated that processed natural stone solid wastes with appropriate properties can be successfully utilized as abrasive material in abrasive waterjet machining.

Keywords: Waste management, natural stone wastes, abrasive waterjet, size reduction

INTRODUCTION

Since ancient times, natural stones have served multiple functions across different fields thanks to their distinctive visual appeal and specialized functional characteristics. However, the swift expansion of the construction sector has resulted in a heightened demand for natural stone materials, which, in turn, has resulted in a parallel rise in waste production. Natural stone manufacturing results in substantial waste accumulation in the form of solid debris of varying sizes, dust, and sludge. These natural stone wastes are typically inert (chemically non-reactive), and numerous studies have been conducted on their storage and reuse (Yurdakul, 2020). A significant portion of these wastes has the potential to be reprocessed and utilized in other industries. Therefore, the segregation and reuse of these wastes, returning them to the economy, are crucial from both environmental waste management and industrial alternative product utilization perspectives (Ural and Yakse, 2020).

In natural stone operations (quarries and factories), large and irregular block fragments and other rock pieces with no economic value are defined as waste and are stored in an area within the license site nearest to the quarry (Altindag, 2018). These wastes negatively affect land productivity. Transporting and disposing of these wastes to regulated storage areas incur significant costs. Large solid wastes, in addition to causing visual pollution, can sometimes flow or discharge into areas such as forests and agricultural lands, posing safety hazards and environmental pollution. During rainy seasons, muddy waters containing natural stone waste fractions flow into rivers, canals, and roads, adversely affecting water quality, reducing storage capacity, harming aquatic life, and contaminating groundwater reserves. These solid materials can also flow into lakes and ponds, reducing their water-holding capacity. Thus, natural stone wastes pose dangers to the environmental ecosystem and its physical, chemical, and biological components (Mosafari et al., 2014).

Waste management in the natural stone industry is a fundamental component of the production process. A comprehensive waste management plan improves health and safety conditions, reduces storage, transport, and disposal costs, generates revenue, and enhances the company's reputation (Papantonopoulos et al., 2007). Applications can be summarized as waste reduction, utilization of wastes, and legal disposal (Natural Stone Council, 2009). Repurposing and recycling waste materials enhance efficiency and financial gains, minimize ecological impact, and supply substitute raw resources for diverse industrial applications. Natural stone wastes can be utilized in construction materials and concrete production, road construction, filling and glass industries, flood prevention barricades, soil neutralization, cement production, material production, filtration processes, plastic production, dyeing and feed industries, and other applications (Aydin and Karakurt, 2020). In recent years, the feasibility of using natural stone wastes as abrasive materials in abrasive waterjet (AWJ) cutting and processing has become an important research topic.

Natural Stone Wastes

In natural stone quarries and factories, waste (Figure 1) is generated at every stage of cutting and surface processing (using diamond wires, chain saws, circular saws, etc.). The amount of waste generated during quarry operation varies according to factors such as the type of rock, the geology and morphology of the marble deposit, the crystal structure and texture of the rock, the suitability of the chosen operating method and equipment, production capacity, and other factors, and can reach quite high proportions (Karaca et al., 2012). Waste in marble quarries is generally defined as rubble, or debris. Fragmented wastes can be of various sizes, and in addition to quarry wastes, large pieces such as slab fragments, and flat, small pieces left over from sizing are formed during slab cutting with circular saws and gangsaws in natural stone factories (Strzałkowski, 2021). During natural stone processing, dust waste accumulates as sludge, retaining roughly 35-45% moisture content (Singh et al., 2017). In factories, this sludge is generally settled in thickeners by allowing the solid part to settle, and it is separated as solid waste filter press cake.

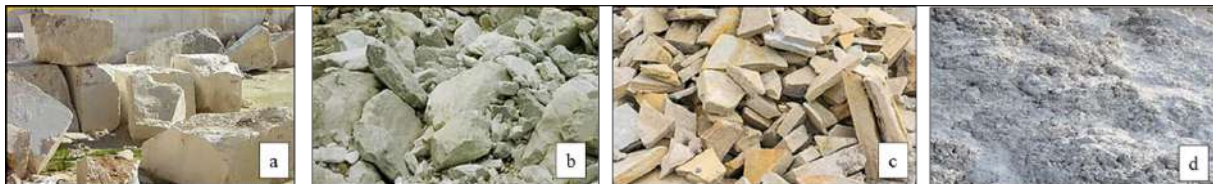


Figure 1. Natural stone wastes: a. blocks, b. rubble, c. slabs, d. dust and sludge (Jalalian et al., 2021)

Accordingly, Natural stone byproducts are categorized into three primary classifications. The first group includes solid wastes, which generally accumulate in stone quarries. The second group is dust wastes, which are generated during the extraction of stone blocks. The third group includes semi-sludge, sludge, and cake wastes, which are usually formed with the use of cooling water. This classification is made to determine the characteristics, threats, and potential industrial uses of the wastes. Each of these wastes has potential uses in different industries (Karaca et al., 2012).

Marble, which is the first thing that comes to mind when talking about natural stone and is even used synonymously with the term, is a metamorphic rock composed of crystalline grains such as calcite, dolomite, or serpentine. However, any type of stone that is not geologically marble but can produce smooth blocks and can be cut and processed is commercially considered natural stone. Therefore, the mineralogical and chemical compositions of natural stone wastes vary depending on the type of rock

from which the waste originates. Marble wastes contain a high proportion of calcium and magnesium carbonate, while igneous rocks like granite may contain hard and abrasive particles such as quartz.

AWJ Systems

In AWJ systems, water containing abrasive particles is directed at the workpiece (cut sample) surface under high pressure and high velocity in a controlled manner. The jet impacts the working surface, removing material through erosion, and thereby achieving the cutting process. AWJ technology finds extensive application across multiple sectors, including aviation, defense, automotive, and manufacturing. Besides cutting, it can be utilized for cleaning, turning, drilling, artistic surface treatment (text/shape), and many other purposes. In recent decades, its application in natural stone cutting and surface treatment has increased due to its advantages over traditional methods (Wang et al., 2021).

An AWJ system operates on two physical principles: the preparation of potential energy and the conversion of it into kinetic energy. Water is compressed to a high pressure via an intensifier system and is transported through pressure-resistant pipes to the mixing chamber in the cutting head. Here, it undergoes blending with abrasive particles fed from the abrasive tank or hopper and passed through a specially designed nozzle at high speeds. The resulting jet performs precise cutting on the workpiece surface. The energy transformation occurring at the point where the pressurized jet is directed causes the workpiece to fracture at the contact point (Akkurt, 2004).

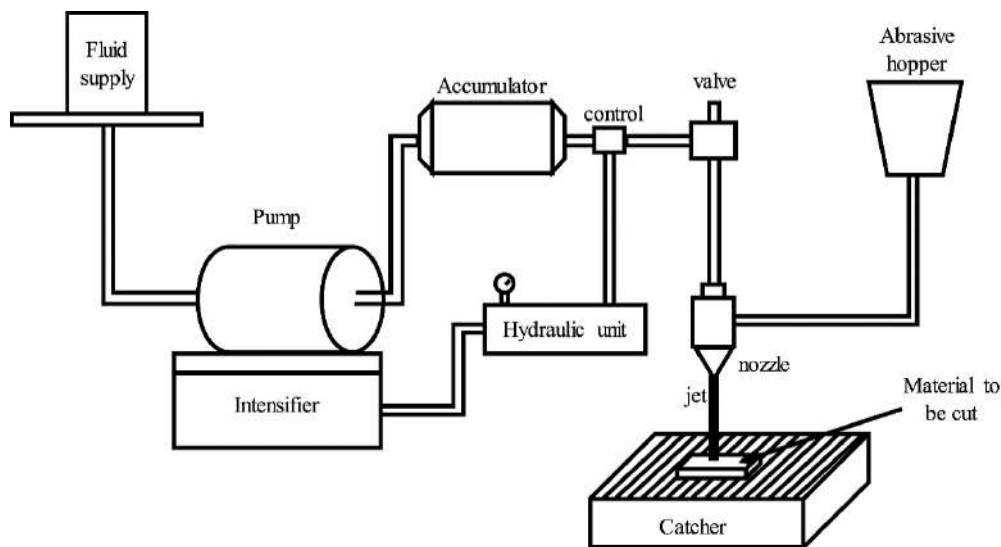


Figure 2. AWJ machine scheme (Rakshit and Das, 2019)

A standard AWJ system is schematically shown in Figure 2. This system typically comprises an electronic control panel, pump system, hydraulic unit, pressure regulator, accumulator, flexible high-pressure transmission pipes, on-off valve, abrasive feeding unit, and cutting head. Additionally, the AWJ machine includes a bellows (holding the cutting head, capable of three-dimensional/angular movement in most models), a table (containing grids on which the workpiece is placed), and a tank (storing abrasives, water, and material debris after cutting) (Kaya, 2022).

Abrasives

The performance of AWJ cutting operations largely hinges on the characteristics of the AWJ machine and adjustable parameters (such as pump pressure, traverse speed, stand-off distance, abrasive flow rate, nozzle length and diameter, etc.), the type of abrasive used, and the type and properties of the

workpiece. Performance criteria include material removal rate, cutting depth, cutting width, surface roughness/waviness, kerf angle, etc., depending on the objective (e.g., deeper cut or smoother cutting surface). In AWJ cutting, the primary component responsible for the cutting process is the abrasive particles. Abrasives with densities higher than water increase the jet's kinetic energy. Additionally, the abrasive erosion effect provided by the jet is higher due to the high hardness of the abrasives resulting from impact and friction. In AWJ cutting processes, each abrasive particle performs a micro-cutting operation. Therefore, the type of abrasive used also affects the cutting performance (Lebar and Junkar, 2014; Wang and Guo, 2003).

In AWJ applications, Garnet serves as a widely utilized abrasive material. However, studies in the literature also report the use of different materials such as granite, aluminum oxide, silicon carbide, olivine, and glass as abrasives (Agus et al., 1995; Axinte et al., 2009; Cosansu and Cogun, 2012; Aydin et al., 2017, 2019; Cha et al., 2021; Kaya et al., 2023). Natural stone wastes have potential for use as abrasives in this manner.

FEASIBILITY OF NATURAL STONE CUTTING WASTES AS ABRASIVES IN AWJ

To determine the suitable type of abrasive for cutting any material, the abrasives must meet requirements in terms of hardness, density, shape characteristics etc., and must not react with water. By examining natural stone wastes in terms of these factors, their potential for use as abrasives can be determined (Aydin and Karakurt, 2020).

Particle Size

Abrasive particle size lays a crucial role in determining cutting performance. Increasing abrasive size increases the kinetic energy of the jet to some extent, increasing the material removal rate. However, when using abrasives with excessively coarse particles, blockages may occur in the abrasive feed hose and nozzle, which can cause the machining process to stop and possibly damage the workpiece. The maximum particle dimension must remain below half the nozzle's diameter (Kaya, 2022). In the industry, nozzle diameters used in AWJs for natural stone cutting are generally between 1.0 and 1.2 mm. If the abrasive size is too small, the particles can accumulate and cause irregular feeds or splashes in the jet flow. Inconsistent distribution can create great difficulties for operators who need to adjust the abrasive feed rate to maintain cutting speed. Aydin (2015), showed that the performance of abrasives below 106 μm particle size decreases rapidly. Therefore, for effective cutting, abrasive particle sizes must be distributed within a certain range.

In natural stone cutting applications with AWJ, commercial Garnet, which is sold in bags with a particle size of 80 mesh, is generally used. A particle size distribution analysis was performed on a Mastersizer device with a sample taken from this Garnet (Table 1). Although 80 mesh is equal to 177 μm , the average size (d_{50}) of the Garnet particles was determined to be 311 μm in the analysis. The particle size distribution of 90% of the Garnet was found to be in the range of 218 - 439 μm .

Table 1. Particle size distribution of the Garnet

d	*d₁₀	*d₂₀	*d₅₀	*d₈₀	*d₉₀
Particle Size (μm)	218	246	311	392	439

* dx: Particle size under x% of material

Solid waste comes in a range of dimensions, spanning from mere millimeters to multiple meters in size (Karaca et al., 2012). However, the size of most solid particles in dust and sludge wastes is generally below 100 μm (Hacifazlioglu and Sahin, 2023). Therefore, only solid wastes can be made suitable for use as abrasives in AWJs by undergoing size reduction processes. The particle sizes of other waste types (dust, sludge, etc.) are too small for this use (Aydin vd., 2019). As a result; solid wastes can be obtained in the desired size ranges (e.g. -400+150 μm) by size reduction (crushing/grinding) and screening, and can be made suitable for use as abrasive in AWJ.

Particle Shape

The shape of the abrasive particle also has an effect on the desired process result (performance criterion). The corners of the abrasives provide high cutting force during cutting (Oh and Cho, 2016). This increases the material removal rate. In addition, lower cutting widths are obtained with angular abrasives, which reduces material loss. (Kaya, 2022). On the other hand, there are studies in which spherical particles are also successfully used as abrasives in AWJ (Kaya, 2022). In fact, before the abrasives hit the workpiece surface, they hit each other and the nozzle's internal surfaces with the effect of turbulence in the nozzle and undergo preliminary fragmentation (Du et al., 2021).

The images of the Garnet and natural stone particles (supplied from a quarry's waste site and subjected to size reduction) under the polarizing microscope and scanning electron microscope (SEM) are given in Figure 3. As can be seen, both materials have a partially angular particle shape.

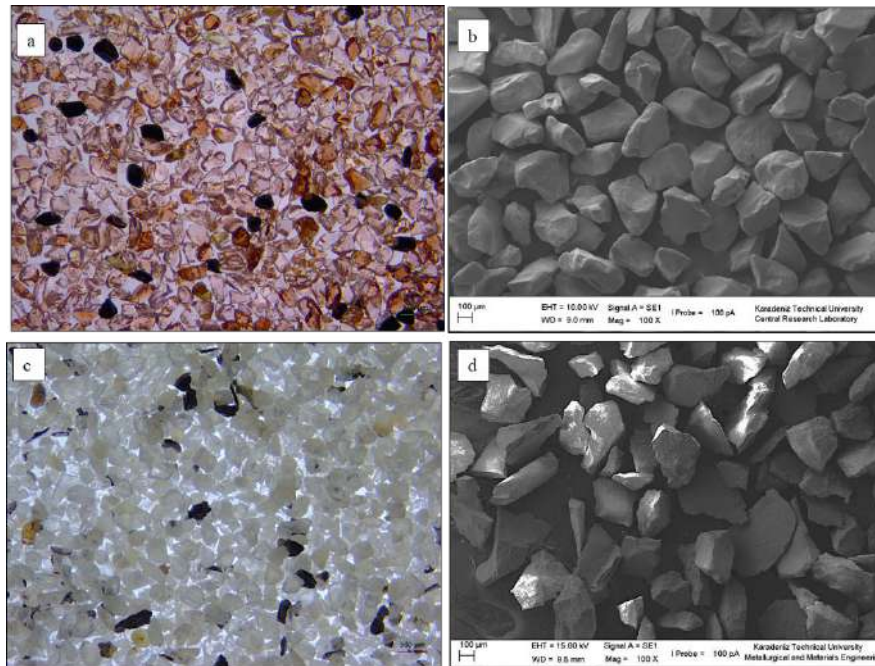


Figure 3. General view of the Garnet (a, b) and natural stone (c, d) particles under microscope (a, c: polarizing microscope; b, d: SEM)

Special processes must be applied to abrasives to give them a spherical particle form (Schillo-Armstrong et al., 2019). The predominant form of natural stone solid waste consists of offcuts irregular-edged stone pieces removed from the block to create uniform surfaces (Strzałkowski, 2021). As seen in Figure 3, these particle shapes are preserved after the size reduction stage. Hence, it is understood that these wastes are suitable for use as abrasives in AWJs in terms of their particle shapes.

Hardness and Density

As the hardness of the abrasive increases (and/or as the hardness of the workpiece decreases), the comparative hardness between the abrasive material and the workpiece will increase. In addition, the mechanism of hard abrasives to break and form sharp corners during acceleration in the jet is better than low-hardness abrasives (Oh and Cho, 2016). This facilitates the cutting process. Similarly, greater abrasive density leads to enhanced jet kinetic energy. Therefore, the cutting depth increases with harder and more dense abrasives (Kaya, 2022). However, as the abrasive hardness increases, the wear of the nozzle increases and its life shortens (Perec et al., 2019). This increases the process cost. Abrasive particles with very high densities also have difficulty moving with water and can separate from water at the nozzle exit (Babu and Krishnaiah, 2003). As a result, the cutting performance decreases. In addition, the cutting surface quality is also negatively affected by increasing abrasive density and hardness (Karakurt et al., 2010; Kaya, 2022). Therefore, abrasive density and hardness may have different effects on the desired performance output. If a deep cut is desired, a harder and denser one should be preferred, on the contrary, if a kerf (cut) that is not deep but has better surface quality (low surface roughness/waviness) is desired, a lower hardness and density abrasive should be preferred. Hence, it is necessary to optimize the hardness and density considering the reasons mentioned above.

The hardness values of the Garnet minerals on the Mohs scale are approximately between 6-7,5 (Baxter et al., 2013). The specific gravity of the Garnet was found to be 4,03 by performing the Pycnometer test in the ASTM D854-14 (2014) standard. The hardness and density values of natural stone waste depend on factors such as the type of rocks forming the waste, its mineralogical content, etc. While the Mohs hardness values can be 6-6,5 in magmatic rocks such as granite with high quartz content, this value is around 3 in marbles of CaCO_3 origin. Density values are lower in rocks such as tuff and higher in marble-granites and can vary between 2-3 gr/cm^3 . There are studies in the literature where soft materials such as plastic granule (~3 Mohs) and colemanite powder (~4 Mohs), and very hard materials such as aluminum oxide (~9 Mohs) and silicon carbide (~9,5 Mohs), have been successfully used as abrasives in AWJ (Agus et al., 1995; Axinte et al., 2009; Cosansu and Cogun, 2012; Aydin et al., 2017, 2019; Cha et al., 2021; Kaya et al., 2023). The abrasive densities used in related studies also vary between approximately 1,5-7 g/cm^3 . In conclusion, products prepared by size reduction from natural stone wastes are in the hardness and density range that can be used as abrasives in AWJ depending on the type of workpiece to be cut and/or the desired process result.

Cost

The total manufacturing cost of AWJ cutting can be categorized into three primary components: capital investment, operational expenses, and labor costs. The capital investment pertains to the acquisition of necessary equipment. Operational expenses cover various aspects of process execution, including electricity and water consumption, abrasive material usage, wear-part replacement, and ongoing maintenance and repair. Labor costs involve machine operation, encompassing the handling of raw materials, finished components, and residual materials, as well as overseeing the machinery during its functioning. In AWJ cutting applications, abrasive cost accounts for the largest portion of operating costs (~%67) (Radovanovic, 2007, 2013). Garnet and other abrasives used in small amounts in AWJ are sold as commercial products. Naturally, using materials such as natural stone waste, which do not have any cost in supply (only transportation and size reduction), as abrasives in AWJ will provide a great advantage in terms of cost.

CONCLUSIONS

It has been determined that natural stone solid waste, which has environmental hazards and whose accumulation is increasing day by day, can be used as a substitute abrasive in AWJ application, in the light of the following reasons:

1. Solid natural stone wastes can be brought to a size suitable for use as abrasives in AWJ by undergoing size reduction processes.
2. Solid natural stone wastes are suitable for use as abrasives in AWJ based on their particle shapes (angular).
3. Solid natural stone wastes can be used as abrasives in AWJ based on hardness and density (although it varies according to the type of source rocks and their physical properties); depending on desired process result (deep cutting, surface treatment, etc.), cutting performance outputs (cutting depth, surface roughness, etc.), and the type of workpiece to be cut (hard or soft).
4. Since a large part of the operation cost in AWJ is abrasive supply and only the transportation and size reduction cost is required for using solid natural stone wastes as alternative abrasives in AWJ, they are economical to use in this manner. By this way, waste disposal will be ensured and costs will be reduced in one area of the industry.

REFERENCES

- Agus, M., Bartolussi, A., Ciccu, R., Imolesi, E., Vargiu, A. (1995). Stone Cutting with Diajet. Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali (DIGITA)- Centro Studi Geominerari e Mineralurgici del CNR. Università degli Studi di Cagliari, Italy.
- Akkurt, A. (2004). Su jeti ile kesme sistemleri ve uygulama alanlarının değerlendirilmesi. *Politeknik*, 7(2), 129–139.
- Altindag, R. (2018). Doğaltaş ocaklarında artık oluşumunun önlenmesi ve artıkların değerlendirilmesi. In T. Guler & E. Polat (Eds.), *Mermer Madenciliğinde Çevresel Yaklaşımlar* (ss. 35–50). Muğla Büyükşehir Belediyesi Kültür Yayınları-6, Akademik Yayın Dizisi-1.
- ASTM. (2014). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer (D854-14). ASTM International.
- Axinte, D. A., Srinivasu, D. S., Kong, M. C., Butler-Smith, P. W. (2009). Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(10), 797–803.
- Aydin, G. (2015). Performance of recycling abrasives in rock cutting by abrasive water jet. *Journal of Central South University*, 22(3), 1055–1061.
- Aydin, G., Kaya, S., Karakurt, I. (2017). Utilization of solid-cutting granite waste as an alternative abrasive in abrasive waterjet cutting of marble. *Journal of Cleaner Production*, 159, 241–247.
- Aydin, G., Kaya, S., Karakurt, I., Yildirim, F. (2019). Aşındırıcılı sujetiyile doğaltaş kesmede granit atıklarının aşındırıcı olarak değerlendirilmesi. *Madencilik*, 58(3), 211–218.
- Aydin, G., Karakurt, I. (2020). Doğaltaş üretim ve işleme tesisi atıklarının değerlendirilmesi. *ALKU Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 62–77.

Babu, M. K., Krishnaiah, O. V. (2003). Studies on abrasive waterjet machining of black granite through design of experiments. *Experimental Techniques*, 27(5), 49–54.

Baxter, E. F., Caddick, M. J., Ague, J. J. (2013). Garnet: Common mineral, uncommonly useful. *Elements*, 9(6), 415–419.

Cha, Y., Oh, T.-M., Joo, G.-W., Cho, G.-C. (2021). Performance and reuse of steel shot in abrasive waterjet cutting of granite. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(4), 1551–1563.

Cosansu, G., Cogun, C. (2012). An investigation on use of colemanite powder as abrasive in abrasive waterjet cutting (AWJC). *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(8), 2371–2380.

Du, M., Wang, H., Dong, H., Guo, Y., Ke, Y. (2021). Numerical research on multi-particle movements and nozzle wear involved in abrasive waterjet machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(9-10), 2845–2858.

Hacifazlioglu, H., Sahin, H. (2023). Cevher hazırlama tesislerinden çıkan atıklar ve yönetimi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(1), 119–133.

Jalalian, M. H., Bagherpour, R., Khoshouei, M. (2021). Wastes production in dimension stones industry: resources, factors, and solutions to reduce them. *Environmental Earth Sciences*, 80(16), 560.

Karaca, Z., Pekin, A., Delormanlı, A. H. (2012). Classification of dimension Stone wastes. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(6), 2354–2362.

Karakurt, İ., Aydın, G., Aydın, K. (2010). Aşındırıcılı su jeti ile kesmede kesme parametrelerinin granit yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Yerbilimleri*, 31(2), 99–110.

Kaya, S. (2022). Aşındırıcılı su jeti ile doğaltaş kesmede alternatif aşındırıcıların performanslarının deneysel incelenmesi. *Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Kaya, S., Aydın, G., Karakurt, I. (2023). An experimental study on the cutting depth produced by abrasive waterjet: how do abrasive and rock properties affect the cutting process? *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(9-10), 4811–4823.

Lebar, A., Junkar, M. (2004). Simulation of abrasive water jet cutting process: Part 1, Unit Event Approach. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12(6), 1159–1170.

Mosafari, M., Dianat, I., Khatibi, M. S., Mansour, S. N., Fahiminia, M., Hashemi, A. A. (2014). Review of environmental aspects and waste management of stone cutting and fabrication industries. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(4), 721–730.

Natural Stone Council. (2009). Solid waste management at the quarry and fabrication facility. *Best Practices of the Natural Stone Industry*. University of Tennessee Center for Clean Production.

Oh, T.-M., Cho, G.-C. (2016). Rock cutting depth model based on kinetic energy of abrasive waterjet. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(3), 1059–1072.

Papantonopoulos, G., Taxiarchou, M., Bonito, N., Adam, K., Christodoulou, I. (2007). A study on best available techniques for the management of stone wastes. *3rd International Conference on Sustainable Development Indicators in the Minerals Industry*. Milos Island, Greece.

Perec, A., Pude, F., Grigoryev, A., Kaufeld, M., Wegener, K. (2019). A study of wear on focusing tubes exposed to corundum-based abrasives in the waterjet cutting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9-12), 2415–2427.

Radovanovic, M. (2007). Abrasive waterjet cutting cost. *Nonconventional Technologies Review*, 1(2), 97–102.

Radovanovic, M. (2013). Cost optimization of abrasive water jet cutting using ga. *Tribological Journal BULTRIB*, 3(1), 70–75.

Rakshit, R., Das, A. K. (2019). A review on cutting of industrial ceramic materials. *Precision Engineering*, 59, 90–109.

Schillo – Armstrong, M. C., Goers, B. D., Eckel, J. B. (2019). Method of shape sorting crushed abrasive particles (U.S. Patent No. 10,350,642 B2). U.S. Patent and Trademark Office.

Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., Bhunia, D. (2017). A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. *Journal of Building Engineering*, 13, 87–95.

Strzałkowski, P. (2021). Characteristics of waste generated in dimension stone processing. *Energies*, 14(21), 7232.

Ural, N., Yakse, G. (2020). Utilization of marble piece wastes as base materials. *Open Geosciences*, 12(1), 1247–1262.

Wang, J., Guo, D. M. (2003). The cutting Performance in multipass abrasive waterjet machining of industrial ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(3), 371–377.

Wang, S., Yang, F., Hu, D., Tang, C., Lin, P. (2021). Modelling and analysis of abrasive water jet cutting front profile. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(9-10), 2829–2837.

Yurdakul, M. (2020). Natural stone waste generation from the perspective of natural stone processing plants: An industrial-scale case study in the province of Bilecik, Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123339.

MERMER MADENCİLİĞİNDE ÇEVRESEL ETKİ DEĞERLENDİRME (ÇED) SÜREÇLERİNDE KARŞILAŞILAN SORUNLARIN MADEN MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

*EVALUATION OF ISSUES ENCOUNTERED IN ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT (EIA)
PROCESSES OF MARBLE MINING FROM A MINING ENGINEERING PERSPECTIVE*

T. Mallı, A.H. Deliormanlı*

Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

**Sorumlu yazar: ahmet.deliormanli@deu.edu.tr*

ÖZ

Mermer madenciliğinde Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) süreçleri, teknik, çevresel ve işletme güvenliği açısından çeşitli mühendislik problemlerini içermektedir. Öncelikli olarak yetersiz jeolojik, hidrojeolojik ve geoteknik analizler, sahaların uzun vadeli madencilik planlamasını olumsuz etkilemekte ve ÇED süreçlerinde eksikliklere neden olmaktadır. Kesim ve işleme teknolojilerinin modernizasyonundaki eksiklikler, yüksek toz emisyonları ve gürültü kirliliği gibi çevresel etkileri artırmaktadır. Blok veriminin düşük olması, ocak işletmelerinde ciddi miktarda atık oluşmasına sebep olmakta, ancak bu atıkların sürdürülebilir şekilde değerlendirilmesine yönelik yeterli yönetim stratejileri bulunmamaktadır. Atık yönetimi ve arazi rehabilitasyonu da ÇED süreçlerinde önemli bir mühendislik problemidir. Mermer üretimi sonucunda oluşan moloz ve mermer tozları, su kaynaklarına karışarak ekolojik dengenin bozulmasına neden olabilir. Ayrıca, birçok mermer ocağında rehabilitasyon planlarının yetersiz uygulanması, ÇED yönetmeliklerinde öngörülen çevresel koruma önlemlerinin tam olarak sağlanamamasına yol açmaktadır. Bunlara ek olarak, iş güvenliği ve sürdürülebilir madencilik uygulamalarındaki eksiklikler, çalışanlar açısından risk faktörleri oluşturmakta ve ocakların ekonomik ömrünü olumsuz etkilemektedir. Doğru rezerv modelleme ve madencilik planlamasının yetersizliği, mermer sahalarının verimli şekilde işletilmesini engelleyerek ekonomik ve çevresel kayıpları artırmaktadır. Bu çalışma kapsamında, bilimsel ve teknolojik yaklaşımlar temel alınarak mermer madenciliğinde sürdürülebilirlik, çevresel uyum ve verimli üretim süreçlerinin geliştirilmesi, ÇED süreçlerindeki sorunların minimize edilmesi açısından kritik önem taşıyan parametreler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mermer Madenciliği, Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED)

ABSTRACT

Environmental Impact Assessment (EIA) processes in marble quarrying encompass a wide range of engineering challenges related to technical, environmental, and occupational safety concerns. In particular, insufficient geological, hydrogeological, and geotechnical analyses adversely affect the long-term mine planning of quarry sites, leading to critical deficiencies in EIA documentation. Moreover, the lack of modernization in cutting and processing technologies exacerbates environmental impacts such as elevated dust emissions and noise pollution. Low block recovery rates contribute to significant waste generation at quarry sites, yet strategic approaches for the sustainable management of these wastes remain inadequate. Waste management and land rehabilitation represent key engineering issues within the scope of EIA processes. The debris and marble dust generated during production may infiltrate water resources, thereby disrupting local ecological balances. Furthermore, the insufficient implementation of rehabilitation plans in many quarry operations hinders the effective realization of the environmental protection measures stipulated in EIA regulations. Deficiencies in occupational safety and sustainable

mining practices pose substantial risks to workers and negatively impact the economic lifespan of quarry operations. The absence of accurate reserve modeling and efficient mine planning further impedes the productive exploitation of marble deposits, leading to increased economic and environmental losses. This study examines the critical parameters essential for enhancing sustainability, environmental compliance, and production efficiency in marble quarrying, grounded in scientific and technological approaches. The aim is to mitigate prevalent shortcomings in EIA processes through comprehensive analysis and strategic engineering interventions.

Keywords: Marble quarry, Environmental Impact Assessment (EIA)

1. GİRİŞ

Mermer madenciliği, Türkiye'nin hem doğal kaynak zenginliği hem de ihracat potansiyeli açısından stratejik sektörlerinden biridir. Ülkemiz önemli mermer rezervlere sahiptir. Bu rezervlerin önemli bir bölümü Afyonkarahisar, Bilecik, Muğla ve Denizli gibi illerde işletilmektedir (Koç ve Bilgen, 2015). 2023 verilerine göre, Türkiye dünya mermer üretiminde ilk beş ülke arasında yer almakta, ihracatının büyük kısmını Çin, Hindistan ve ABD gibi ülkelere gerçekleştirmektedir (TÜİK, 2023). Ancak mermer üretiminin özellikle açık işletme yöntemleriyle yapılması, çevresel açıdan yoğun bir baskı yaratmaktadır.

Madencilik faaliyetlerinin doğaya olan etkilerini minimize etmeye yönelik en temel hukuki ve çevresel araçlardan biri, Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) sistemidir. ÇED; projelerin uygulanmasından önce çevresel etkilerinin öngörülmesini, bu etkilerin en aza indirilmesine yönelik önlemlerin alınmasını ve projelere çevresel sürdürülebilirlik kriterlerine göre onay verilmesini sağlayan bilimsel bir süreçtir (Glasson et al., 2012). Türkiye’de 1993 yılından bu yana uygulanmakta olan ÇED Yönetmeliği, madencilik projeleri için belirli kapasite ve alan eşiklerinin aşılması durumunda süreci zorunlu hale getirmiştir. Örneğin 25 hektardan büyük mermer ocaklarında “ÇED Olumlu” kararı gerekirken, daha küçük ölçekli projelerde genellikle “ÇED Gerekli Değildir” kararı verilmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022).

Ancak uygulamada bu eşik değerleri, çevresel riskin etkin değerlendirilmesini engelleyici bir unsur haline gelmiştir. Proje sahiplerinin sahaları yapay olarak 25 hektar altında göstermesiyle ÇED süreçlerinden kaçınmaları, çevresel denetimin etkisizleşmesine yol açmaktadır (Demirtaş ve Keleş, 2020). Bunun yanı sıra proje tanıtım dosyalarının (PTD) teknik içeriği çoğu zaman yetersiz kalmakta, su kaynaklarına, orman ekosistemlerine, zeytinliklere ve yerleşim alanlarına olan etkiler yüzeysel biçimde ele alınmaktadır. Örneğin Bozyazı’da açılmak istenen bir mermer ocağına ilişkin bilirkişi raporları, PTD’de yer almayan birçok ciddi çevresel etkiyi ortaya koymuş; zeytinliklerin, seraların ve yeraltı su kaynaklarının zarar göreceği sonucuna ulaşmıştır (Evrensel, 2023).

ÇED sürecinin en tartışmalı unsurlarından biri de halk katılımı mekanizmasının işleyişidir. Katılım toplantılarının danışmanlık firmalarınca yönlendirilmesi, halkın gerçek anlamda sürece dahil edilmesini engellemekte, çevresel adaletin gerçekleşmesini zorlaştırmaktadır (Doğa Derneği, 2022). Ayrıca rehabilitasyon taahhütleri uygulamada çoğu zaman eksik kalmakta; özellikle topografyası karmaşık alanlarda sağlık koruma bantları işlevsizleşmekte ve doğa tahribatı kalıcı hale gelmektedir (Akbulut ve Eroğlu, 2022).

Bu çalışma, Türkiye’de mermer madenciliği özelinde yürütülen ÇED uygulamalarının yapısal sorunlarını analiz etmeyi ve bu süreçlerin çevresel koruma kapasitesini artırmaya yönelik çözüm önerileri sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma, ilgili mevzuat, bilimsel literatür, bilirkişi raporları ve mahkeme kararları üzerinden derinlemesine bir inceleme ortaya koymayı hedeflemektedir.

2. YASAL MEVZUATTAKİ BOŞLUKLAR VE “ÇED GEREKLİ DEĞİLDİR” KARARLARI

Türkiye’de Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) süreci, 1993 yılında yürürlüğe giren 2872 sayılı Çevre Kanunu’na dayanarak yapılandırılmış ve 2022 yılı itibarıyla çok sayıda güncelleme geçirmiştir. Bu düzenleme, çevreye olası etkileri olan yatırımların planlama aşamasında denetlenmesini amaçlamakta; projelerin çevre, sağlık, sosyoekonomik yapı ve doğal kaynaklar üzerindeki etkilerinin öngörülmesini sağlamaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022). Ancak uygulamadaki bazı yapısal zafiyetler, özellikle madencilik projelerinde çevresel denetim kapasitesini sınırlamakta ve çevresel etkilerin büyük oranda göz ardı edilmesine yol açmaktadır.

Yönetmelik uyarınca, belirli eşik değerlerin altında kalan projeler için “ÇED Gerekli Değildir” kararı verilebilmektedir. Mermer madenciliğinde bu sınır 25 hektar olarak belirlenmiş olup bu büyüklüğün altındaki projeler tam ÇED sürecinden muaf tutulmakta, yalnızca proje tanıtım dosyası üzerinden değerlendirme yapılmaktadır (Demirtaş ve Keleş, 2020). Bu yaklaşım, yatırımcıların projelerini kademeli şekilde bölerek ilk aşamada 25 hektar altında gösterme ve “ÇED Gerekli Değildir” kararı alma yoluyla yasal denetimden kaçınmalarına olanak tanımaktadır (TMMOB, 2021).

Literatürde bu duruma “proje bölme” stratejisi adı verilir ve yalnızca Türkiye’ye özgü olmayıp, ÇED süreçlerinin etkin işlemediği diğer ülkelerde de karşılaşılan bir uygulamadır (Glasson et al., 2012). Ancak Türkiye örneğinde bu strateji oldukça yaygın biçimde kullanılarak, çevresel etkilerin sistematik biçimde görünmez kılınmasına yol açmaktadır (Doğa Derneği, 2022). Projelerin zaman içinde genişletilmesiyle birlikte, başlangıçta eksik değerlendirilmiş etkiler daha büyük ve geri dönüşü olmayan tahribatlara yol açabilmektedir.

Bu bağlamda “ÇED Gerekli Değildir” kararlarının içeriği de ayrı bir sorun alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Hukuki açıdan bu karar, projenin çevreye hiçbir etkisinin bulunmadığı anlamına gelmemekte; yalnızca sınırlı bir etki potansiyeli taşıdığı gerekçesiyle tam ÇED sürecine tabi olmadığı anlamına gelmektedir (Erdal ve Durusoy, 2019). Ancak uygulamada bu karar kamuoyunda ve yerel halkta yanlış biçimde “projenin çevreye zararsız olduğu” şeklinde algılanmakta; bu durum çevresel risklerin meşrulaştırılmasına ve halk katılımının bastırılmasına neden olmaktadır.

Ayrıca denetim mekanizmalarının yetersizliği, “ÇED Gerekli Değildir” kararı verilen projelerde saha uygulamalarının izlenmesini zorlaştırmakta; birçok proje, rehabilitasyon taahhütlerini yerine getirmeden faaliyetlerine devam etmektedir. Bu durum yalnızca ekolojik dengenin değil, yasal güvenliğin ve kamusal denetimin de zayıflamasına yol açmaktadır (Akbulut ve Eroğlu, 2022).

Sonuç olarak, mevcut mevzuatta yer alan eşik değerlerinin ve muafiyet uygulamalarının yeniden gözden geçirilmesi gereklidir. Özellikle ekolojik açıdan hassas bölgelerde, proje büyüklüğünden bağımsız olarak etkilerin kapsamlı biçimde değerlendirilmesi; “ÇED Gerekli Değildir” kararlarının daha sıkı bilimsel denetime tabi tutulması ve kamuoyuna açık, anlaşılır şekilde gerekçelendirilmesi önerilmektedir.

3. TEKNİK VE İÇERİKSEL EKSİKLİKLER

Mermer madenciliğine ilişkin Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) süreçlerinde teknik içerik yetersizlikleri, projelerin doğa, insan ve ekonomik sistem üzerindeki etkilerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesini engelleyen başlıca sorunlardan biridir. ÇED raporları ve Proje Tanıtım Dosyaları (PTD), doğrudan danışmanlık firmaları tarafından hazırlanmakta ve çoğunlukla yatırımcının menfaatlerini önceleyen bir yaklaşımla düzenlenmektedir. Bu durum, raporların bilimsel tarafsızlığını zayıflatmakta ve çevresel etki analizlerinde ciddi boşluklara neden olmaktadır (Koç ve Bilgen, 2015; Erdal ve Durusoy, 2019).

Özellikle tarım alanları, su kaynakları, zeytinlik sahaları ve hassas ekosistemler üzerindeki etkilerin, proje dosyalarında ya hiç yer almadığı ya da yetersiz düzeyde ele alındığı görülmektedir. Mersin Bozyazı’da kurulması planlanan bir mermer ocağına ilişkin hazırlanan bilirkişi raporu, ocak faaliyetlerinin çevredeki seralar, zeytinlikler ve yeraltı su kaynakları üzerinde doğrudan ve ciddi zararlar doğuracağına işaret etmiş; bu etkilerin hiçbirinin proje dosyasında bilimsel temelde analiz edilmediğini ortaya koymuştur (Evrensel, 2023).

Toz, titreşim ve atık su gibi doğrudan etkilerin yanı sıra; ekosistem parçalanması, yaban hayatı göç yollarının kesilmesi ve mikro iklim etkileri gibi ikincil etkiler de çoğunlukla göz ardı edilmektedir. Bu durum, madencilik faaliyetlerinin kümülatif etkilerinin değerlendirilmemesine neden olmakta; her proje tekil birim olarak ele alındığından, bölgesel çevresel bozulma daha görünmez hale gelmektedir (Akbulut ve Eroğlu, 2022).

Ayrıca mevcut raporların büyük bölümü, “yerinde ölçüm”, “uydu görüntüleri” veya “modelleme teknikleri” gibi çağdaş yöntemlerden yoksundur. Raporda belirtilen değerler çoğu zaman saha verisine değil, genel çevresel varsayımlara dayandırılmakta; bu da karar vericiler açısından yanıltıcı sonuçlara yol açmaktadır (Demirtaş ve Keleş, 2020). Bilimsel yöntemden sapmanın en somut örneği, yeraltı su akışlarının ya tamamen ihmal edilmesi ya da yalnızca genel jeolojik tanımlamalarla geçiştirilmesidir.

Tüm bu eksiklikler, yalnızca çevre sağlığını değil, aynı zamanda projeye yönelik yargı süreçlerini de etkilemektedir. Bilirkişi heyetleri, son yıllarda artan sayıda dava dosyasında, PTD ve ÇED belgelerinin yetersizliğine dayanarak iptal kararları önermektedir. Bu durum, ÇED belgelerinin yalnızca formalite olarak düzenlendiği algısını pekiştirmektedir (TMMOB, 2021).

4. PTD VE ÇED RAPORLARININ MADEN MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

PTD ve ÇED belgelerinin hazırlanmasında maden mühendisliği disiplini açısından ele alınacak konuların başlıkları aşağıda sunulmuştur. Bunlar;

1. Sahanın jeolojik ve jeoteknik açıdan incelenmesi
2. Rezerv tespiti ve blok hacmi,
3. Ocak planlaması,
4. Pasa sahası planlaması,
5. Ocak ve pasa sahası şev stabilite analizleri,
6. Ocak rehabilitasyonu,

4.1 Sahanın Jeolojik ve Jeoteknik Açıdan İncelenmesi

Mermer ocaklarının sürdürülebilir işletilmesi için jeolojik formasyon ve jeoteknik parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerekir. Türkiye’de özellikle mermer ocaklarında verimlilik sıkça düşüktür. Bu nedenle mermer ocaklarında üretim verimliliğini artırmak ve saha güvenliğini temin etmek amacıyla jeolojik ve jeoteknik çalışmalar kritik öneme sahiptir. Bu çalışmalar yukarıda belirtilen diğer çalışma başlıklarını da direkt olarak etkilemektedir. Mermer sahalarında özellikle genel jeolojik veri ile birlikte süreksizlik düzlemlerinin özellikleri ve yönelimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Mermer sahalarından en az kayıpla ticari boyutlarda mermer üretiminin gerçekleştirilebilmesi için; jeolojik faktörlere bağlı olarak, ocak işletme yönü ve üretim kademelerinin, sahada mevcut çatlak ve kırık sistemlerine göre tasarımına yönelik sahadaki çatlak yapısı, mermer damarının ve çevre kayalarındaki hâkim süreksizlikler ve eklem takımları gibi yapısal özelliklerinin araştırılması gerekmektedir.

4.2 Rezerv Tespiti ve Blok Hacmi

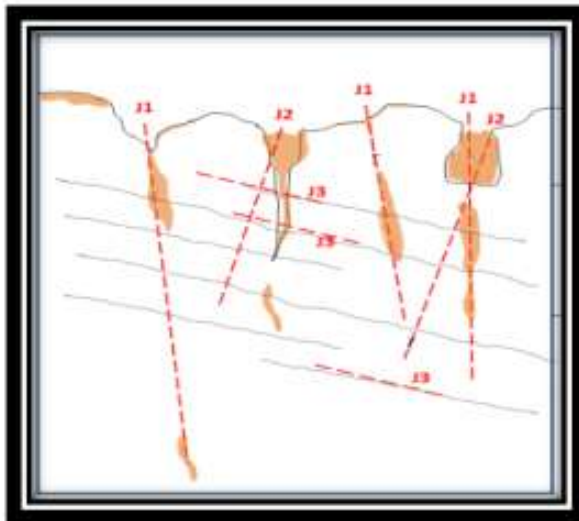
Uluslararası otoriteler tarafından kabul görmüş olan kaynak ve rezerv belirleme kriterlerine göre mermer sahalarındaki çalışmalarda aşağıdaki hususların dikkate alınması suretiyle kaynak-rezerv kavramlarının incelenmesi öngörülmektedir (UMREK, 2018). Sahadaki kaynak olarak belirlenmiş olan oluşumdan görünür rezerve geçişte ve madencilik operasyonu ile kazanılabilecek rezervin belirlenmesinde aşağıdaki parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

EAF (Eklem açıklığı faktörü): % olarak eklem boşlukları yüzünden üretimi yapılamayacak hacim yüzdesi (Şekil 1).



Şekil 1. Eklem açıklığı faktörü

KF (Karstik faktörü): % olarak karstik boşlukların tahmini hacim yüzdesi (saha analizleri ve sondaj karot loglarından üretilecek) (Şekil 2).



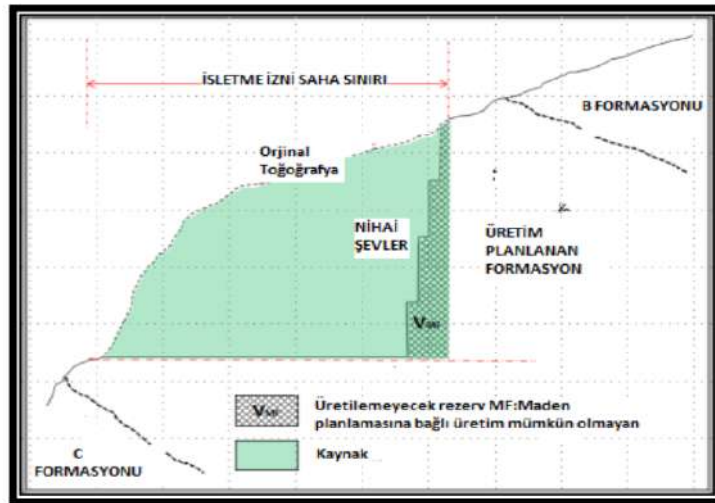
Şekil 2. Karstik faktörü

AF (Ayrışma Faktörü): % olarak ayrılmış kaya hacim yüzdesi (saha analizleri ve sondaj karot loglarından üretilecek) (Şekil 3).



Şekil 3. Ayrışma faktörü

MF (Madencilik Faktörü): % olarak hedef damardaki maden tasarım ve planlamasına bağlı üretilmeyecek hacim yüzdesi (Ocak şekline bağlı nihai şev dizaynı sonucu üretilmeden bırakılacak ve ekonomik olarak üretilmeyecek rezerv miktarının hacimsel oranı) (Şekil 4).



Şekil 4. Madencilik faktörü

KLF (Kalite Faktörü): % olarak üretimi hedeflenen doğaltaşın pazardaki talep edilen kalite (renk, desen, kristal tane boyutu, doku, arıza ve kusurlar vb. ile renk-desen-kristal tane boyutunun sahadaki dağılımı gibi özellikler) dışı üretimi hedef dışı bırakılabilecek hacimsel yüzde (Belirlenebilmesi durumu da sahadaki kalite dağılımı da harita üzerinde verilmelidir).

EF (Eklem Faktörü): % olarak üretimi planlanan doğaltaş oluşuma ait hacimsel ekleme takımı sayısı (J_v) ve buna bağlı hesaplanacak üretilabilir ticari blok boyutu (V_b) Buna bağlı olarak sahaya ait blok kazanım oranına bağlı üretilmeyecek rezervin hacimce % sel oranı

Yukarıdaki faktörlerin de göz önünde bulundurulması ile ölçülmüş görünür rezerv aşağıdaki formül ile belirlenmektedir.

$$Toplam\ Ölçülmüş\ Görünür\ Rezerv\ (m^3) = TÖGR \quad (1)$$

$$TÖGR = Ölçülmüş\ Kaynak - (EAF + KF + AF + MF + KLF + EF) \quad (2)$$

Boyutlanmış doğaltaş madenciliğinde birim ürün başına (1 m³ blok üretimi için) doğadan kazılacak hacim miktarı genelde çok büyük oranlarda olabilmektedir. Bir mermer ocak işletmesinde ticari blok kazanım oranının büyüklüğü ve artık madde miktarının büyüklüğü işletmenin karlılığını direk etkileyen en önemli hususlardır. Ticari Blok Kazanım Oranı (Ocak Verimi) basit olarak aşağıdaki formül ile verilmektedir.

$$Ov(\%) = Ocb/Ot \quad (3)$$

Burada;

Ocb = Ticari Blok Hacmi, m³

Ot= Kesilen Toplam Kaya Kütlesi Hacmi, m³

4.3 Ocak Planlaması

Mermer ocaklarında üretim planlaması, jeolojik verilerle desteklenen rezerv modellemesi, üretim döngülerinin tanımlanması, çevresel uygunluk ve operasyon verimliliğinin birleşimidir. Yaygın olarak mermer madenciliğinde açık işletme yöntemi kullanılmaktadır. Blok üretimleri genel olarak tel kesme ya da kollu kesiciler kullanılarak yapılmaktadır. Bazı ocaklarda bu yöntemlerin kombine olarak kullanılması da mümkündür. Ocak planlamasında özellikle işletme izin sınırları içinde kalan rezervin üretimine yönelik planlamanın yapılması ve bu planlamada belirlenen uygun açık ocak basamak geometrisinin kullanılması gerekmektedir. Açık ocak planlamasının ve buna bağlı ocak geometrisinin şev stabilite analizleri ile duraylılıklarının kontrol edilmesi zorunluluktur.

4.4 Pasa Sahası Planlaması

Mermer ocaklarında pasa sahası planlaması yalnızca atık yönetimi değil, çevresel sürdürülebilirlik ve saha güvenliği açısından da önemlidir. Jeoteknik analizler, drenaj kontrolü, alan seçimi ve rehabilitasyon adımları birlikte ele alınarak pasa sahaları, açık ocakların sorunsuz işletilmesine katkı sağlar. Türkiye’de bu alanın yasal ve mühendislik boyutlarıyla daha sistematik ele alınması gerekmektedir. Pasa malzemesi genellikle kırıklı, çatlaklı ya da estetik açıdan düşük kaliteli atık malzeme olarak tanımla bilir. Mermer madenciliğinde düşük verim nedeni ile yüksek pasa miktarlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, sahada büyük hacimli pasa yığınlarının oluşmasına ve dolayısıyla çevresel, görsel ve jeoteknik sorunlara neden olmaktadır (Çetiner vd., 2006, Mutlutürk ve Altındağ, 2009, Eraslan, 2014).

Pasa sahası planlamasında dikkate alınması gereken unsurlar aşağıda verilmiştir. Bunlar;

Lokasyon Seçimi

1. Pasa sahası, üretim alanına yakın ama üretim süreçlerini engellemeyecek konumda olmalıdır.
2. Taban kayaç su geçirmez olmalı, sızma ve kirlenme riski azaltılmalıdır.
3. Heyelan riski düşük, eğimi %15’ten az olan bölgeler tercih edilmelidir.
4. Jeolojik olarak kararlı formasyonlar seçilmeli; zayıf zeminlerden kaçınılmalıdır.

Hacim ve Geometri Tasarımı

1. Günlük/aylık/ yıllık pasa üretim miktarına göre hacim belirlenir.

2. Yığının yüksekliği ve şev açısı, malzeme türüne ve iç sürtünme açısına göre hesaplanır.
3. Basamaklı (teraslı) yığın tasarımı ile stabilite artırılır ve erozyon riski azaltılır. Ancak mermer ocaklarında pasa sahalarında bu yapıyı oluşturmak oldukça zordur.

Drenaj ve Yüzey Suyu Kontrolü

1. Yağmur ve yeraltı suyu sızıntılarını kontrol altına almak için drenaj sistemleri (dren kanalları, borular) kurulur.
2. Yüzey suyu birikimini önleyecek şekilde eğim verilmelidir.

Erişim ve Ulaşım

1. Pasa sahasına kamyon, yükleyici ve diğer iş makinelerinin güvenli erişimini sağlayacak yollar planlanmalıdır.
2. Taşıma yolları ile üretim yolları kesişmemeli ve trafik yoğunluğu engellenmelidir.

Peyzaj ve Görsel Etki Yönetimi

1. Pasa sahaları bitkilendirme ile çevresel uyuma kavuşturulmalı.
2. Estetik bozulma azaltılmalı; görünür yamaçlar yeşil perdeleme ile kapatılmalıdır.

4.5 Ocak ve Pasa Sahası Şev Stabilite Analizleri

Türkiye bulunan mermer üretim sahalarında oldukça fazla süreksizlik takımları mevcuttur. Bu durum ocaklarda blok verimini de düşürdüğü gibi açık ocak şevlerinde stabilite sorununa neden olmaktadır. Bu durum üretim riskini de arttırmaktadır. Birkaç eklem setinin hakim olduğu ve nispeten geniş aralıklara sahip kaya kütlelerinde açılan şevlerde süreksizliklerin denetlediği (neden olduğu) duraysızlıkların gelişmesi olasıdır. Bunlar;

1. Düzlemsel kayma duraysızlık,
2. Kama türü duraysızlık,
3. Devrilme türü duraysızlık' tır.

Sık eklemlili kaya kütlelerinde genellikle süreksizliklerin, nispeten küçük kaya bloklarının dönel ve/veya kırılarak dahil oldukları ve yenilme yüzeyinin dairesel (kütlesel) geliştiği duraysızlık modeli gözlenebilir. Herhangi bir potansiyel şev duraysızlığı için;

1. Süreksizlik denetimli duraysızlık mekanizmasına (Kinematik analiz çözümlemesi),
2. Kütlesel (daireysel) duraysızlık mekanizmasına (Limit Denge analiz Çözümlemesi),
3. Geçiş durumundaki ölçeklerde (şev yüksekliklerinde) her iki mekanizmanın da etkin olup olamayacağı sahanın jeolojik ve jeoteknik koşulları göz önünde bulundurularak karar verilmelidir.

Süreksizlik denetimli duraysızlıklarda, süreksizliklerin devamlılığı (tabaka veya fay gibi) ve kayması muhtemel kütle hacmi bu kararda ayrı bir öneme sahiptir. Birkaç eklem setinin hakim sahip ocaklarda temel şev stabilite sorunları süreksizlik temelli gelişmektedir. Bu durumda Limit Denge Analiz Yöntemi ile birlikte Kinematik analiz yönteminin de kullanılması gerekmektedir. Kinematik analiz için öncelikle sahada hakim olan tüm süreksizlik takımlarının yönelimleri dahil olmak üzere özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu da iyi bir yüzey ve mühendislik jeolojisi verisi ile mümkün olabilmektedir.

Mermer madenciliği faaliyetleri sonucunda oluşan pasa sahaları, çevresel etkiler ve jeoteknik riskler açısından özel değerlendirme gerektiren şevlerdir. Bu sahalarda şev stabilitesinin sağlanması hem çevre güvenliği hem de iş sağlığı açısından temel mühendislik sorunlarından biridir. Pasa malzemesinin

heterojen, gevşek ve düşük kohezyonlu yapısı nedeniyle stabilite analizleri özel tekniklerle yürütülmelidir.

Pasa malzemeleri genellikle düşük kohezyona ($c \approx 0-15$ kPa) ve düşük içsel sürtünme açısına ($\phi \approx 20^\circ-30^\circ$) sahiptir. Bu zayıf mekanik özellikler, şev yüzeylerinde dairesel veya yanal kaymalara neden olabilmektedir. En yaygın kullanılan yöntemler;

1. Limit Denge Analizleri (Bishop, Janbu, Spencer),
2. Sismik koşullarda psödo-statik analizlerdir.

Yüksek riskli sahalarda, Newmark yöntemi ile kalıcı deplasmanlar değerlendirilmekte; bazen hipoplastik modelleme ile akma davranışları incelenmektedir. PTD ve ÇED raporlarında ocak ve şev stabilite analizlerinin detaylı olarak ortaya konması gerekmektedir. Bu analizler ocak geometrisini belirlemede temel unsur olarak görülmektedir. Bu durum ocak planlamasını da direkt olarak etkilemektedir.

4.6 Ocak Rehabilitasyonu

Açık ocak madenciliği, toprak yüzeyinin derinliklerine kadar kazılmasıyla doğal peyzajı büyük ölçüde tahrip eden bir madencilik yöntemidir. Bu yöntem, doğal yaşam alanlarının bozulmasına, toprak yapısının bozulmasına ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla, açık ocakların kapatılmasından sonra rehabilitasyon süreci, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından hayati önem taşımaktadır.

Rehabilitasyon çalışmaları genel olarak üç aşamada ele alınmaktadır: teknik rehabilitasyon, biyolojik rehabilitasyon ve sosyo-ekonomik entegrasyon. Teknik rehabilitasyon; şev stabilizasyonu, drenaj sistemlerinin kurulması ve toprak yüzeyinin yeniden düzenlenmesini içerirken, biyolojik rehabilitasyon; toprağın iyileştirilmesi, yerel flora ve faunanın yeniden kazandırılmasıyla ilgilidir. Sosyo-ekonomik entegrasyon ise, alanın yeniden tarım, orman ya da rekreasyon gibi işlevlerle topluma kazandırılmasını amaçlar.

Modern rehabilitasyon yaklaşımları, yalnızca alanın görsel olarak iyileştirilmesini değil, aynı zamanda ekosistem fonksiyonlarının geri kazanımını da hedeflemektedir. Bu kapsamda, yerli türlerin kullanılması, toprak mikrobiyotasının canlandırılması ve karbon tutulum potansiyelinin artırılması gibi ekolojik göstergeler dikkate alınmaktadır.

PTD ve ÇED raporlarında tüm aşamaların planlı ve akademik olarak açıklanması sürdürülebilir madencilik için bir gereklilik olarak görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Türkiye’de mermer madenciliği alanında yürütülen Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) süreçlerinin yasal, teknik ve yönetsel boyutlarını analiz ederek uygulamadaki başlıca sorun alanlarını maden mühendisliği disiplini açısından ortaya koymuştur. ÇED sisteminin teorik çerçevesi çevresel koruma açısından yeterli bir potansiyele sahip olsa da uygulama düzeyinde karşılaşılan yapısal sorunlar bu potansiyelin büyük ölçüde zayıflamasına neden olmaktadır. Özellikle “ÇED Gerekli Değildir” kararlarının kapsamı, proje tanıtım dosyalarındaki teknik yetersizlikler, halk katılım mekanizmasının işlevsizleşmesi ve rehabilitasyon yükümlülüklerinin yerine getirilmemesi gibi sorunlar, madencilik faaliyetlerinin çevresel, sosyal ve hukuki açıdan sürdürülebilirliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir.

Bu nedenle özellikle PTD ve ÇED raporlarında maden mühendisliğini kapsayan alanlarda bilimsel denetim zorunluluğu getirilmelidir. Bu amaçla Proje Tanıtım Dosyalarının bağımsız bilimsel

komisyonlar tarafından değerlendirilmesi sağlanmalı; raporların sahaya dayalı verilerle hazırlanması yasal zorunluluk haline getirilmelidir. Diğer disiplinlerle uyumlu olarak raporların teknik güvenilirliği artırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Akbulut, B., Eroğlu, E. (2022). Mermer Madenciliğinin Peyzaj ve Su Kaynakları Üzerindeki Etkileri: Mersin İli Örneği. DergiPark. <https://dergipark.org.tr>

Çetiner, E. G., Ünver, B., Hindistan, M. A. (2006). Maden atıkları ile ilgili mevzuat: Avrupa Birliği ve Türkiye. Madencilik, 45(1), 23–34.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). ÇED Yönetmeliği. <https://csb.gov.tr>

Demirtaş, A., Keleş, R. (2020). Türkiye'de ÇED Süreci ve Uygulama Sorunları. Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi, 75(2), 193–215.

Doğa Derneği. (2022). ÇED Yönetmeliği'nin Demokrasi Açısından Değerlendirilmesi. <https://dogaderneği.org>

Eraslan, Ş. (2014). Mermer ocaklarının faaliyet sonrası peyzaj onarımı ve geliştirme planlaması yaklaşımı. Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Erdal, B., Durusoy, E. (2019). ÇED Gerekli Değildir Kararlarının Hukuki Niteliği ve Etkileri. İstanbul Barosu Dergisi, 93(3), 211–234.

Evrensel. (2023). Bozyazı'da Mermer Ocağına Mahkemeden Dur Kararı. <https://evrensel.net>

Glasson, J., Therivel, R., Chadwick, A. (2012). Introduction to Environmental Impact Assessment (4th ed.). Routledge.

Koç, E., Bilgen, A. (2015). Mermer Madenciliğinde Çevresel Etkiler ve Yönetimi. ResearchGate.

Mutlutürk, M., Altındağ, R. (2009). Terk edilmiş mermer ocakları ve çevre etkileşimi: Burdur–Isparta–Antalya örnekleri. Mermer Artıklarının Değerlendirilmesi ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması Sempozyumu (ss. 230–240). Diyarbakır.

TMMOB. (2021). Madencilik Faaliyetlerinde ÇED Uygulamaları Raporu. <https://www.tmmob.org.tr>

TÜİK. (2023). Ticaret İstatistikleri (Kategoriler: Maden Ürünleri). <https://www.tuik.gov.tr/>

UMREK. (2018). Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Kodu (UMREK Kodu).

THE EFFECT OF CALCINATION TEMPERATURE IN SYNTHESIZING ECO-FRIENDLY CEMENT USING GRANITE WASTE

N. I. Anor¹, K. E. H. K. Ishak^{1*}, S. F. S. Hashim¹

¹ *School of Materials and Mineral Resources Engineering, Universiti Sains Malaysia, 14300, Nibong Tebal, Penang, Malaysia.*

Corresponding email: kuesyrahani@usm.my

ABSTRACT

This work aimed to study calcination temperature's effect in producing eco-friendly cement using granite waste from a mineralogical perspective. The granite waste was characterized using Particle Size Analysis (PSA), Scanning Electron Microscopy (SEM), and X-Ray Diffraction (XRD). The Ordinary Portland Cement (OPC) and eco-friendly cement (GC) were prepared to a specified mineralogical composition and sintered at various temperatures of 1000°C, 1100°C, 1200°C and 1300°C. The targeted compositions were 60% of belite, 20% ye'elinite, and 20% brownmillerite. The PSA, SEM and XRD results were compared to the OPC. The GC had shown a good particle size distribution compared to OPC when it was synthesized at a higher temperature. The SEM results showed GC at 1100°C has a good angular and irregular shape with a smooth surface and better size particles compared to other temperatures. Based on the XRD result, it was found that granite waste consisted of microcline and anorthite crystal phases that show pozzolanicity. The best sintering temperature to produce the eco-friendly cement was 1100 °C because it was found that hydraulic active compounds like larnite and brownmillerite were dominant in the products at this temperature, compared to the OPC optimum temperature, which was 1300 °C. The findings will help in decreasing industrial waste and global CO₂ emissions.

INTRODUCTION

Conventional resources such as steel, wood, cement, bricks, gravel, sand and clay are typically key elements of the construction sector. Commonly, cement and aggregate are considered the primary consumers of environmental resources and can cause significant destruction due to their continuous depletion (Nawaz et al., 2019). Additionally, the cement industry utilizes high energy and produces a high volume of CO₂ into the atmosphere (Shubbat et al., 2020). The cement manufacturing causes about 7% of carbon dioxide production worldwide (Nasr et al. 2019). Furthermore, the cost of cement represents about 20% of 55 the cost of concrete (Nasr et a., 2018).

The growing requirements of the society in the light of the developing economy and industrial growth cause high consumption of natural resources and the production of more waste. Researchers have been investigating ways to decrease the cement production's sintering temperature and decrease mthe energy consumption and CO₂ emission the cement industries generate. Reducing energy consumption and CO₂ emission by substituting the cement raw materials with the waste industry is a good alternative and has been identified as eco-friendly cement.

Commonly, low CO₂ clinker was produced from calcium sulfate, limestone and bauxite. However, the increasing cost of using these natural resources has brought an economic challenge for the non-Portland binder (Scrivener et al., 2018). In past studies, fly ash (Alawi et al., 2020; Huang et al., 2021; Jani et al., 2021), ceramic waste (Alsaif et al., 2021; Barreto et al., 2021; Filho et al., 2021), and marble sludge waste (Sanchez et al., 2021), (Sancheti and Bhargava, 2020) have been used to produce calcium aluminate (CA), calcium sulfoaluminate (CSA), belite-CSA (BCSA), and belite-

ye'elinite-ferrite (BYF) cement (Baltakys et al., 2021). The production of non-Portland binders (CA, CSA, BCSA and BYF) reduces the carbon footprint (Gartner, 2004), (Bouha and torre, 2022). Bouha et al. (2022) investigated the BYF as the alternative to Portland cement and found that the required temperature has reduced to 1200°C, lower than the sintering temperature for OPC. The composition of the eco-friendly cement includes belite (β -C₂S), ye'elinite (C₄A₃S̄), tetracalcium aluminoferrite (C₄AF), and, as minor phases, some calcium aluminates (such as CA, C₁₂A₇, and C₃A) (Bullerjahn et al., 2015; Morin et al., 2017). A substantial sample of papers has investigated using granite waste as a substitute or an additive in OPC. This is because of the rising quantity of solid waste from granite industries for each year. At present, these wastes are dumped in landfills, which is expensive and bad for the environment, affecting industrial production's economic and environmental sustainability and public health (Lokeshwari and Jagadish, 2016). Studies show that adding granite waste to cement as a raw material makes the concrete mix and the physical and mechanical properties of the hardened concrete better (Allam et al., 2014; Allam et al., 2016a; Allam et al., 2016b; Bakhoun et al., 2017)

This study aims to investigate the mineralogy aspect of the eco-friendly cement using granite waste calcined at different temperatures and to investigate the optimal temperature for the calcination of the eco-friendly cement.

METODOLOGY

Materials

The materials used in this study were calcium carbonate (CaCO₃), calcium sulphate hemihydrate (CaSO₄ · 0.5H₂O), iron (III) oxide (Fe₂O₃), aluminium hydroxide (Al(OH)₃), calcium sulfate dihydrate (CaSO₄ · 2H₂O) and granite waste obtained from a granite quarry in Kulim, Kedah, Malaysia.

Preparation of the eco-friendly cement

Combining industrial waste with natural source materials generated ecologically friendly cement. The mineral make-up of environmentally friendly cement was designed with consideration given to the mineral make-up of OPC with which it would be most easily comparable and match most industry's standards as previous researchers according to Table 1 [17], [24].

Table 1. Targeted mineral composition of cement based on past studies

Sample	Ordinary Portland Cement (OPC)	Green Cement
Targeted mineralogical composition, wt %)		
2 CaO . SiO ₂	60	
4 CaO . 3 Al ₂ O ₃	20	
4 CaO . 3 Al ₂ O ₃ . SO ₃	20	
Obtained composition		
CaO	55.64	
SiO ₂	20.93	
Al ₂ O ₃	14.23	
SO ₃	2.62	
Fe ₂ O ₃	6.58	

The mixture was poured into the crucible and compacted. The furnace was preheated to 900 °C at a rate of 10 °C/min. Once the furnace reached 900 °C, a crucible filled with the mixture was placed in

the furnace's lower level and sintered for 30 minutes. After 30 min, the temperature was increased to 1000 °C at a interval of 10 °C/min. When the temperature hit 1000 °C, the sample remained calcined for 1 hour. After cooled, calcined cement was mixed gypsum additives to slow down cement's initial hydration. These same operations were repeated at different temperatures of 1100 °C, 1200 °C and 1300 °C for both OPC and GC samples.

Characterization

The granite waste was characterized using PSA, SEM and XRD.

Particle Size Analysis (PSA)

The PSA of granite waste, OPC and GC were determined using an analyzer known as Malvern model Mastersizer E. about 5,0 g of sample was needed for each run. This analyzer can run sample sizes between 0,1µm to 1000 µm. The graph cumulative percent passing against particle size in microns (µm) is plotted using the data obtained from this research.

Scanning Electron Microscope (SEM)

The Hitachi TM3000 scanning electron microscope is used for analysis using a scanning electron microscope (SEM). The samples were coated with an ultrathin (10,0 nm) layer of a conductive material, such as gold, silver, chromium, etc. The magnification used was 500X and 2000X.

X-Ray Diffraction (XRD)

Around 0,5 g of samples were used for the XRD analysis. The result of the patterns are obtained with the help of the XRD Model D8 Advance. The XRD pattern was analyzed by utilizing Origin Software, which calculates the significance of each peak in the pattern.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Characterization of the granite waste

Figure 1 shows the particle size distribution of the granite waste. There are 10% of the granite waste smaller than 0,0312 µm, 50% smaller than 0,549 µm and almost 90% less than 58,9 µm in size. This result was supported by the SEM analysis in Figure 2. It can be seen that most of the granite waste particles have an angular and elongated shape with sharp edges and a size of less than 30 µm and a smooth surface. The granite waste powder needs to be able to improve the filling effect of the cement pores to make the cement less porous, increase the density of its structure, and make it last longer. The analysis of the XRD was shown in Figure 3. It can be seen that the peak pattern for some granite waste was quartz (Q) and microcline (z). The existence of microcline and anorthite crystal phase is important as it shows the granite waste pozzolanicity.

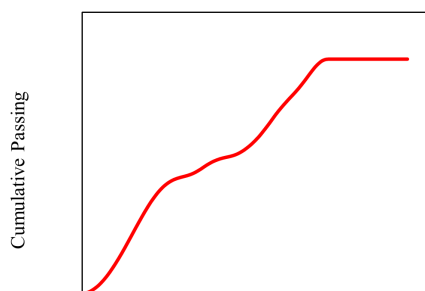


Figure 1. Particle size distribution of the granite waste

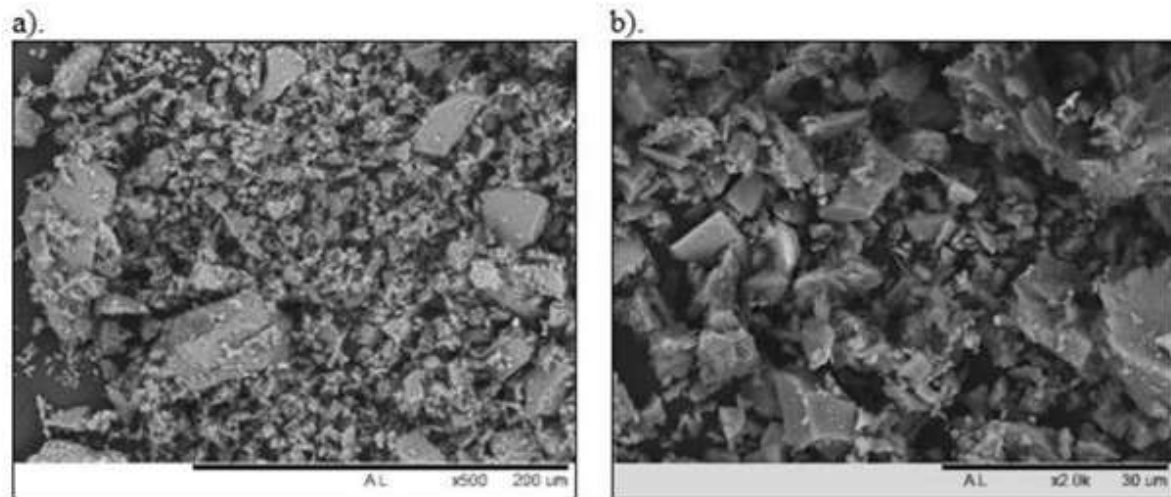


Figure 2. SEM analysis of the granite waste (a) 200 μm and 500x and (b) 30 μm and 2000x

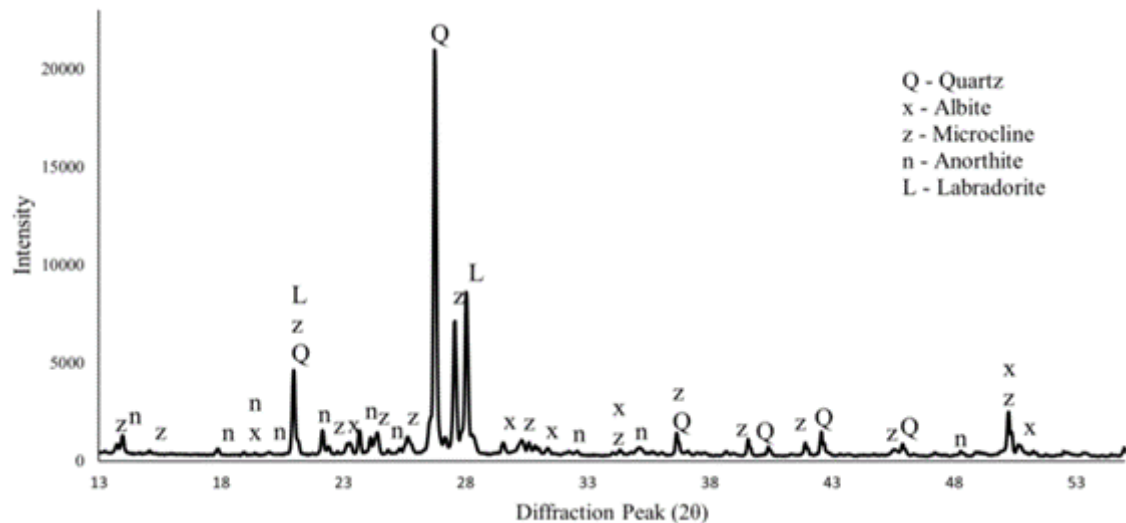


Figure 3. XRD analysis of the granite waste

The Effect of Calcination Temperature

Figure 4 shows the cut size of particles with the increasing temperature from 1000°C to 1300°C for OPC and GC. It can be seen that increasing temperatures have increased the size of the particles for both types of cement, confirming that heat treatment tends to agglomerate the particles together. However, the size changes in OPC were more significant compared to GC. The thermodynamically justifiable phenomena of crystallite size expansion with rising calcination temperature was attributed to the increase of the ratio of crystalline volume to surface, which occurs as a result of an increase in particle size, hence lowering the system's Gibbs free energy (Singh et al., 2009).

Figure 5 (a, b, c & d) shows the SEM analysis of OPC and GC with increasing temperatures from 1000°C to 1300°C. The angular and irregular particles in both samples are almost identical. The photomicrographs at all temperatures show an angled, asymmetrical, and smooth surface. Smoother surfaces of cement are more workable than roughly textured aggregates. This is because high friction and segregation tendencies are more to happen with roughly textured aggregates.

Furthermore, the cementation pattern between particles of different shapes differs significantly. The region of effective cementation is greater between angular particles than between rounded particles and between angular and rounded particles (Xiao et al., 2019).

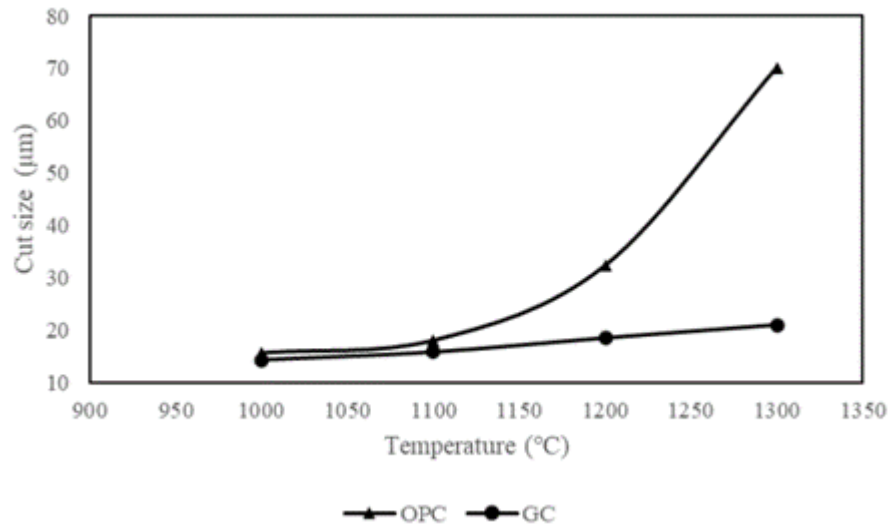
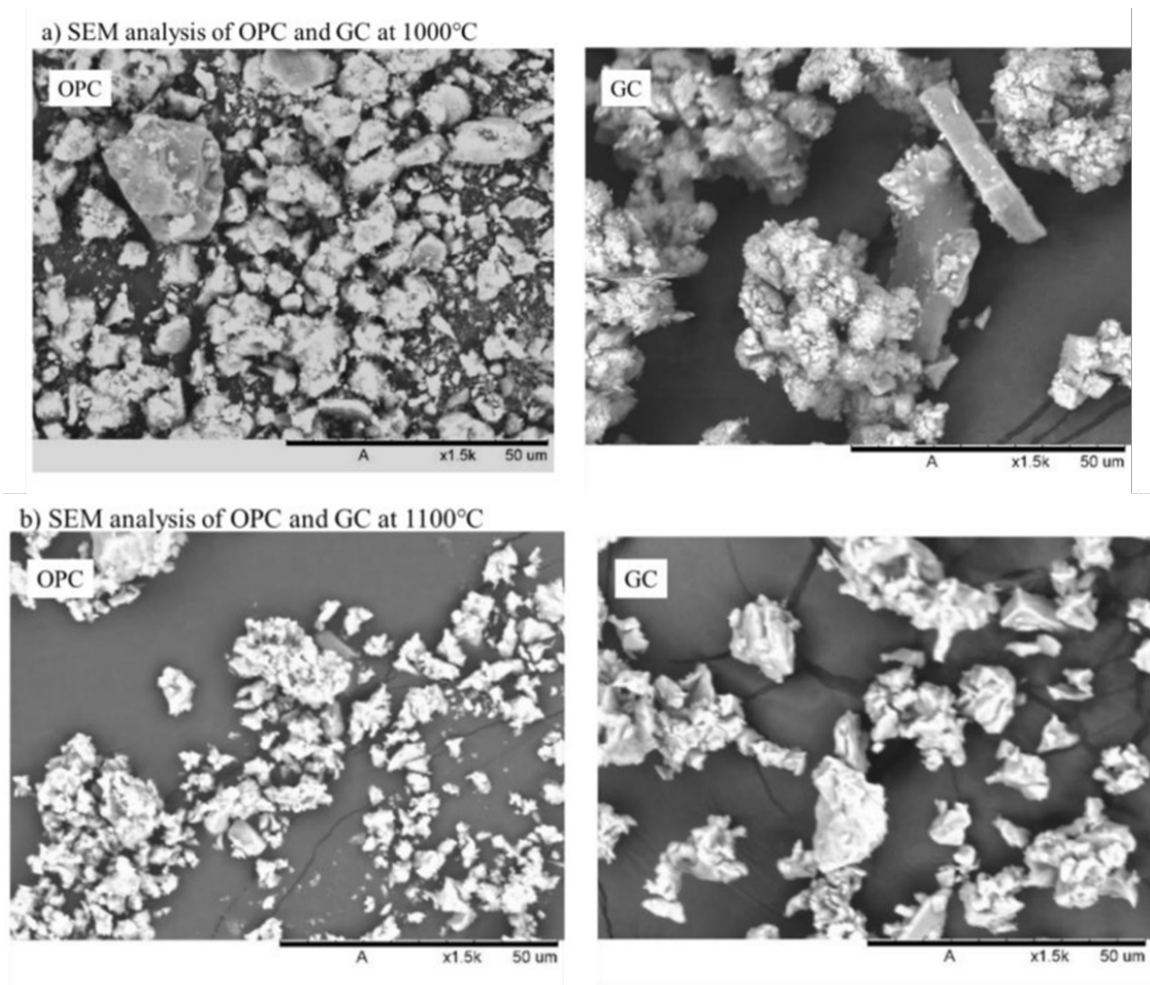


Figure 4. Cut size comparison at different calcination temperatures



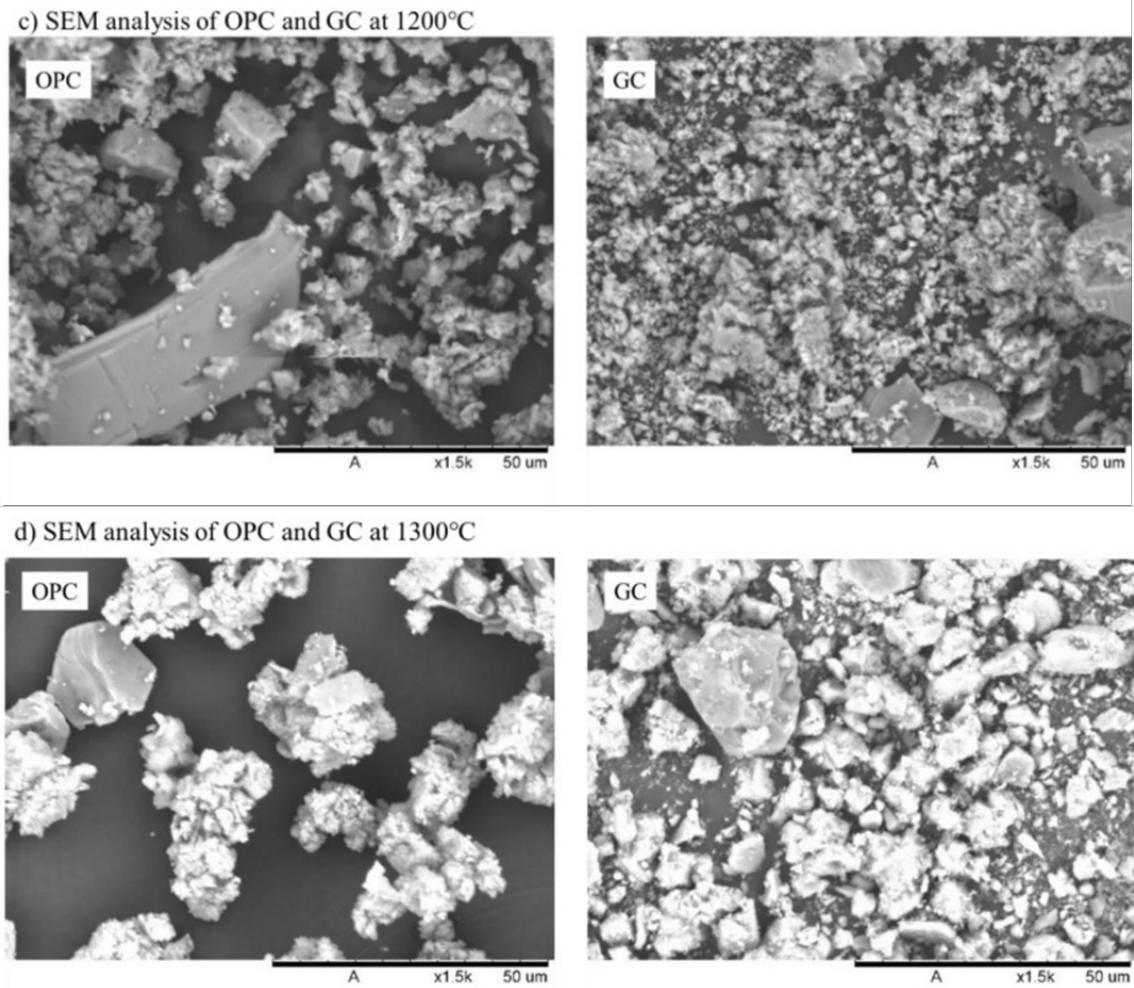


Figure 5. Comparison of SEM analysis on the OPC and GC at different temperatures

XRD analysis on the cement after calcination helps identify the polymorph and define the phase abundance to categorize the cement and connect the performance with composition. Figure 6 and Figure 7 show the XRD pattern for OPC and GC at 1000 °C. Quartz and gypsum did not fully react in OPC and GC at 1000 °C. The diffraction peaks characteristic of Quartz (SiO_2 , PDF No. 98-010-7209) and Gypsum ($\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot (\text{H}_2\text{O})_2$, PDF No. 98-001-2046) were still observed in the XRD patterns. There were also phases of Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, PDF No. 98000-5997), Mayenite ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, PDF No. 98-011-1168) and Larnite β - Ca_2SiO_4 , PDF No. 98-001-1893) detected in both OPC and GC cement. Larnite is from mineral name of β -belite (Ca_2SiO_4 , C_2S in cement notation), is the crystal structure of belite at high temperature. To produce this structure, the clinkers will be quickly cooled by forced airflow and manually crushed to prevent the transition of β polymorph to the γ polymorph. The β polymorph is stable above 500 °C and the γ polymorph at room temperature. The γ polymorph is undesirable as cement components as it hydrates very slowly (Ylmen, 2013).

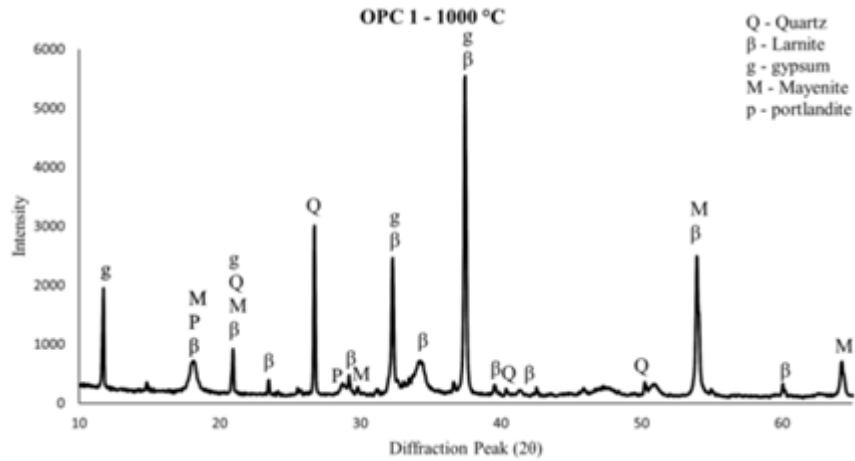


Figure 6. XRD analysis for OPC calcined at 1000 °C

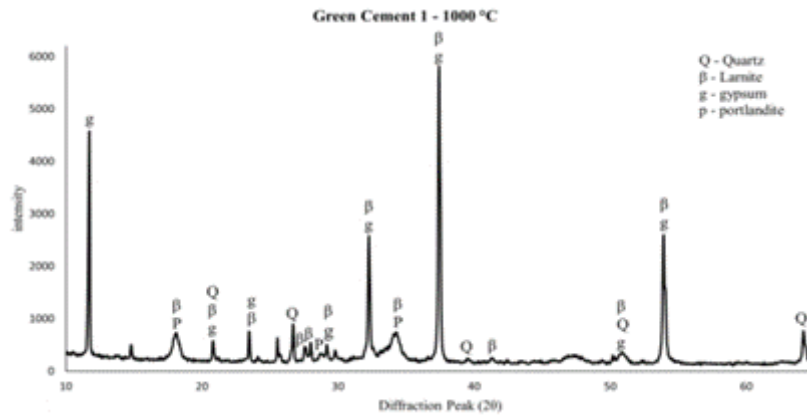


Figure 7. XRD analysis for GC calcined at 1000 °C

Figure 8 and Figure 9 show the XRD analysis for OPC and GC at the temperature of 1100°C. It was observed that increasing temperature from 1000°C to 1100°C for GC has positively affected the interaction degree between raw materials because the main diffraction peaks of quartz and gypsum were not detected. In addition, a new peak of Ilvaite ($H_{1,01}Al_{0,01}Ca_{0,9}Fe_{2,48}Mg_{0,02}Mn_{0,58}O_9Si_{2,01}$, PDF No. 98-003-4929). This XRD peak corresponds to the existence of Magnetite (Fe_3O_4). No ilvaite compound formation was observed in other eco-friendly cement synthesized at other temperatures. The new crystalline phase detected which is ilvaite is similar to Ettringite as it both have a void-filling properties (Amin et al., 2013). There was also a new crystalline phase of Brownmillerite ($Al_{1,259}Ca_2Fe_{0,741}O_5$, PDF No. 98-007-9567) in GC because the quartz is fully reacted. Figure 10 and Figure 11 show the XRD analysis of OPC and GC calcined at the temperature of 1200°C. It can be seen that the OPC starts to show a diffraction peak of brownmillerite. However, it also can be observed that the main diffraction peak of quartz is still high in OPC. The increasing temperature for GC shows a new mineral phase which is hydrotalcite ($C_{0,167}H_3A_{10,333}Mg_{0,667}O_{3,001}$, PDF No. 98-004-0936). The formation of hydrotalcite can be from the reaction result of magnesium in the mixture (Mancher et al., 2018). The granite waste contains a source of aluminum, given as $Al(OH)_3$, which then react with portlandite to form hydrotalcite and calcite as shown in Figure 11. The existence of hydrotalcite also claims to enhance the bond with the cementitious matrix that improves cement mechanical properties (Jawad et al., 2019), can decrease cement's overall porosity as it contains hydrate water molecule (Rosset et al., 2019) and provides a nucleation site which crucial for cement's hydration activities (Land and Stephan, 2015).

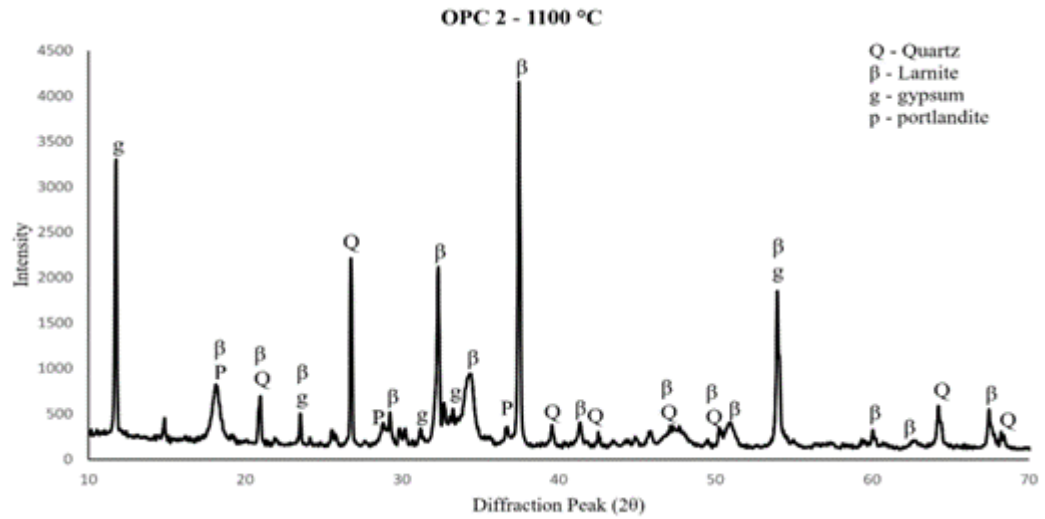


Figure 8. XRD analysis of OPC calcined at 1100 °C

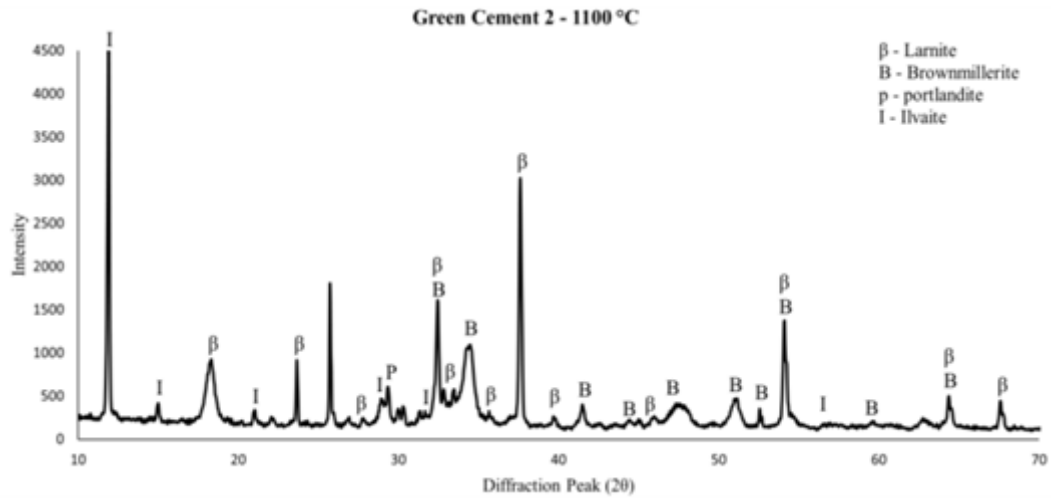


Figure 9. XRD analysis of GC calcined at 1100 °C

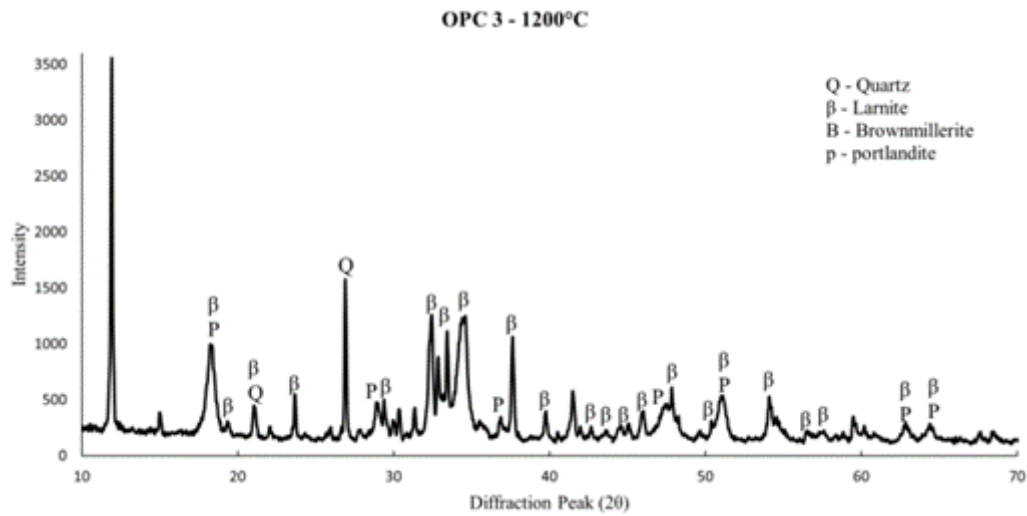


Figure 10. XRD analysis of OPC calcined at 1200 °C

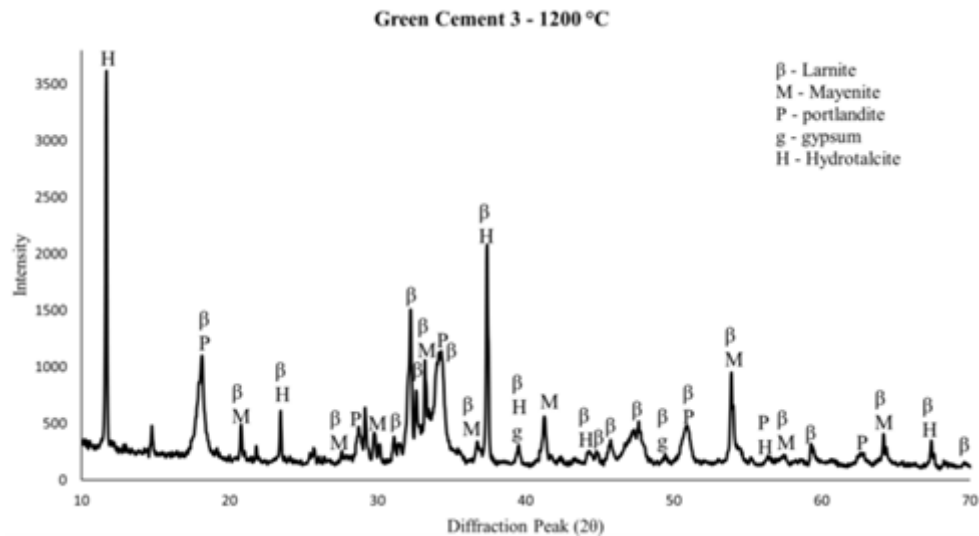


Figure 11. XRD analysis of GC calcined at 1200 °C

The effect of calcination temperature at 1300°C for OPC and GC were shown in Figure 12 and Figure 13. It can be seen that the main diffraction peak of quartz is still high in OPC as it was not fully reacted although the temperature was increased from 1000°C to 1300°C. It was also observed that there were not much differences in larnite and portlandite peaks. However, new product was synthesized which is gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, PDF No. 00-009-0216) at 1300°C. Gehlenite was a worthless constituent of cement and slags since it reacts very slowly with water and does not have cementitious properties (Tchamba et al., 2020). In Figure 13, the GC shows an intense diffraction peak of brownmillerite and larnite compared to OPC. In addition, under these calcination conditions, some brownmillerite has reacted with MgO and formed srebrodolskite ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, PDF No. 98-000-5948).

Figure 14 and Figure 15 show the crystallography changes for OPC and GC with the changing temperature from 1000°C to 1300°C. From Figure 14, it can be seen that increasing temperature has decreased the diffraction peak characteristics of Quartz and better influenced the interaction degree between raw materials. In GC, increasing temperature to 1100°C shows a good interaction degree of raw material as quartz has fully reacted. A highly hydraulic active compound, larnite and brownmillerite, was formed at 1100°C compared to at other temperatures like 1300°C that synthesized gehlenite. The formation of gehlenite was undesirable as it reacts slowly with water and does not have cementitious properties (Tchamba et al., 2020). Therefore, the optimal temperature for synthesizing the GC was selected at 1100 °C.

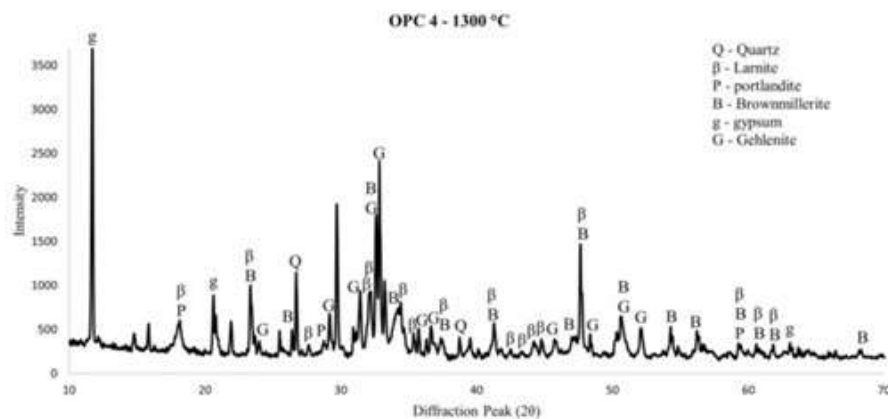


Figure 12. XRD analysis of GC calcined at 1300°C

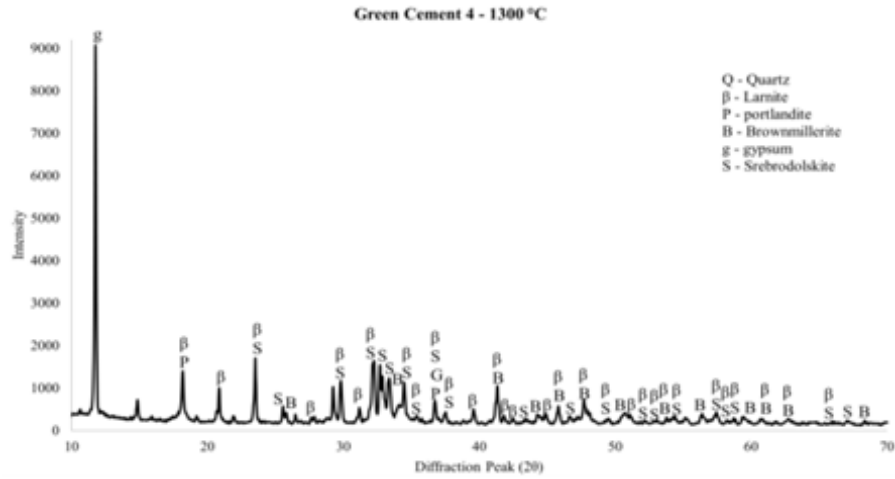


Figure 13. XRD analysis of GC calcined at 1300°C

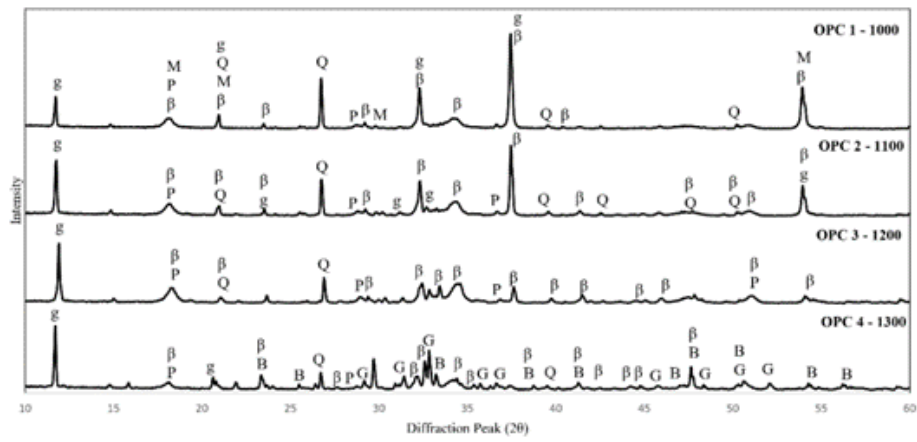


Figure 14. Comparison of XRD pattern for OPC at different temperature from 1100°C to 1300°C

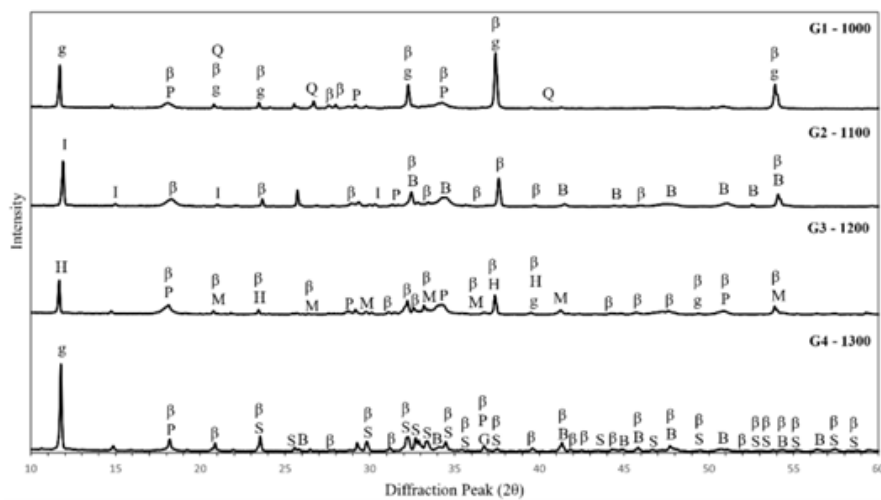


Figure 15. Comparison of XRD pattern for GC at different temperature from 1100°C to 1300°C

CONCLUSIONS

This study investigated the mineralogical aspect of synthesizing eco-friendly cement using granite waste. The results were compared with OPC. Based on the particle size distribution result, the increasing calcination temperature has increased the size of the particles for both types of cement. However, the GC has shown a finer size than OPC at all calcination temperatures. SEM analysis shows GC at 1100°C has a good angular and irregular shape with a smooth surface and better size particles compared to other temperatures. Based on the XRD analysis, it was found that the quartz in the GC cement had fully reacted at the temperature of 1100 °C. Meanwhile, increasing the temperature to 1300 °C initiated the reaction of brownmillerite with magnesium forming srebrodolskite. In addition, the high temperature for the eco-friendly cement has also formed gehlenite, which is not desirable in cement manufacturing. The optimal condition for the synthesis of eco-friendly cement with GCW is at 1100 °C because at this temperature, the primary compound was fully reacted and hydraulic active compounds such as larnite and brownmillerite were dominant. It was recommended to do further investigation on the physicochemical and mechanical characteristics of synthesized eco-friendly cement.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank School of Materials and Mineral Resources Engineering and USM short term grant 304/PBAHAN/6318854 for supporting this research.

REFERENCES

- Abulredha, M., Shubbar, A. A., Jafer, H., Al-Khafaji, S. Z., Nasr, S. M., Masoodi, A. Z., Sadique, M. (2020). Properties of cement mortar incorporated high volume fraction of GGBFS and CKD from 1 day to 550 days. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101327>
- Alawi Al-Sodani, K. A., Al-Zahrani, M. M., Maslehuddin, M., Baghabra Al-Amoudi, O. S., Al-Dulaijan, S. U. (2021). Chloride diffusion models for Type I and fly ash cement concrete exposed to field and laboratory conditions. *Marine Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102900>
- Allam, M. E., Bakhoun, E. S., & Garas, G. L. (2014). Re-use of granite sludge in producing green concrete. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Allam, M. E., Bakhoun, E. S., Ezz, H., Garas, G. L. (2016a). Influence of using granite waste on the mechanical properties of green concrete. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Allam, M. E., Bakhoun, E. S., Garas, G. L., & Ezz, H. (2016b). Durability of green concrete containing granite waste powder. *International Journal of Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.21817/ijet/2016/v8i5/160805042>
- Alsaif, A. (2021). Utilization of ceramic waste as partially cement substitute – A review. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124009>
- Amin, M. S., El-Gamal, S. M. A., Hashem, F. S. (2013). Effect of addition of nano-magnetite on the hydration characteristics of hardened Portland cement and high slag cement pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2663-1>
- Bakhoun, E. S., Garas, G. L., Allam, M. E., Ezz, H. (2017). The role of nano-technology in sustainable construction: A case study of using nano granite waste particles in cement mortar. *Engineering Journal*. <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.4.217>

Baltakys, K., Dambrauskas, T., Rubinaite, D., Siauciunas, R., Grineviciene, A. (2021). Formation and hydration of eco-friendly cement using industrial wastes as raw materials. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94148-x>

Barreto, S. D. E., Stefanato, V. K., Marvila, T. M., de Azevedo, G. R. A., Ali, M., Pereira, L. M. R., Monteiro, N. S. (2021). Clay ceramic waste as pozzolan constituent in cement for structural concrete. *Materials (Basel)*. <https://doi.org/10.3390/ma14112917>

Bouha, F. N., Kacimi, L., De la Torre, A. G. (2022). Manufacture of rich-sulfoaluminate belite cement at low temperature from waste mixture by dry and hydrothermal processes. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125641>

Bullerjahn, F., Zajac, M., Ben Haha, M. (2015). CSA raw mix design: Effect on clinker formation and reactivity. *Materials and Structures*. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0451-z>

Gallardo, M., Almanza, J. M., Cortés, D. A., Escobedo, J. C., Escalante-García, J. I. (2014). Synthesis and mechanical properties of a calcium sulphoaluminate cement made of industrial wastes. *Materiales de Construcción*. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.04513>

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to 'low-CO₂' cements. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>

Hoppe Filho, J., Pires, C. A. O., Leite, O. D., Garcez, M. R., Medeiros, M. H. F. (2021). Characterization of red ceramic waste for application as mineral addition in Portland cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003719](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003719)

Huang, Q., Zhu, X., Liu, D., Zhao, L., Zhao, M. (2021). Modification of water absorption and pore structure of high-volume fly ash cement pastes by incorporating nanosilica. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101638>

Jani, P., Imqam, A. (2021). Class C fly ash-based alkali activated cement as a potential alternative cement for CO₂ storage applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108408>

Jawad, A., Peng, L., Liao, Z., Zhou, Z., Shahzad, A., Ifthikar, J., Zhao, M., Chen, Z., Chen, Z. (2019). Selective removal of heavy metals by hydrotalcites as adsorbents in diverse wastewater: Different intercalated anions with different mechanisms. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.234>

Land, G., Stephan, D. (2015). Controlling cement hydration with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.003>

Lokeshwari, M., Jagadish, K. S. (2016). Eco-friendly use of granite fines waste in building blocks. *Procedia Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.049>

Machner, A., Zajac, M., Ben Haha, M., Kjellsen, K. O., Geiker, M. R., De Weerd, K. (2018). Limitations of the hydrotalcite formation in Portland composite cement pastes containing dolomite and metakaolin. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.11.007>

Morin, V., Termkhajornkit, P., Huet, B., & Pham, G. (2017). Impact of quantity of anhydrite, water-to-binder ratio, and fineness on kinetics and phase assemblage of belite-ye'elimite-ferrite cement. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.014>

Nasr, M. S., Hussain, T. H., Najim, W. N. (2018). Properties of cement mortar containing biomass bottom ash and sanitary ceramic wastes as a partial replacement of cement. *International Journal of Civil Engineering and Technology*.

Nasr, M., Hasan, Z., Abed, M. (2019). Mechanical properties of cement mortar made with black tea waste ash as a partial replacement of cement. *Engineering and Technology Journal*. <https://doi.org/10.30684/etj.37.1c.7>

Nawaz, W., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Alajmani, H. S., Abuzayed, H. I., Ataya, H., Mohamed, H. A. (2019). Experimental study on the shear strength of reinforced concrete beams cast with lava lightweight aggregates. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.05.003>

Rosset, M., Sfreddo, L. W., Hidalgo, G. E. N., Perez-Lopez, O. W., Féris, L. A. (2019). Adsorbents derived from hydrotalcites for the removal of diclofenac in wastewater. *Applied Clay Science*. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.04.014>

Sancheti, G., Jain, K. L., Bhargava, S. (2020). Mechanical and durability performance of concrete made with waste marble and fly ash. *Jordan Journal of Civil Engineering*.

Sánchez, A. R., Ramos, V. C., Polo, M. S., Ramón, M. V. L., Utrilla, J. (2021). Life cycle assessment of cement production with marble waste sludges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010968>

Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

Singh, R. C., Singh, M. P., Singh, O., Chandi, P. S. (2009). Influence of synthesis and calcination temperatures on particle size and ethanol sensing behaviour of chemically synthesized SnO₂ nanostructures. *Sensors and Actuators B: Chemical*. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.09.032>

Tchamba, B. A., Mbessa, M., Yannick, L. T., Waida, S., Elimbi, A., Melo, C. U., Thomas, A. B. (2020). Reactivity of calcium dialuminate (CaAl₄O₇) refractory cement with lithium carbonate (Li₂CO₃) admixture. *Journal of the Asian Ceramic Societies*. <https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1724246>

Xiao, Y., Yuan, Z., Lin, J., Ran, J., Dai, B., Chu, J. (2019). Effect of particle shape of glass beads on the strength and deformation of cemented sands. *Acta Geotechnica*. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00830-w>

Ylmén, E. R. (2013). An infrared spectroscopy perspective complemented by calorimetry and scanning electron microscopy. Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology.

REVIVING DEGRADED LIMESTONE LANDSCAPES: EVALUATING REHABILITATION STRATEGIES IN MALAYSIAN QUARRIES

N.‘A. Jabit^{1*}, K.E.H. Ku¹, S. Ismail¹, H. Zabidi¹

¹ *Strategic Mineral Niche, School of Materials and Mineral Resources Engineering, Universiti Sains Malaysia, 14300, Penang, Malaysia*

**Corresponding author: ainjabit@usm.my*

ABSTRACT

Limestone quarrying has long supported Malaysia’s infrastructure and industrial sectors, yet its legacy of environmental degradation particularly in ecologically sensitive karst landscapes remains inadequately addressed. Despite the growing recognition of the need for post-quarry restoration, current rehabilitation practices in Malaysia are highly inconsistent, largely due to the absence of a standardized national framework, limited enforcement mechanisms, and poor post-implementation monitoring. This study conducts a desktop review of rehabilitation strategies adopted in selected active and abandoned limestone quarries, drawing on environmental impact assessments (EIAs), policy documents, and published literature. The findings reveal fragmented and often inaccessible data, weak integration of ecological and socioeconomic objectives, and minimal stakeholder involvement in restoration planning. By synthesizing existing knowledge and highlighting best practices and systemic shortcomings, this study addresses a critical gap in the understanding of quarry rehabilitation in Malaysia. It calls for the establishment of clear national guidelines, centralized data systems, and integrated monitoring frameworks to ensure that quarry rehabilitation not only mitigates environmental damage but also supports long-term ecological and community benefits.

Keywords: Limestone, Quarry, Karst ecosystems, Environmental policy, Rehabilitation

INTRODUCTION

Limestone quarrying has long supported Malaysia’s economy and infrastructure development (Minerals and Geoscience Department Malaysia, 2016). However, many of these limestone hills are part of fragile karst ecosystems that harbor unique geological features and endemic biodiversity (Kiew et al., 2019). Decades of intensive quarrying have led to habitat destruction, landscape fragmentation, and irreversible losses of biodiversity in these landscapes (Liew et al., 2016), prompting growing concern and calls for effective rehabilitation of degraded quarry sites. In recent years, sustainable quarry management has increasingly emphasized post-mining rehabilitation to restore ecosystems and landscape functionality. Extensive research globally has developed best practices for quarry rehabilitation, including careful soil management, slope re-contouring, erosion control, and re-vegetation with native plant species. International guidelines (e.g., the World Business Council for Sustainable Development’s quarry rehabilitation framework) highlight the need for clear post-closure land-use planning, biodiversity management, and community engagement (WBCSD, 2011). Field studies have demonstrated that well-planned rehabilitation can foster vegetation recovery and improve biodiversity on former quarry sites, although success depends on site-specific conditions and long-term management commitment (Neri and Sánchez, 2010).

Despite this growing knowledge, significant gaps persist in the implementation of quarry rehabilitation, particularly in Malaysia. There is currently no specific binding national law mandating quarry rehabilitation, leading to inconsistent practices across different states (Yahya et al., 2018). Many exhausted quarry sites have been abandoned without any restoration due to regulatory shortcomings and weak enforcement. As of 2009, only 12 out of 314 active quarries nationwide had undertaken any form

of “greening” or rehabilitation effort, reflecting the low priority given to restoration (Yahya et al., 2018). Furthermore, where rehabilitation is attempted, it often lacks clear standards and long-term monitoring many plans focus only on mitigation during operations and omit post-closure measures. These challenges underscore the need for a more coordinated and robust approach to revive degraded limestone quarry landscapes. Existing literature on this topic remains limited. Previous studies have addressed certain facets for instance, Yahya et al. (2018) examined policy and legal barriers to quarry rehabilitation in Selangor, and Talento et al., (2020) reviewed international cases of quarry reuse and restoration best practices. However, to our knowledge, no comprehensive review has yet synthesized rehabilitation strategies for limestone quarries in the Malaysian context. This gap in the literature provides a strong impetus for the present work. This review aims to systematically evaluate the strategies used to rehabilitate degraded limestone quarry sites in Malaysia, highlighting successful approaches as well as persisting deficiencies. The analysis draws on evidence from environmental impact assessment reports, policy documents, and academic studies. The paper is organized to first provide an overview of Malaysia’s limestone quarry landscape and its environmental impacts, then examine current rehabilitation practices and governance frameworks, and finally discuss recommendations for enhancing rehabilitation outcomes in these unique ecosystems.

GEOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL SETTING OF MALAYSIAN LIMESTONE QUARRIES

In Peninsular Malaysia, extensive limestone formations of primarily Paleozoic origin are concentrated along the northwestern, western, and central belts, and they significantly influence the regional geomorphology. These carbonate outcrops typically form steep, isolated hills rising abruptly above lowland alluvial plains, a hallmark of tropical karst terrain. Characteristic karst features include towering limestone pinnacles, sinkholes (dolines), and intricate cave systems, all sculpted by long-term dissolution of carbonate rock under the warm, humid tropical climate. Many hills are capped with dense vegetation on their summits, while their near-vertical flanks remain largely bare rock, reflecting the effects of intense chemical weathering over time. Similar dramatic karst landscapes are also found in East Malaysia; for instance, the Gunung Mulu limestone massif in Sarawak composed of Late Eocene–Miocene limestones showcase jagged pinnacles and one of the world’s largest cave systems.

Malaysian limestone karst areas are increasingly recognized for their high ecological value; although such areas cover only ~0,2% of Peninsular Malaysia’s land area, they harbor roughly 14% of its plant species (over 1,200 species), including many endemic taxa restricted to limestone habitats. These karst hills often also have cultural or recreational significance (for example, the Batu Caves temple complex), yet the demand for cement and other limestone resources frequently overrides such considerations. Consequently, quarrying has left permanent scars on numerous karst outcrops; of the 445 limestone hills documented in Peninsular Malaysia, at least 73 (~16%) have been quarried or are currently being quarried. In response, Malaysian authorities have designated limestone karst sites as Environmentally Sensitive Areas, making Environmental Impact Assessments (EIAs) mandatory before any new quarrying can proceed. Nevertheless, balancing economic development with the preservation and rehabilitation of these fragile karst landscapes remains an ongoing challenge.

IMPACTS OF LIMESTONE QUARRYING ON KARST ECOSYSTEMS

Limestone quarrying in karst regions presents unique environmental challenges due to the geological and ecological sensitivity of these landscapes. Karst systems are formed through the dissolution of soluble rocks such as limestone and are characterized by sinkholes, caves, fissures, and underground drainage networks (Ford and Williams, 2007). These features not only make karst terrains geomorphologically complex and hydrologically fragile but also support unique ecosystems with high levels of endemism (Gillieson, 2011). The extraction of limestone through open-cast mining or blasting often results in irreversible topographical and structural modifications, disrupting both surface and

subterranean processes (Waltham et al., 2005). Unlike other geological formations, the loss of karst landforms is permanent, with no possibility for natural regeneration within human timeframes.

In the Malaysian context, quarrying operations have increasingly encroached upon karst ecosystems, particularly in Peninsular Malaysia where over 445 limestone hills have been documented (Liew et al., 2016). Of these, a significant number have been partially or completely destroyed by quarrying activities (Kiew et al., 2019). Karst hills such as those in Perak, Kelantan, and Selangor harbor a remarkable diversity of endemic flora and fauna, including terrestrial mollusks, cycads, and limestone-restricted orchids (Clements et al., 2006). The removal of vegetation and the blasting of cliff faces not only eliminates local biodiversity hotspots but also fragment landscapes, reducing ecological connectivity and resilience. As quarrying intensifies, many isolated hills have become too small to sustain viable populations, leading to local extinctions and genetic bottlenecks (Davison and Kiew, 1990). Despite the presence of Environmental Impact Assessment (EIA) protocols, enforcement is inconsistent and post-operational monitoring is rare (Yahya et al., 2018).

Beyond ecological damage, limestone quarrying imposes substantial impacts on the hydrology of karst ecosystems. Karst aquifers, characterized by high permeability and rapid recharge, are vulnerable to contamination and water table disruption due to excavation and siltation (Goldscheider and Drew, 2007). In Malaysia, alterations to natural drainage have resulted in lowered water tables, increased surface runoff, and contamination of groundwater resources with sediments, lubricants, and explosives residues (Jaafar and Termizi, 2019). Moreover, dust emissions and noise from quarrying operations have been reported to affect nearby communities and agricultural land, further exacerbating socio-environmental stress (Mzuri Mining Ltd., 2021). The conversion of quarry voids into stagnant ponds has also introduced new vector habitats, posing additional public health risks. These compounded impacts demonstrate the critical need for integrated, site-specific rehabilitation approaches that account for the geological and ecological intricacies of karst terrains.

GOVERNANCE AND REGULATORY FRAMEWORKS

Effective rehabilitation of limestone quarries requires a robust governance structure, underpinned by clear legislation, policy coherence, and institutional accountability. In Malaysia, the regulation of quarrying activities falls under both federal and state jurisdictions, with primary legal instruments including the National Land Code 1965, the Environmental Quality Act 1974, and state-specific quarry rules such as the Selangor Quarry Rules 2003. While these laws provide the basis for licensing, environmental compliance, and safety, they remain fragmented in their treatment of post-extraction land rehabilitation (Yahya et al., 2018). Notably, Section 74 of the National Land Code grants state authorities' discretionary powers to require a rehabilitation deposit, but it lacks clarity on implementation mechanisms, leading to varied enforcement across states. Furthermore, quarry operators are often only required to submit Environmental Impact Assessments (EIAs) prior to quarry development, with minimal follow-up obligations concerning site closure or ecological restoration (Zaharah et al., 2018).

Malaysia's Second National Mineral Policy (2009) outlines broad goals for sustainable mineral development, including mine and quarry rehabilitation. However, the policy is not legally binding and does not specify mandatory procedures or performance indicators for post-quarry land use (Ministry of Natural Resources and Environment, 2009). The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), through its Cement Sustainability Initiative, has provided international benchmarks by introducing seven parameters for effective quarry rehabilitation ranging from baseline assessment to long-term monitoring and stakeholder engagement (WBCSD, 2012). Yet, these parameters have not been systematically integrated into Malaysia's regulatory frameworks. Additionally, the lack of a centralized quarry rehabilitation monitoring system and insufficient financial provisions further constrain implementation. The Auditor General's Report (2015) highlighted that enforcement agencies

often face budgetary and manpower limitations, resulting in poor compliance oversight. Without mandatory closure plans, legally enforceable rehabilitation milestones, or penalties for non-compliance, rehabilitation efforts remain inconsistent and largely dependent on voluntary corporate initiatives.

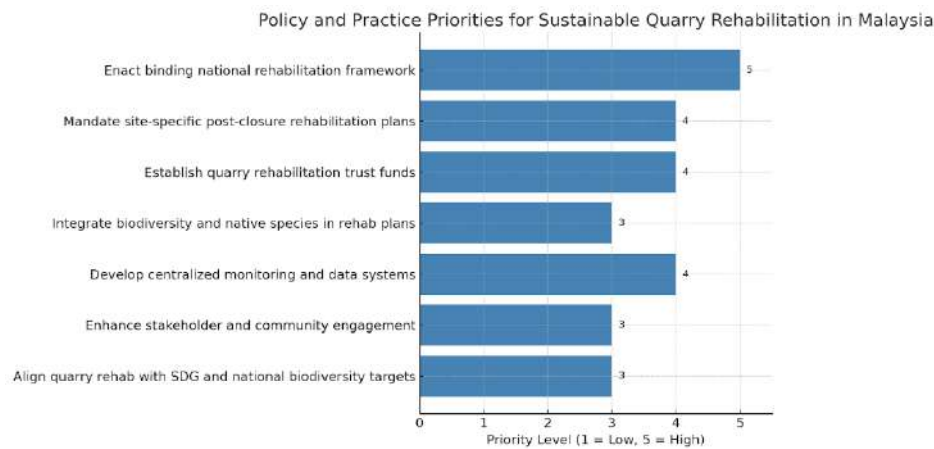


Figure 1. Coverage of key rehabilitation parameters in Malaysian quarry policy frameworks, adapted from Malaysia's National Land Code 1965, Selangor Quarry Rules 2003, National Mineral Policy 2009, and WBCSD (2012) guidelines.

REHABILITATION PRACTICES IN MALAYSIAN QUARRIES

In Malaysia, the implementation of quarry rehabilitation remains inconsistent and generally underdeveloped, despite decades of quarrying activity across both Peninsular and East Malaysia. Rehabilitation practices typically include basic slope stabilization, erosion control, and sporadic revegetation efforts, with minimal attention to ecological function or landscape integration (Neri and Sánchez, 2010). Larger operations affiliated with multinational cement producers tend to adopt more structured rehabilitation efforts, guided by corporate environmental standards and certification requirements such as ISO 14001. In contrast, small and medium-sized operators often lack both the financial resources and technical expertise to undertake meaningful post-quarry restoration (Yahya et al., 2018). In many instances, quarry sites are simply abandoned upon resource exhaustion, leaving behind unsafe slopes, unproductive land, and environmental liabilities for local governments and communities.

A review of Environmental Impact Assessment (EIA) reports reveals that rehabilitation strategies are generally limited to “green cover” or aesthetic landscaping measures during the operational phase, with no systematic post-closure land use planning (Mzuri Mining Ltd., 2021). Moreover, the technical component of these rehabilitation plans rarely include soil conditioning, native species propagation, or biodiversity considerations, and often lack dedicated budgets for monitoring and maintenance. Even when EIAs recommend long-term ecological restoration, the absence of legal enforcement mechanisms means these plans are seldom implemented (Zaharah et al., 2018). Best practice frameworks, such as those developed by the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), emphasize progressive rehabilitation, stakeholder engagement, and post-closure land use alignment with community needs (WBCSD, 2012). However, these principles are not uniformly applied in Malaysia. A 2010 evaluation of nine limestone quarries by Neri and Sánchez (2010) found that, despite ISO certification, many sites displayed poor planning and weak integration of biodiversity targets in rehabilitation programs.

There have been isolated examples of successful quarry rehabilitation in Malaysia, often driven by partnerships between industry, academia, and government. For example, certain decommissioned sites in Selangor have been converted into recreational parks or water retention ponds, illustrating the

potential of quarry voids for multifunctional post-mining uses (Yahya et al., 2018). Yet, these cases remain exceptions rather than the rule. The prevailing approach remains reactive rather than proactive, with rehabilitation plans prepared as an afterthought rather than as an integral component of quarry lifecycle management. Without standardized national guidelines, consistent monitoring, and performance-based incentives, rehabilitation efforts will continue to fall short of achieving environmental sustainability or restoring the ecological integrity of karst landscapes.

CASE STUDIES AND EIA INSIGHTS

Environmental Impact Assessments (EIAs) serve as a primary tool for assessing the potential consequences of quarry operations and recommending mitigation and rehabilitation measures. However, a review of EIA documents in Malaysia reveals that while these assessments comply with procedural requirements, they often fall short in terms of technical depth and post-operational planning. For instance, the ESIA report for Mzuri Mining Ltd.'s proposed limestone quarrying project in Kwale County emphasized slope stabilization, sedimentation control, and visual screening but lacked specific timelines, performance indicators, or biodiversity targets for long-term ecological rehabilitation (Mzuri Mining Ltd., 2021). This mirrors a broader trend in Malaysia, where rehabilitation plans within EIAs are often vaguely defined, underfunded, and lack continuity after site closure.

A critical weakness in many EIAs is their emphasis on pre-construction and operational phase mitigation, with little attention paid to end-of-life site planning. While some EIAs outline general goals for reforestation or landform modification, few specify the use of native species, soil remediation protocols, or succession planning for habitat restoration (Neri and Sánchez, 2010). This gap is exacerbated by the absence of a centralized monitoring framework to evaluate the implementation and effectiveness of rehabilitation commitments. According to the Auditor General's Report (2015), even when rehabilitation is included in project approvals, enforcement is rarely followed through due to limited resources and overlapping agency responsibilities.

Table 1. Comparison of Quarry Rehabilitation Elements in EIA Reports: Malaysia vs. International Best Practices

Category	Malaysia (Typical EIA Reports)	International Best Practice (e.g., Australia, Brazil)
Rehabilitation Planning in EIA	General and non-specific	Detailed and site-specific
Use of Native Species	Rarely specified	Emphasis on endemic/native flora
Post-Closure Monitoring	Minimal or absent	Long-term monitoring integrated
Stakeholder Engagement	Limited or tokenistic	Community-inclusive planning
Budget Allocation for Rehab	Often omitted or unclear	Dedicated and transparent budgets
Legal Enforcement of EIA Commitments	Weak enforcement mechanisms	Legally binding with penalties

Despite these shortcomings, there are instructive case studies that illustrate both the challenges and opportunities in Malaysian quarry rehabilitation. For example, a former quarry site in Cheras, Selangor was partially converted into a landscaped park and flood retention pond, reflecting a multifunctional post-use approach that aligns with community needs (Zaharah et al., 2018). However, the project lacked long-term ecological monitoring and failed to integrate broader biodiversity goals. In contrast,

international case studies in Australia and Brazil have demonstrated the efficacy of incorporating ecological engineering, community consultation, and adaptive management into quarry rehabilitation (Neri and Sánchez, 2010). These comparative insights suggest that while Malaysia has the potential to develop effective rehabilitation strategies, it must first address regulatory gaps, institutional fragmentation, and the lack of clear performance-based evaluation mechanisms.

CHALLENGES AND KNOWLEDGE GAPS

Despite the growing recognition of the importance of post-quarry rehabilitation, Malaysia continues to face significant structural and technical challenges that hinder the effective restoration of limestone quarry sites. A major constraint is the absence of a standardized national framework that clearly defines the roles, responsibilities, and expectations for quarry operators throughout the lifecycle of extraction and closure (Yahya et al., 2018). The fragmented legal system where federal policies are not binding on state governments leads to inconsistencies in implementation, monitoring, and enforcement (Zaharah et al., 2018). Additionally, quarry operators often view rehabilitation as a regulatory burden rather than a component of sustainable resource stewardship, resulting in minimal investments in long-term ecological restoration. The lack of financial instruments such as performance bonds, tax incentives, or rehabilitation trust funds further weakens compliance incentives.

From a technical standpoint, there is a limited body of localized research and expertise in ecological restoration specific to karst environments. Many rehabilitation plans fail to account for the complex hydrology, soil constraints, and microclimatic conditions of tropical limestone ecosystems (Neri and Sánchez, 2010). This leads to poor vegetation establishment, low biodiversity recovery, and landscape instability. Moreover, there is insufficient documentation and public access to data on rehabilitation outcomes, preventing knowledge transfer and benchmarking of good practices across the industry. Academic studies are often constrained by site access and data availability, further compounding the gap between research and practice. Stakeholder engagement also remains underutilized, with limited inclusion of local communities, indigenous groups, and NGOs in the formulation and monitoring of rehabilitation efforts.

Finally, a critical knowledge gap exists in the integration of post-quarry land use planning into broader spatial and development policies. Quarry rehabilitation is rarely aligned with national goals on biodiversity conservation, climate resilience, or socio-economic development. For instance, abandoned quarries in ecologically sensitive areas are sometimes left to regenerate passively, without assessing the site's potential for biodiversity corridors, community forests, or water catchment functions (Clements et al., 2006). Addressing these multidimensional challenges requires a paradigm shift in Malaysia's quarry sector from fragmented compliance to integrated landscape stewardship supported by legislation, science, and community-driven governance.

RECOMMENDATIONS FOR SUSTAINABLE REHABILITATION

To improve the ecological and social outcomes of limestone quarry rehabilitation in Malaysia, a set of actionable, evidence-based recommendations is proposed:

1. Enact a binding national rehabilitation framework. Malaysia should formalize a standardized quarry rehabilitation policy that mandates progressive rehabilitation and post-closure planning, aligned with the seven parameters proposed by the World Business Council for Sustainable Development. This would ensure legal clarity and uniform compliance across states.
2. Require site-specific, ecologically informed closure plans. Rehabilitation strategies must be tailored to local geomorphology, climate, and biodiversity. This includes the mandatory use of native species, geomorphic replication techniques for karst aesthetics, and adaptive revegetation models based on ecological succession.
3. Establish quarry rehabilitation trust funds. Mandatory financial provisions, such as escrow accounts or environmental bonds, should be established prior to quarry operations. These funds would

ensure resources are available for rehabilitation, even if the operator ceases activity or becomes insolvent.

4. Integrate stakeholder participation and community co-benefits. Engaging local communities, indigenous groups, and NGOs in the planning, monitoring, and post-rehabilitation use of quarry sites fosters transparency and increases social acceptance. Rehabilitation should aim to generate co-benefits such as recreational parks, water retention systems, or agroforestry zones.

5. Develop a centralized monitoring and reporting platform. A national database should be established to track rehabilitation activities, compliance, and ecological performance indicators. This platform would also serve as a knowledge hub for research, case studies, and cross-sectoral collaboration.

6. Align rehabilitation with national sustainability goals. Quarry rehabilitation should be integrated into broader frameworks such as Malaysia's National Biodiversity Strategy, Sustainable Development Goals (SDGs), and climate resilience plans. This alignment would promote multifunctional land use, biodiversity connectivity, and long-term socio-ecological value.

CONCLUSION

Limestone quarrying, particularly in Malaysia's ecologically sensitive karst landscapes, presents complex environmental and governance challenges. While the economic importance of quarrying is undeniable, the long-term costs of ecological degradation and landscape fragmentation are substantial. Current rehabilitation practices remain reactive, fragmented, and insufficiently monitored. A more holistic approach rooted in binding legislation, scientifically informed planning, and community engagement is urgently needed.

This review highlights the urgent need for a paradigm shift from mitigation-centric EIAs toward integrated, life-cycle rehabilitation frameworks. The implementation of site-specific, performance-based restoration strategies, supported by transparent financial mechanisms and stakeholder-inclusive governance, will be critical in reviving degraded limestone landscapes. In doing so, Malaysia can position itself as a regional leader in sustainable quarrying and ecological restoration, bridging development with environmental integrity.

REFERENCES

- Clements, R., Sodhi, N. S., Schilthuizen, M., Ng, P. K. L. (2006). Limestone karsts of Southeast Asia: imperiled arks of biodiversity. *BioScience*, 56(9), 733–742.
- Davison, G. W. H., Kiew, R. (1990). Survey of limestone hills in Peninsular Malaysia. *Malayan Nature Journal*, 44(1), 115–127.
- Ford, D., Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology* (2nd ed.). Wiley.
- Gillieson, D. (2011). Karst. In A. Goudie (Ed.), *The Oxford Companion to Global Change* (ss. 526–529). Oxford University Press.
- Goldscheider, N., Drew, D. (2007). *Methods in Karst Hydrogeology*. Taylor & Francis.
- Jaafar, M. N., Tarmizi, N. I. (2019). Issues And Challenges Of Quarry Management In Malaysia. *International Journal of Real Estate Studies*, 13(2), 14–22. <https://www.utm.my/intrest>
- Kiew, R., Ummul-Nazrah, A. R., Ong, P. T., Imin, K., Aliaa-Athirah, A. M., Rafidah, A. R. (2019). Distribution and Conservation Implications of Limestone Plant Species In Felda Chiku Limestone Flora, Kelantan, Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science*, 31(1), 19–36. <https://doi.org/10.26525/jtfs2019.31.1.019036>

Liew, T. S., Price, L. L., Clements, G. R. (2016). Using Google Earth to improve the management of threatened limestone karst ecosystems in Peninsular Malaysia. *Tropical Conservation Science*, 9(4), 903–920.

Mzuri Mining Ltd. (2021). Environmental and Social Impact Assessment (ESIA) Study Report for Proposed Limestone Quarrying Activities in Pongwe Kidimu, Kwale County. Envasses Environmental Consultants Ltd.

National Audit Department. (2015). Laporan Ketua Audit Negara: Audit of Performance and Compliance of Federal Ministries/Departments and Government-Linked Companies (Series 1). Jabatan Audit Negara Malaysia. <https://www.audit.gov.my>

Neri, A. C., Sánchez, L. E. (2010). A procedure to evaluate environmental rehabilitation in limestone quarries. *Journal of Environmental Management*, 91(11), 2225–2237.

Talento, K., Amado, M., Kullberg, J. C. (2020). Quarries: From Abandoned to Renewed Places, Review. *Land*, 9(5), 136.

Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M. (2005). Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Springer.

World Business Council for Sustainable Development [WBCSD]. (2012). Guidelines on Quarry Rehabilitation.

Yahya, Z. b., Ariffin, M., Abdullah, S. H. (2018). Legislative analysis on quarry rehabilitation in Selangor, Malaysia. *Resources Policy*, 55, 1–8.

DOĞALTAŞ SEKTÖRÜNDE EKO-VERİMLİLİK: YEŞİL/EKO ETİKET

ECO-EFFICIENCY IN THE NATURAL STONE SECTOR: GREEN/ECO LABEL

R. Altındağ^{1*}, N. Şengün¹, İ. Uğur¹, D. Akbay², G. Ekincioglu³

¹*Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Isparta*

²*Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çan MYO, Çanakkale*

³*Ahi Evran Üniversitesi, Kaman MYO, Kırşehir*

*sorumlu yazar: rasitaltindag@sdu.edu.tr

ÖZ

Eko-Verimlilik, diğer bir ifade ile temiz üretim ya da sürdürülebilir üretim kavramı, 1990'lı yılların başından itibaren birçok ülkenin öncelikli politika gündeminde yer almaya devam eden önemli bir yaklaşımdır. Eko-Verimlilik kavramı, yüksek verime sahip üretim teknolojisi ve yöntemlerinden yararlanarak aynı üretimi miktarının daha az doğal kaynak ve enerji tüketimiyle ve daha düşük düzeyde atık oluşumuyla gerçekleştirilmesini ifade etmektedir. Eko-Verimliliğe dayalı yapılan üretimlerde başlıca amaç, süreç verimliliğinin artırılması, enerji, doğal kaynak ve hammadde kullanımının azaltılması ve çevresel etkileri en aza indirerek sürdürülebilir işletmelerin oluşturulmasını sağlamaktır. Avrupa Birliği (AB) Eko-Verimlilik etiket fikri ilk olarak Avrupa Çevre yılı olan 1987 yılında ortaya atılmıştır. Eko-Verimlilik etiketleri, ürün ve hizmetlerin çevresel sicilleri hakkında güvenilir bilgi sağlayan gönüllülük esasına dayalı, katılımcı, piyasa temelli ekonomik araçlar olarak değerlendirilebilir. Bir çiçek amblemi ile simgelenen AB Eko-Etiketi, üretim ve tüketim araçlarının çevreye duyarlı olduğunu göstermektedir. AB Eko-Etiketi, ülkemizde henüz verilmemektedir. Bu etiket sadece AB'ye tam üyelik statüsüne sahip ülkelerde yetkili kurumlar tarafından verilebilmekte olup küresel ölçekte başvuruya açık bir çevre etiketleme sistemidir. Gönüllülük esasına dayanan ve tüketicilerin çevre dostu ürünlere yönelmesini öngören bu sistemin ülkemizde yaygınlaşması, Eko-Verimlilik etiketine sahip ürünlerin desteklenmesi ve uluslararası pazarlara erişim açısından önemli avantajlar sağlayacaktır. Doğaltaş sektörü açısından halihazırda Eko-Etiket uygulamasına yönelik herhangi bir yasal zorunluluk bulunmamaktadır. Ancak yakın gelecekte, özellikle AB ülkelerine ve ABD'ye yapılan ihracatlarda ürünlerin bu etiketi taşıması bir gereklilik haline gelecek olup çevre ile barışık madencilik çerçevesinde “yeşil madencilik”, “yeşil doğaltaş” ve “yeşil ürün” kavramlarının ön plana çıkması beklenmektedir. Bu bağlamda, Türkiye doğaltaş sektörünün söz konusu dönüşüme ne ölçüde hazır olduğu, bu hazırlık sürecinde hangi adımların atıldığı ya da atılması gerektiği gibi sorular, bu çalışmanın odak noktalarından birini oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Doğaltaş, eko-verimlilik, yeşil etiket, eko etiket, sürdürülebilirlik

ABSTRACT

Eco-efficiency, also referred to as clean production or sustainable production has remained a significant component of national policy agendas in many countries since the early 1990s. The concept of eco-efficiency pertains to maintaining the same level of production output through the use of high-efficiency production technologies and methods, while simultaneously reducing the consumption of natural resources and energy, and minimizing waste generation. The core objectives of eco-efficient production include enhancing process efficiency, decreasing the use of energy, raw materials, and

natural resources, and fostering the development of sustainable enterprises by mitigating environmental impacts. The concept of an eco-efficiency labelling system within the European Union (EU) was first introduced in 1987, designated as the European Year of the Environment. These eco-labels are voluntary, participatory, and market-based policy instruments that provide reliable information on the environmental performance of products and services. The EU Ecolabel, symbolized by a flower logo, signifies that both production and consumption processes meet established environmental criteria. Currently, the EU Ecolabel is not issued in Türkiye. Although it is a globally recognized environmental labelling scheme, the right to grant the EU Ecolabel is reserved for authorized institutions in full member states of the EU. Nevertheless, the widespread adoption of this voluntary system in Türkiye, particularly as a tool to guide consumers toward environmentally friendly products would offer significant advantages, including increased international competitiveness and enhanced market access for eco-labelled products. From the perspective of the natural stone sector, there is currently no legal obligation to implement the Ecolabel scheme. However, in the near future, particularly in exports to EU countries and the USA, carrying this label will become a requirement. Within the framework of environmentally responsible mining, concepts such as "green mining," "green natural stone," and "green product" are expected to gain prominence. In this context, one of the main focal points of this study is to assess the extent to which the Turkish natural stone sector is prepared for this transformation, as well as the steps that have been taken or need to be taken during this preparation process.

Keywords: Natural stone, eco-efficiency, green label, eco-label, sustainability

1. GİRİŞ

Dünya hızla ilerleyen küresel ısınmanın etkileriyle karşı karşıyadır. Sanayi Devrimi'nin üçüncü aşamasıyla (Endüstri 3.0) başlayan ve günümüzde Endüstri 4.0 ve 5.0 süreçleriyle devam eden teknolojik gelişmeler başta fosil yakıtların tüketimi olmak üzere sanayi tesislerinin ve kentleşmenin neden olduğu karbon salınımının artmasına yol açmıştır. Bu gelişmelere bağlı olarak kullanılabilir tatlı su kaynaklarının hızla tükenmesi, küresel ısınma ile oluşan kurak ve yağışsız iklim koşullarının getirmiş olduğu olumsuzluklar ve bu olumsuzluklara bağlı olarak dünya genelinde çıkan orman yangınlarının artışı gibi birçok çevresel felaketlerin son yıllarda arttığı görülmektedir. Bunun yansısı dünya nüfusunun artması ve alışkanlıkların değişmesi ile beraber toplumların artan üretim ve tüketim kapasiteleri, doğal kaynaklara olan talebi arttırmakta ve zaman zaman geri dönüşü mümkün olmayan çevresel tahribatlara neden olabilmektedir. Doğa ile barışık sürdürülebilir madencilik kapsamında çevresel tahribatın azaltılmasına yönelik düzenlemeler kapsamında üretim süreçlerinde doğal kaynak kullanımı, ürünün yaşam döngüsü bileşenleri ve çevresel etkileri gibi konuların gündeme gelmesi ile birlikte eko etiket (eco-label) kavramı ortaya çıkmıştır.

1970'lerde ortaya çıkan çevre etiketi kavramının ilk çalışması Almanya tarafından 1977'de gerçekleştirilmiş (Üçüncü, 2009; Çaça, 2016), 1978 yılında Blue Angel ismi ile piyasadaki ürünlerde yer almaya başlayan ilk eko etiket uygulamasını ABD, Japonya ve Fransa gibi ülkeler Almanya'dan sonra takip etmiştir. 1989'da ise Blue Angel etiketini örnek alan Danimarka, İsveç, Norveç, Finlandiya ve İzlanda'nın oluşturduğu Kuzey Avrupa ülkeleri "Nordic Swan" isimli eko etiket uygulamasını başlatmışlardır (Boström and Klintman, 2011). Nordic Swan eko etiket kavramından sonra Avrupa Komisyonu da çevre etiketi kavramını gündeme getirmiş ve 23.03.1992 tarihinde "Ecolabel" adı verilen Avrupa Birliği çevre etiketi sistemini yürürlüğe koymuştur (EU Comission, 1992; İMMİB, 2018).

Dünya genelinde yirminci yüzyılın sonlarında başlayan ve 21. Yüzyılın başlarında devam eden Paris iklim anlaşması ve Kyoto protokolü gibi uluslararası anlaşmaların sonuçları tüm dünyada uygulanmaya başlanmıştır. Bu kapsamda anlaşmalara taraf olan ülkelere kendi ulusal mevzuatlarında gerekli yasal düzenlemeleri hayata geçirmeleri ve etkin bir şekilde uygulamaları talep edilmiştir. Bu doğrultuda karşılıklı gümrük vergileri, teknik düzenlemeler ve çevresel standartlara dayalı zorunlu koşullar gibi çeşitli yaptırımlarla dünya ticareti yeniden şekillenmeye başlamıştır.

Eko-verimlilik ve çevre etiketi uygulamaları, doğaltaş madenciliğinde çevresel etkilerin azaltılması ve üretim süreçlerinin sürdürülebilir bir çerçevede yürütülmesi açısından kritik öneme sahiptir. Doğaltaş sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin Eko-Verimlilik etiketine sahip olmaları, söz konusu tesislerde enerji tüketiminin minimum seviyede tutulduğunu, karbon emisyonlarının minimize edildiğini, su kaynaklarının etkin ve kontrollü bir şekilde kullanıldığını, işletmede oluşan atık miktarının düşük tutulduğunu ve bu atıkların çevre mevzuatına uygun yöntemlerle bertaraf edildiğini göstermektedir. Ayrıca, bu işletmelerde yenilenebilir kaynaklarının ve çevreye daha az zarar veren maddelerin kullanıldığı ve tesislerde sağlıklı bir çalışma ortamının sağlandığı bu belge ile teyit edilmiş olmaktadır.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından çevre etiketi; tekstil, seramik, temizlik kağıdı, deterjanlar ve kişisel bakım-kozmetik gibi alanlardaki ürünlere verilmiş ve verilmeye de devam edilmektedir. Bu etiketin verilmesinde temel alınan Eko-Etiketleme kriterleri; enerji verimliliği, ısı, su tasarrufu, geri dönüşüm, atık azaltılması, düşük karbon emisyonu ve biyoçeşitliliğin korunması gibi çevresel sürdürülebilirlik ilkelerine dayanmaktadır.

Ülkemizde de son yıllarda çevresel duyarlılık kapsamında doğaltaş sektörünü de kapsayan çeşitli yasal düzenlemeler yürürlüğe girmiş olup önümüzdeki süreçte bu mevzuatların içeriğinin de genişleyeceği anlaşılmaktadır. Bu kapsamda 19.10.2018 tarihli Resmî Gazete’de yayımlanan 30570 sayı numaralı Çevre Etiketi Yönetmeliği ve bu yönetmelik doğrultusunda hazırlanan “Doğaltaş Ürünlere Çevre Etiketi Verilmesine Dair Kriterler” kamuoyuna duyurulmuştur. Bunun yansısı 14.01.2025 tarihli Resmî Gazete’de yayımlanan 32782 sayı numaralı Endüstriyel Emisyonların Yönetimi Yönetmeliği ile çevresel etki yönetimine ilişkin yükümlülükler daha da kapsamlı hale getirilmiştir. Dolayısıyla önümüzdeki süreçte ülkemizde faaliyet gösteren doğaltaş işletmelerinin bu yasal düzenlemeler çerçevesinde bazı gerekli düzenlemelere gitmeleri kaçınılmaz olacaktır.

Bu çalışma kapsamında, doğaltaş üretim endüstrisinde, eko-verimlilik (yeşil etiket) uygulamalarının hayata geçirilmesi için “*Türkiye doğaltaşlarının temiz (sürdürülebilir) üretimi için bir uygulama kılavuzu geliştirilmesi*” kapsamında sektöre yönelik örnek bir model oluşturulmaya ve sektörün bileşenlerinin bu konularda hazırlıklı olmaları açısından dikkat çekilmeye çalışılmıştır. Önerilen ve geliştirilecek bu model ile Türkiye doğaltaş ocaklarının eko-verimlilik etiketli (yeşil etiketli) üretim sınıflamaları yapılabilecek ve böylece AB ülkelerinin arasında 09.08.2009 tarihinde imza altına alınan ve 12.08.2009 tarihli yayımlanmış olan (2009/607/EC) numaralı AB direktifleri ve AB Komisyon kararlarına Türkiye doğaltaş madenciliğinin de uyum sağlamasına katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda doğaltaş madenciliğinde işletmecilik anlayışının üretimden tüketime kadar tüm aşamalarda doğa ile barışık ve çevreye duyarlı bir işletmecilik anlayışının yaygınlaştırılması sağlanacaktır.

2. EKO VERİMLİLİK KAVRAMI

Eko-Verimlilik (temiz üretim), diğer bir ifade ile temiz üretim ya da sürdürülebilir üretim kavramı, 1990’lı yılların başından itibaren birçok ülkenin öncelikli gündem maddeleri arasında yer almıştır. Eko-Verimlilik kavramı, yüksek verime sahip üretim teknolojisi ve yöntemlerinden yararlanarak aynı miktardaki üretimi daha az doğal kaynak ve enerji kullanarak aynı zamanda da daha az miktarda atık/artık ve kirlilik oluşturarak üretim gerçekleştirme kavramına dayanmaktadır. Eko verimliliğe dayalı yapılan üretimlerde başlıca amaç, üretim süreç verimliliğinin artırılması, doğal kaynak ve hammadde kullanımının azaltılması, enerji tüketiminin azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması çevre dostu işletmelerin hayata geçirilmesini sağlamaktır. Eko-verimli malzemeler, belirli bir uygulamada daha az malzeme kullanımını sağlayan, ürünün üretiminde veya dönüştürülmesinde, uygulama içindeki işletme süresinde daha az enerji kullanımını sağlayan, toksik olmayan ve geri dönüştürülebilir olan, uygulama içinde daha uzun süre dayanıklı olan malzemeler olarak da tanımlanabilir.

AB Eko-Verimlilik etiket fikri ilk olarak Avrupa Çevre yılı olan 1987 yılında ortaya atılmıştır. Eko-Verimlilik etiketleri, ürün ve hizmetlerin çevresel sicilleri hakkında güvenilir bilgi sağlayan gönüllülük esasına dayalı, katılımcı, piyasa temelli ekonomik araçlar olarak değerlendirilebilir. Tüm AB üye ülkeleri için geçerli olan çevre etiket sistemi, 3 yılı aşkın bir zaman süresince yapılan kapsamlı çalışmalar sonucunda AB Bakanlar Konseyinin 23 Mart 1992 tarihli 880 sayılı Tüzüğü ile hayata geçirilmiştir. Eko-Etiket yasasının güçlendirilmesi ve etkinliğinin artırılması için (EC) 1980/20002 numaralı yasa ile politik amacı belirlenmiş ve prensipleri zenginleştirilmiştir. Bu yasanın uygulamaya girmesinden sonra geçen sürede elde edinilen tecrübeler AB Eko-Etiket sisteminin etkinliğinin artırılması ve yürürlüğünün daha düzenli hale getirilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu kapsamda etiket yasası 2009 yılında yeniden düzenlenerek AB bünyesinde geliştirilen diğer direktifler ile (Enerji tüketen ürünlerde Eko tasarım, Çevre Eylem Programı, Sürdürülebilir Kalkınma Stratejileri ve İklim Değişikliği Programı, Yeşil Kamu İhale Eylem Planları) uygunluğu sağlanmıştır.

Bir çiçek amblemi ile simgelenen AB Eko-Etiketi, üretim ve tüketim araçlarının çevreye duyarlı olduğunu göstermektedir. Etiket, belirli ürün ve hizmetlere, tüm üretim aşamaları değerlendirilerek ve bağımsız bir organ olan Avrupa Birliği Eko-Etiket Kurulu ekolojik kıstasları göz önünde bulundurularak verilmektedir. AB Eko-Etiketi çok geniş bir ürün ve hizmet yelpazesini kapsamakta ve sürekli yeni ürün grupları da eklenmektedir. Basit bir çiçek amblemine sahip olmasına rağmen, göz önünde bulundurduğu çevre kıstasları oldukça kapsamlıdır. Bu kıstaslar tüm üye ülkelerden uzmanların kapsamlı değerlendirmeleri sonrasında kabul edilir ve ürünün çevre ve performans standartlarına uygunluğu doğrulandıktan sonra da etiket başvuru sahibine verilir. AB Eko-Etiketi, ülkemizde henüz verilmemektedir. Sadece tam üye olan ülkelerde yetkili kurumlar tarafından verilen AB Eko-Etiketine dünya çapında başvurular yapılabilmektedir. Gönüllülük esasına dayanan ve tüketicilerin çevre dostu ürünlere yönelmesini öngören bu sistemin ülkemizde yaygınlaşması, Eko-Verimlilik etiketli ürünler için verilen teşviklerde ve uluslararası pazara girebilme/rekabet açısından önemli bir avantaj oluşturacağı bir gerçektir.

Eko-verimlilik kavramı, Türkiye’de ilk kez 1999 yılında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK) ve Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (TTGV) tarafından verilen “Bilim-Teknoloji-Sanayi Tartışmaları Platformu, Temiz Üretim-Temiz Ürün Çevre Dostu Teknolojiler Çalışma Grubu Sanayi Sektörü Raporu” ile gündeme gelmiştir. 2008 yılında yürürlüğe giren ve 2011 yılında tamamlanan “Türkiye’nin İklim Değişikliğine Uyum Kapasitesinin Geliştirilmesi Birleşmiş Milletler Ortak Programı” kapsamında bir alt-program olarak Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatı (UNIDO) sorumluluğunda ve TTGV tarafından Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) iş birliğiyle Eko-verimlilik (Temiz Üretim) Programı ulusal bazda yürütülmüş ve tamamlanmış bir programdır (TTGV, 2010). Daha sonra (Mülga: Çevre ve Orman Bakanlığı /Çevre ve Şehircilik Bakanlığı) Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı iş birliğiyle 2010 yılında, ülkemizde temiz sürdürülebilir bir üretimin yaygınlaştırılmasına yönelik altyapının oluşturulması amacıyla, “Türkiye’de Temiz (Sürdürülebilir) Üretim Uygulamalarının Yaygınlaştırılması için Çerçeve Koşulların ve Ar-Ge İhtiyacının Belirlenmesi Projesi” başlıklı proje hayata geçirilmiştir.

Onargan (2009), çalışmasında doğaltaş madenciliğinde eko-üretim, verimlilik ve çevre yönetimine değinerek tartışmış ve eko verimlilik temelli üretim koşullarını irdelemiştir. Onargan (2012), Eko-üretim ve eko-etiketli üretimin önemini vurgulamış ve Türkiye doğaltaş endüstrisinde eko verimlilik uygulamalarının hayata geçirilmesinin, iç ve dış pazardaki ürün talebine önemli katkılar sağlayacağını belirtmiştir.

AB’ye üye ülkeler arasında yer alamayan Türkiye’nin sürdürülebilir doğaltaş üretimi konusunda son yıllarda Çevre Etiketi Yönetmeliği (2018) ve bu yönetmelik kapsamında “Doğaltaş Ürünlere Çevre Etiketi Verilmesine Dair Kriterler” gibi çeşitli mevzuat çalışmaları yürütülmeye başlanmıştır. Bu bildiri kapsamında, Bakanlık web sayfasında yayınlanan “Çevre Etiketi verilmesine dair kriterlerin genel

çerçevesi'nin" yeterli olmadığı ve doğaltaş sektöründe yeşil etiket verilmesine dair sektör bileşenlerinin bir araya gelmesiyle daha detaylı kriterlerin hazırlanmasında fayda olduğu değerlendirilmektedir.

2.1. Çevre Etiketi

Çevre etiketinin amacı, ürün/hizmetlerde düşük karbon emisyonu, atık önleme, enerji verimliliği, su tasarrufu, zararlı kimyasalların kullanılmaması gibi hususları dikkate alarak çevreye duyarlı bir süreç takip eden işletmelerin teşvik edilerek sürdürülebilir tüketim ve üretim uygulamalarının desteklenmesidir.

Türkiye Çevre Etiket Sistemi ile amaçlanan temel ilkeler ise; enerji verimliliği, iklim değişimine etkinin azaltılması, ısı tasarrufu, su tasarrufu, doğal kaynak yönetimi, insan sağlığının korunması, tehlikeli kimyasalların kullanımının kısıtlanması, atık su geri dönüşümü, atık geri dönüşümü, biyoçeşitliliğin korunması, dayanıklılık, çevresel bilgide şeffaflık olarak özetlenebilir.

Türkiye Çevre Etiket Sistemi, Küresel Eko-Etiket Ağı'na (Global Eco-Labeling Network-GEN) 2022 yılında gerçekleştirilen denetimlerin ardından tam üye olarak kabul edilmiştir. Bu sayede Türkiye Çevre Etiket Sistemi'nin uluslararası geçerliliği ve tanınırlığı tescillenmiştir.

Çevre etiketi başvurusu yapılabilecek ürün grupları; seramik kaplama ürünleri, tekstil grubu ürünleri, temizlik kağıdı grubu ürünleri, elde yıkanabilir bulaşık deterjanı, turistik konaklama hizmet grubu, kişisel bakım ve kozmetik grubu ürünleri, cam grubu ürünleri, doğaltaş ürün grubu, bulaşık makinesi deterjanı, çamaşır deterjanı grubu ürünleri, sert yüzey temizleyiciler ürün grubu şeklindedir.

3. EKO-VERİMLİLİK ETİKETİ DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ

Eko-Verimlilik etiketinin amacı, ocaklarda verimlilik ve doğal kaynak kullanımının iyileştirilmesini sağlamak, üretim artışını sağlamak, ton başına genel maliyetleri düşürmek ve çevresel etkileri azaltmaktır. Gün geçtikçe enerji maliyetlerinin artması, su kaynaklarının sınırlı oluşu, küresel ısınmanın etkisi ve daha sıkı çevresel kısıtlamalar ile madencilik endüstrisinin eko-verimlilik kaynak kullanımına bir an önce geçmesi gerekmektedir. Madencilik süreçlerinin çevresel hedeflerle uyumlu hale getirilmesi ve ekonomik açıdan sürdürülebilir kılınabilmesi için daha yüksek verimlilikle yürütülmesi gerekmektedir. Kaynak verimliliğinin artırılması ekonomik getiriye yükseltmekte ve projelerin uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir.

Eko-Verimlilik etiketine sahip olunmasıyla Türkiye doğaltaş sektörünün uluslararası alanda rol almasında, AB ve uluslararası normlara uygun şartlarda üretim koşullarının oluşturulmasında önemli düzeyde katkı sağlanacaktır. Ayrıca, sürdürülebilir madencilik temelinde toplumsal sorun ve tepkileri çözme, doğayla barışık madencilik ve sektörün rekabet gücünü artırma potansiyeli de yüksek düzeyde gerçekleşecektir.

Eko-etiket belgesi alan firmaların yasal mevzuatlarda öncelik ve çeşitli harçlarda indirim teşviği gibi birtakım uygulamalarla desteklenmesi sağlanmalıdır. Böylece işletmeciler bu eko-etiket belge almaya teşvik edilecek ve çevresel olumsuz etkiler minimuma indirilecektir.

3.1. İklim Kanunu

Ülkemiz, BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine (BMİDÇS) 2004 yılında ve Paris Anlaşmasına da 2021 yılında taraf olmuştur. 2015 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) kapsamında kabul edilen Paris Anlaşması'nın amaçları;

1. Küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi döneme göre 2°C'nin altında ve tercihen 1,5°C ile sınırlamak,
2. Ülkelerin kendi belirlediği sera gazı azaltım hedeflerini (NDC) hazırlayıp uygulaması,
3. Gelişmekte olan ülkelere iklim finansmanı sağlanması,

şeklinde özetlenebilir. İklim Kanunu, Paris Anlaşması'na uyum sağlamak ve 2053 yılında net sıfır emisyon hedefi için yasal altyapı oluşturma amacı taşımaktadır.

Türkiye, Paris Anlaşması'nı imzalamış ve bu anlaşma 6 Ekim 2021 tarihinde Türkiye Büyük Millet Meclisi (TBMM) tarafından onaylanmıştır. Ancak Türkiye, anlaşmayı "gelişmekte olan ülke" statüsüyle kabul ederek daha fazla iklim finansmanı talebinde bulunmuştur. 2022 yılından itibaren Paris Anlaşması'na uyum kapsamında çeşitli mevzuat çalışmaları başlatılmıştır. Bu kapsamda Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı kurulmuş, Emisyon Ticaret Sistemi, Yeşil Taksonomi ve İklim Kanunu tasarıları hazırlanmıştır. 2025 yılında Paris Anlaşması'nın ikinci NDC (Nationally Determined Contributions/Ülusal Olarak Belirlenen Katkılar, Paris Anlaşması kapsamında her ülkenin hazırladığı ulusal iklim eylem planları) güncelleme dönemi yaklaşırken, Türkiye'de bu sürece uyumunu sağlamak amacıyla hazırlanan İklim Kanunu 02 Temmuz 2025 tarihinde TBMM Genel Kurulundan onaylanarak yasalaşmıştır.

İklim Kanunu'nun temel amacı, Türkiye'nin yeşil kalkınma vizyonunu ve 2053 net sıfır emisyon hedefini gerçekleştirmektir. İklim Kanunu; Türkiye'nin Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne bağlı olarak Paris İklim Anlaşmasında vermiş olduğu Ulusal Katkı Beyanı (NDC) gerekliliklerini yerine getirmeyi amaçlayan ve aynı zamanda yeşil dönüşüm ve iklim değişikliğine uyum sürecini düzenlemek amacıyla çıkartılan kanundur.

İklim Kanunu'nun içeriği, ülkenin iklim değişikliği politikalarını, 2038 ve 2053 yılı hedeflerini, net sıfır hedefine ulaşma yolculuğundaki düzenlemelerden oluşmaktadır. İklim Kanunu temelde Sera Gazı Emisyonlarının kontrolü, Emisyon Ticaret Sistemi ve Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması gibi ana başlıkları içermektedir. İklim Kanunu, özel sektörün ve kamu kurum/kuruluşlarının ülkenin iklim hedeflerine, yeşil dönüşüm uygulamalarına ve net sıfır hedeflerine uyumunu zorunlu hale getirmektedir. Özel ve kamu kuruluşları bir süredir gönüllü olarak bir süredir sera gazı emisyonlarının izlenmesi, karbon ayak izi hesaplamaları ve su ayak izi hesaplamaları gibi çevresel etki değerlendirmelerine yönelik çalışmalar yürütmektedirler. İklim Kanunu'nun yürürlüğe girmesiyle birlikte bazı sanayi sektörleri ve kamu kuruluşları için bu tür çalışmaların ve raporlamaların yasal bir yükümlülük haline gelmesi öngörüldüğü anlaşılmaktadır.

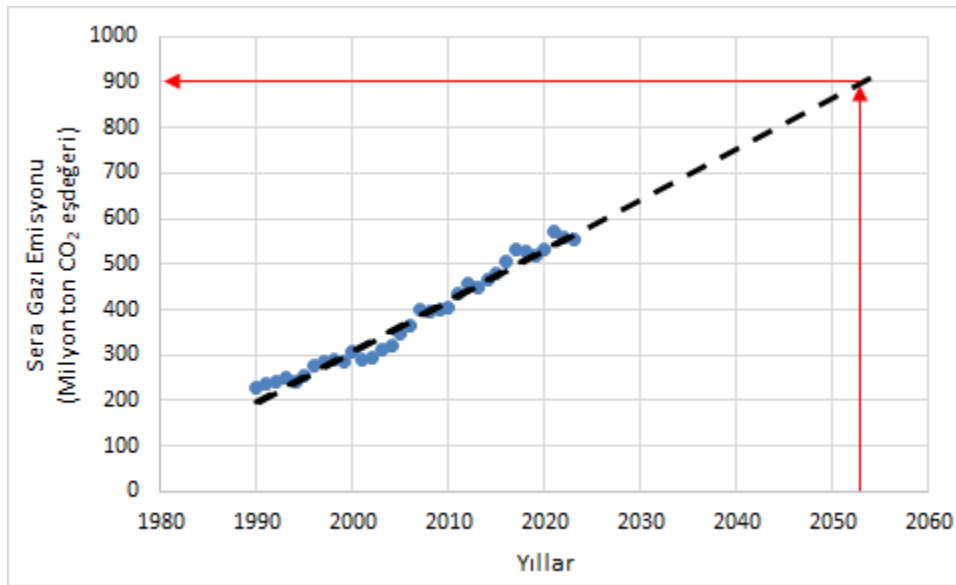
Türkiye Cumhuriyeti'nin Paris Anlaşması çerçevesinde sunduğu Ulusal Katkı Beyanı (NDC), 2038 yılı itibarıyla sera gazı emisyonlarında %41 oranında bir azaltım gerçekleştirilmesini ve 2053 yılı itibarıyla sera gazı emisyonları açısından net sıfır bir ülke haline gelmesini hedeflemektedir. Bu hedefler, Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadeledeki ulusal strateji ve politikalarıyla uyumlu şekilde belirlenmeye çalışılmıştır.

İklim Kanunu'nun yürürlüğe girmesiyle önümüzdeki süreçte ülkemizde yürütülen iklim değişikliği ve yeşil dönüşüm çalışmaları hızlanacaktır. Yakın bir gelecekte Ticaret Bakanlığınca Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasının ülkemiz için de kurulması öngörülmektedir.

Sera gazı envanteri sonuçlarına göre, 2021 yılı toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %7,7 artarak 564,4 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri (eşd.) olarak hesaplanmıştır. Kişi başı toplam sera gazı emisyonu ise 1990 yılında 4 ton CO₂ eşd., 2020 yılında 6,3 ton CO₂ eşd., 2021 yılında 6,7 ton CO₂ eşd. ve 2023 yılında 6,5 CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır (Anonim 2). 1990-2023 yılları arasındaki CO₂ salınım trendi, nüfus artışı ve sanayileşmedeki büyüme trendlerinin devam etmesi ve mevcut sera gazıyla mücadelenin bu düzeyde olduğu varsayımı göz önüne alındığında 2053 yılında yıllık CO₂ salınımının 900 milyon ton CO₂ eşdeğeri salınımının olacağı tahmin edilebilir (Şekil 1). Ancak sera gazı ile

mücadele kapsamında yasal mevzuatların uygulanması, yeni düzenleme ve denetimlerin yapılması ile bu değerler daha aşağıda gerçekleşebilir. 2019 yılı kişi başı salınım ABD için 15 ton ve Rusya için 12,45 tondur (Dalfes, 2022).

İklim Kanunu'nun temel amacı, Türkiye'nin yeşil kalkınma vizyonunu ve 2053 net sıfır emisyon hedefini gerçekleştirmektir. TÜİK (2024) verileri kullanılarak yıllar bazlı sera gazı emisyonlarının değişim grafiği oluşturulmuştur (Şekil 1). Türkiye'nin son 25 yıllık sera gazı emisyonlarının seyrine göre 2053 yılında yaklaşık 900 Mton CO₂ eşdeğeri salınım olacağı tahmin edilebilir. Dolayısıyla 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için önümüzdeki yıllarda çok daha fazla ve etken olan yasal düzenlemelerin ve/veya denetimlerin yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu durum ülkemiz için böyle iken dünyada özellikle gelişmiş ülkelerin (yukarıda verilen ABD ve Rusya verileri dikkate alındığında) sıfır karbon emisyonuna ulaşmak için yapmaları gerekenlerin ülkemizden yapılması gerekenlerden çok daha fazla olduğu bir gerçektir.



Şekil 1. Türkiye'nin yıllar itibarıyla sera gazı emisyon (CO₂ eşdeğeri) değişimi

3.2. Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması

"Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM)" Avrupa Birliği sınırları dahilinde ticari malların üretimi esnasında oluşan karbon maliyetlerine eşdeğer bir maliyetin Avrupa Birliği ülkelerine ithal edilen mallara da uygulanmasına ilişkin düzenleyici bir sistemdir. SKDM kapsamında ilk aşamada, yüksek karbon kaçağı riski taşıyan 6 sektörü (çimento, demir-çelik, alüminyum, gübre, hidrojen ve elektrik) kapsamakta olup ilerleyen zamanlarda diğer sektörlerle yönelik olarak da düzenlemelerin hayata geçirilmesinin kaçınılmazdır. AB'nin Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasına göre 1 Ocak 2026 tarihinden itibaren bu altı sektörün AB'ye ithal edeceği ürünlerin karbon ayak izinin ölçülmesi ve üretim esnasında atmosfere salınan her bir ton başına bir karbon vergisi uygulamasına geçilecektir. Bu düzenlemelerin kapsamının zamanla yayılacağı ve doğaltas sektörünü de bir süre sonra kapsayacağı öngörüsüyle bugünden ülkemiz doğaltas sektörünün de buna hazırlıklı olması gerekmektedir.

Zaman içinde, ürün bazında karbon ayak izi ölçümüne yönelik uygun metodolojilerin geliştirilmesi ile birlikte daha fazla kullanıcı sektör veya ürünün SKDM kapsamına alınması beklenebilecektir. Kapsamın yeni kullanıcı sektör ve ürünleri içerecek şekilde genişletilmesi ve en geç 2030 yılına kadar AB ETS'si içindeki tüm sektörleri içermesi konuları da söz konusu analizler dikkate alınarak karara bağlanacaktır.

3.2.1. Karbon Ayak izi

Şirket bazlı olarak karbon ayak izi azaltma işleminden önce hali hazır durumda ne kadar karbon ayak izinin olduğu hesaplanmalıdır. Hesaplamanın ardından emisyon kaynakları incelenerek alternatif çözümler ile karbon ayak izinin azaltılması mümkündür. Başlıca karbon ayak izi emisyon kaynakları;

1. %29 Elektrik Tüketimi
2. %26 Ulaşım/taşımacılıkta Yakıt Tüketimi
3. %12 İnşaat Sektörü
4. %12 Sanayi ve İmalat Sektörü
5. %9 Tarım ve Hayvancılık

olarak değerlendirilmektedir. Tabi bu oranlar zamanla alınacak/alınmayan önlemlere göre değişecektir.

Bir ürünün karbon ayak izi, o ürünün ya da hizmetin yaşam döngüsü süresince; hammaddesi ve üretiminden, kullanımı, geri dönüşümü veya yaşam sonuna kadar olan sera gazı emisyonlarının ölçülmesiyle hesaplanır. Karbon ayak izi, Kyoto Protokolü tarafından belirlenmiş üretim, hizmet, işleme gibi faaliyetler sonucu oluşan sera gazı etkilerinin karbondioksit (CO₂) cinsinden eşdeğerlerinin hesaplanmasıdır.

3.2.2. Su Ayak izi

Dünyadaki toplam su miktarı 1 milyar 337 milyon km² olup yaklaşık olarak yerkürenin dörtte üçünü kaplamaktadır. Dünya üzerindeki su miktarı sabit olmakla birlikte bunun %96,5'i deniz ve okyanusları, %0,93'ü tuzlu yeraltı suyunu, %0,07'si tuzlu gölleri ve %2,5'i tatlı suları oluşturmaktadır. Bu tatlı suların %68,6'sı buzul ve kalıcı kar, %30,1'i yeraltısuları ve %1,3'ü de yüzey sularından oluşmaktadır. Dolayısıyla dünyadaki toplam su miktarının %0,77'si kullanılabilir durumdadır (Karagüzel, 2022).

Ülkelerin kişi başına düşen yıllık su miktarına göre; (<1000 m³/yıl) su fakiri, (1000-3000 m³/yıl) su sıkıntısı, (3000-10000 m³/yıl) ihtiyacını karşılayan ve (>10000 m³/yıl) su zengini olarak sınıflandırılmaktadır. Türkiye kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı 1412 m³ ile su sıkıntısı çeken sınıfta yer almaktadır (Karagüzel, 2022). Nüfus artış hızı, sanayileşme oranında artış, küresel iklim değişikliklerinin getirdiği olumsuz sonuçlarla birlikte bu oranın daha da aşağılara inebileceği unutulmamalıdır.

Bir malın veya hizmetin üretimi için kullanılan su kaynaklarının toplam miktarına suyun ayak izi denir ve suyun tüketim göstergesi olarak bilinir. Üretimde kullanılan suya sanal su ya da gizli su da denmekte ve gerçekte su doğrudan değil dolaylı olarak daha fazla tüketilmektedir.

İnsan vücudunun %70'nin su olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bir kişinin yaşamsal anlamda solunum, terleme ve boşaltım gibi faaliyetlerinde harcadığı su miktarını günlük en az 2 litre su içerek karşılamaktadır. Banyo, tuvalet ve mutfak gibi günlük yaşamsal alanlar için ortalama günlük 200 litre su kullanılmaktadır. Bu miktar az gelişmiş ülkelerde 60 litreye kadar düşmekte ve gelişmiş ülkelerde ise 700 litreler kadar çıkmaktadır. Aslında su sıkıntısının en büyük nedeni tarımsal amaçlı kullanılan ve üretimde ihtiyaç duyulan su miktarıdır. Tüm bunlar dikkate alındığında bir kişinin günlük tüm ihtiyaçlarını karşılaması için tükettiği su miktarı 7000 litre civarındadır. İklimsel değişimlere bağlı olarak tüketilen su miktarı daha da artmaktadır.

1. Su ayak izi kavramı kullanılan suyun kalitesine ve kullanımına göre mavi, yeşil ve gri su ayak izi üç temel birleşenden oluşmaktadır.

2. *Mavi su ayak izi:* Bir malı veya hizmeti üretmek için kullanılan yüzey ve yeraltı su kaynaklarının diğer bir ifadeyle tatlı su kaynaklarıdır. Türkiye'deki üretimin yaklaşık %19'u mavi sudur.
3. *Yeşil su ayak izi:* Bir malı veya hizmeti üretmek için kullanılan yağmur sularının tümüdür. Bu yağmur suyu yeraltı sularına karışmaz, toprakta veya toprağın üstünde kalır. Türkiye'deki üretimin yaklaşık %64'ü yeşil sudur.
4. *Gri su ayak izi:* Kirletilen su miktarıdır. Türkiye'deki üretimin yaklaşık %17'si gri sudur. Gri su ayak izi nüfusun artması ve endüstrinin gelişmesi ile doğrudan ilintilidir.

Ülkemizde suyun en büyük kısmı %72 ile tarımda, %18'i evlerde ve daha az payı %10'nunu endüstride kullanılmaktadır. Tarımın da en büyük su ayak izi yeşil sudur, yani yağmur sularıdır (Anonim 1).

Mutlutürk (2017) doğaltaş sektöründe su ayak izi üzerine yapmış olduğu çalışmada ham blok üretiminde birim m³ başına tüketilen 630 litre sanal suyun 630 litresinin de mavi su olduğunu, mermer işleme fabrikalarında ise katrak plaka üretiminde birim m² başına tüketilen 2670 litre sanal suyun 534 litresinin mavi su geri kalan 2136 litrenin de gri su olduğunu, S/T Strip üretiminde birim m² başına 995 litre sanal su tükettildiğini ve bu suyun 199 litresinin mavi su geri kalan 796 litresinin ise gri su olduğunu ortaya koymuştur.

3.3. Çevre Etiket Yönetmeliği ve Doğaltaş Ürünlere Çevre Etiketi Verilmesine Dair Kriterler

Ülkemizde son yıllarda çevresel duyarlılık kapsamında 19.10.2018 tarihli Resmî Gazete'de yayınlanan 30570 sayı numaralı Çevre Etiketi Yönetmeliği ve bu yönetmelik kapsamında "Doğaltaş Ürünlere Çevre Etiketi Verilmesine Dair Kriterler" yayınlanmıştır. Bunun yansıra 14.01.2025 tarihli Resmî Gazete'de yayınlanan 32782 sayı numaralı Endüstriyel Emisyonların Yönetimi Yönetmeliği yayınlanmıştır. Dolayısıyla önümüzdeki süreçte ülkemizde faaliyet gösteren doğaltaş işletmelerinin bu yasal düzenlemeler çerçevesinde düzenlemelere gitmeleri kaçınılmazdır.

Doğaltaş ürün grubuna ilişkin çevresel kriterler 18.01.2023 tarihli ve 5555085 sayılı Bakanlık Makamı Oluru doğrultusunda yayımlanmıştır. Çevre Etiketi Yönetmeliği (2018) kapsamında doğaltaş ürün grubunda yer alan ürünlere Çevre Etiketi verilmesine dair kriterler, zorunlu ve opsiyonel olmak üzere iki kategoriye ayrılmıştır. Ürünlerin çevre etiketi alabilmesi için, zorunlu kriterlerin tümünün gerekliliklerine uyulması ve opsiyonel kriterler için ise "Puanlama Sistemi" başlığı altında belirtilen ürün ile ilgili kriterler için asgari puanın alınması gereklidir.

"Doğaltaş" ürün grubu için belirlenen Çevre Etiketi kriterleri ve ilgili değerlendirme ve doğrulama gereklilikleri 5 (beş) yıl geçerli olacaktır. Beş yıllık süre içinde, Çevre Etiketi Kurulu tarafından gerekli görüldüğünde kriterler güncellenebilecek ve Çevre Etiketi Kurulu'nun uygun görüşüne istinaden kriterlerin geçerlilik süresi uzatılabilecektir.

Her bir kriter için değerlendirme ve doğrulama gereklilikleri belirlenmiştir. Başvuru sahibinden kriterlere uygunluğunu kanıtlamak üzere beyan, belge, analiz, test raporu ya da diğer kanıtlar talep edildiğinde, içinde bulunulan duruma uygun olarak talep edilen bu belgeler başvuru sahibi ve/veya tedarikçisi/tedarikçileri ve/veya onların tedarikçisi/tedarikçileri tarafından düzenlenebilir.

Çevre Etiketi kriterlerine ilişkin detaylı bilgi Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın web sayfasında bulunduğundan burada detaylı olarak verilmemiştir.

Bakanlık tarafından Doğaltaş ocağı ve ham madde işleme tesisinde sağlanması gereken kriterler Çizelge 1'de ve bu kriterlere ilişkin puanlama durumu da Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Doğaltaş ürünleri grubu kriterleri ana başlıkları (Anonim 3)

1. TÜM ÜRÜNLER İÇİN UYGULANACAK KRİTERLER	
1.1. Ham Madde Çıkarma	1.5. Tüketicinin Bilgilendirilmesi
1.2. Kısıtlanmış Maddeler	1.6. Çevre Etiketinin Üzerinde Verilen Bilgi
1.3. UOB Emisyonları	1.7. Çevre Yönetim Sistemi (İsteğe Bağlı)
1.4. Kullanıma Uygunluk	
ÜRÜNE ÖZGÜ KRİTERLER	
2. Ara Mamuller (ham blok, plaka veya kayrak taşı)	3. İşlenmiş Ürünler (plaka, modüler karolar, mozaikler vb.)
2.1. Doğaltaş Ocağında Enerji Tüketimi	3.1. İşleme Tesisinde Enerji Tüketimi
2.2. Doğaltaş Ocağında Malzeme Verimliliği	3.2. İşleme Tesisinde Su ve Atık Su Yönetimi
2.3. Doğaltaş Ocağında Su ve Atıksu Yönetimi	3.3. İşleme Tesisinde Toz Kontrolü
2.4. Doğaltaş Ocağında Toz Kontrolü	3.4. İşleme Tesisinde Proses Atıklarının Yeniden Kullanımı
2.5. Doğaltaş Ocağında Personel Güvenliği ve Çalışma Koşulları	3.5. İşleme Tesisinde Bölgesel Entegre Üretim (İsteğe Bağlı)
2.6. Doğaltaş Ocağında Peyzaj Etki Oranları (İsteğe Bağlı)	

“Türkiye Çevre Etiket” hem doğrudan doğaltaş ocağı işletmecileri tarafından üretilen ara mamul doğaltaş ocağı ürünlerine (büyük bloklar veya plakalar) hem de işleme tesisleri tarafından üretilen nihai doğaltaş ürünlerine verilebilecektir. Bu bildiri kapsamında bu kriterler bildiri sayfa sınırlaması nedeniyle verilmemiş olup sadece kriterlere ilişkin değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Çizelge 2. Doğaltaş ürünleri puanlama sistemi (Anonim 3)

Puan verilebilecek kriterler	Ara mamul bloklar veya plakalar	Nihai boyutlandırılmış doğaltaş sert kaplama ürünleri
2.1. Doğaltaş ocağında enerji tüketimi	20 puana kadar	20 puana kadar
2.2. Doğaltaş ocağında malzeme verimliliği	25 puana kadar	25 puana kadar
2.6. Doğaltaş ocağı peyzaj etki oranları (isteğe bağlı)	10 puana kadar	10 puana kadar
3.1. İşleme tesisleri tesisinde enerji tüketimi	-	20 puana kadar
3.2. İşleme tesisleri su ve atık su yönetimi	-	5 puana kadar
3.4. İşleme tesislerinden çıkan proses atıklarının yeniden kullanımı	-	10 puana kadar

3.5. İşleme tesislerinde bölgesel olarak entegre üretim (isteğe bağlı)	-	5 puana kadar
1.7. Doğaltaş Ocağı Çevre yönetim sistemi (isteğe bağlı)	0 veya 5 puan	-
1.7. İşleme Tesisleri Çevre yönetim sistemi (isteğe bağlı)	-	0 veya 5 puan
Alınabilir en yüksek toplam puan	60	100
Çevre Etiketini için gereken en düşük puan	30	50

KRİTER 2.1. Doğaltaş Ocağında Enerji Tüketimi

Bu kriter kapsamında ocaklarda üretilen birim blok başına harcanan enerjinin (kWh/m³ veya MJ/m³) rapor edilmesi, birim enerji tüketimi takip edilerek bu spesifik enerji değerinin düşük tutulması teşvik edilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamında yapılan işlemlere 20 Puan verilmektedir. Bu puanın %50'si olan 10 puan tüketilen enerjinin (yakıt + elektrik) ne kadarının yenilenebilir kaynaklardan elde edildiğine oranına bağlı olarak 0-10 puan arasında puan verilmektedir. Böylece harcanan enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması teşvik edilmekte ve karbon kökenli enerji tüketimi ile üretim adeta pirimlendirilmemektedir. Böylece ürün üretiminde sera gazı salınımının azaltılmasına dolaylı olarak destek verilmektedir. Ayrıca, kullanılan yenilenebilir enerji temin kaynağına bağlı olarak da puanlama getirilmiştir.

Ürün üretiminde karbon ayak izi yapılması teşvik edilerek 3 puan ile değerlendirilmektedir. Böylece işletmeler ürün üretim aşamasında karbon salınımlarını minimuma indirmek için kendi kontrol/denetim mekanizmalarını oluşturmuş olmaktadır. Ayrıca Ürün Çevresel Ayak İzi yönteminin sera gazı emisyonları ile ilgili unsurları kullanılmışsa 5 puan verilmektedir. Böylece işletmeler kendi sera gazı salınımlarını kontrol ederek minimuma indirmek için gerekli düzenlemeleri yapmaları istenmektedir.

KRİTER 2.2. Doğaltaş Ocağında Malzeme Verimliliği

Bu kriter kapsamında 25 puan verilmektedir. Ocakta üretilen satılabilir blok ve molozların miktarının toplam kazılan hacme oranını diğer bir ifadeyle ocak verimliliğinin olabildiğince yukarılara çıkarılması istenmektedir. Aynı zamanda artık olarak pasa alanında yığılan malzemelerin pasa kullanım izni ile diğer sektörlerde kullanılabilirliğini teşvik etmeye yönelik puanlama yapıldığı görülmektedir. Blok verimliliği doğaltaş ocaklarının yapıları gereği sınırlı kalabilmektedir. Burada asıl dominant hedefin artıkların başka sektörlerde kullanılmasının teşvik edilmesinin olduğu anlaşılmaktadır. Böylece artıklar agrega, kırma taş, stabilize malzeme, dolgu malzemesi ve diğer çeşitli sektörlerin hammaddesi olabilmesinin araştırılması teşvik edilmektedir. Bu oran %20 olursa 0 puan %100 olursa tavan puan olan 25 puan verilecektir. Türkiye'de şu an faal olarak doğaltaş ocaklarında 25 puanı alabilecek ocak sayısı bir elin parmakları ile sınırlı durumdadır. Dolayısıyla bu puanlama çok da gerçekçi olmayıp daha teşvik edici düzenleme ihtiyacı bulunmaktadır.

KRİTER 2.3. Doğaltaş Ocağında Su ve Atık Su Yönetimi

Bu madde kapsamında doğaltaş ocakları için su ve atık su yönetimi ile ilgili bir puanlama getirilmez iken mermer işleme fabrikalarında bu kapsamda 5 puan verilmektedir. Doğaltaş ocak işletmeciliği açısından bu puanlamanın olmaması bir eksikliktir. Oysa doğaltaş ocakları için yağmur suyu akışının eğimin ve topoğrafyanın el verdiği ölçülerde gerek çevresinde gerekse ocak içinde tekniğine uygun

şekilde inşa edilen drenaj sistemi ile ocak içinde veya dışında toplanması yüzey sularının kullanımı açısından önemlidir. Bu konuda İstanbul Maden İhracatçıları Birliği himayesinde yürütülen proje kapsamında (Altındağ vd., 2018) bu konu ilgili uzmanları tarafından detaylı olarak anlatılmıştır. Ancak ne yazık ki bu öneriler yeteri kadar paydaşlarla paylaşılmadığı ve/veya tartışılmadığı görülmektedir.

Ayrıca bugün doğaltaş ocaklarında gelişi güzel ocak içlerinde sayalama (blokların katrakt ve ST makinelerinde kesime uygun blok boyutlarına getirilmesi işlemi) alanları oluşturulmaktadır. Ocakta sayalama amaçlı kullanılan suların tekrar kullanımının teşvik edilmesi için ocak içerisinde/dışında uygun sayalama alanları belirlenerek eğimli platformlar kurularak kullanılan suyun, su toplama havuzlarında toplanıp tekrar sistemde kullanılması sağlanmalıdır. Tire (2021) yapmış olduğu çalışmada bir traverten ocağında farklı sayalama yöntemlerine bağlı olarak suyun tekrarlı kullanımı doğrultusunda diğer bir ifadeyle gri su kullanımının sağlandığını ve dolaylı olarak da mavi su kullanımının azaldığını ortaya koymuştur. Bu tarz uygulamalar teknik açıdan geliştirilerek suyun tekrarlı kullanımı (gri su kullanımı) sağlanmalı ve bu tür uygulamalar teşvik edilerek puanlamaya katılmalıdır.

Gerek yağmur suyu drenajının gerekse sayalama işlemlerinde kullanılan suyun depolanıp tekrarlı kullanımı konusunda teşviklerin yapılması suayak izi açısından önemli olup mutlaka bir puanlama sisteminin getirilmesi gerekmektedir.

Ocaklardaki kurulu bulunan tesislerde banyo+lavoba+çizme yıkama gibi vb. ünitelerinin atık sularının diğer atık su kanallarından ayrılarak ayrı bir yerde depolanması ve uygun arıtma sistemlerinden geçirildikten sonra uygun mekanlar için kullanılması yönünde teşvik edici önlemlerin alınması ve bu uygulamalarında puanlandırılması değerlendirilmelidir.

KRİTER 2.4. Doğaltaş Ocağında Toz Kontrolü

Bu kriter kapsamında doğaltaş ocakları için herhangi bir puanlama öngörülmemiştir. Oysa ocaklarda yer yer çeşitli işler kapsamında toz oluşumları gerçekleşmekte olup bu tozların oluşumunun etkilerini en aza indirmek için gerek ekipmanlarda gerekse iş proseslerinde birtakım tedbirlerin alınması gerekir. Örneğin elmas tel kesme yönteminde elmas telin geçirilmesi işlemlerinde delik delme makinelerinin kuru delik delimi sırasında delici makinenin toz tutum ünitelerinin bulunması gibi ekipmanlar üzerinde modifikasyonlar yapılmalıdır. Alınacak önlemlere ilişkin bir puanlama sisteminin de olması gerekir.

KRİTER 2.5. Doğaltaş Ocağında Personel Güvenliği ve Çalışma Koşulları

Bu kriter kapsamında doğaltaş ocakları için herhangi bir puanlama öngörülmemiştir. Ancak bahsedilen hususların işletmelerde isteğe bağlı veya zorunlu olarak yapılan parametrelerdir. Dolayısıyla bu parametreler için bir puanlama sistemi öngörülmelidir.

KRİTER 2.6. Doğaltaş Ocağında Peyzaj Etki Oranları (İsteğe Bağlı)

Bu kriterler kapsamında verilen puanlama dikkate alındığında faal ocak üretim alanının minimum düzeyde tutulması, yenilenebilir enerji alanlarının artırılmasını ve rehabilite edilen alanların artırılmasını teşvik etme yönünde düzenleme olduğu ve 5-10 puan arasında puanlama verildiği görülmektedir. Ancak çevresel açıdan çok daha önemli bu parametrelere verilen puanların düşük olduğu görülmektedir. Çevresel hassasiyetler açısından önemli olan bu parametrelerin daha çok uygulanabilir düzeyde ve daha teşvik edici puanlamalarla revize edilmesi gerektiği kanaatindeyiz.

3.4. Eko-Verimlilik Etiketi Öneri Formu

Çevre etiketi yönetmeliği kapsamında doğaltaş ürünlerine çevre etiketi verilmesine dair kriterler genel çerçevesi doğaltaş ocakları özelinde değerlendirilmeye çalışılmıştır. En kötü düzenlemenin bile düzensizlikten daha iyi olduğu gerçeğiyle tartışılan çevre etiketi kriterlerinin daha geniş kapsamda değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu düşüncelerle bu çalışma kapsamında doğaltaş sektörüne yönelik Eko-Verimlilik Etiketi Formu oluşturulması için bir taslak çalışması yapılmıştır (Çizelge 3-5.). Bu çizelgelerde verilen kriterler örnek olarak verilmiş olup sektörü temsil eden sivil toplum oluşumları (dernekler, birlikler, vakıflar vb.) ve kamunun ilgili temsilcilerinden oluşturulacak bir komisyon tarafından tartışılarak belirlenmesinin doğaltaş sektörünün doğa ile barışık madencilik ilkesi çerçevesinde sürdürülebilirlik kavramı altında üretilen ürünlerin sahip olduğu yeşil etiket avantajı ile dünya pazarında avantajları beraberinde getireceği kuşkusuzdur.

Çizelge 3. Eko-Verimlilik etiketi belirleme kriterleri (Altındağ vd, 2018'den modifiye edilmiştir)

Kategori	İşlem Kodu	KRİTER	AÇIKLAMA	PUAN			
				3	2	1	0
A. Doğal Kaynak Yönetimi	A.1	Rezerv Raporu	Ruhsat Sahası İçinde Rezerv Çalışmasının Varlığı				
	A.2	AR-GE Faaliyeti	İşletme Öncesinde ve Sırasında Ocak ve Blok Verimlilik Üzerine Projenin Varlığı				
	A.3	Doğal Kaynak Değerlendirme (Atık) Oranı	Kullanılabilir Ticari Ürün Miktarı (m ³) / Toplam Kazılan Malzeme Miktarı (m ³), %				
	A.4	Arazi Kullanım Oranı (Ocak Etki Oranı)	İşletme ve Aktif Döküm Sahasının Toplam Alanı (ha) / Ruhsat Alanı (ha), (%)				
	A.5	Blok Verimlilik Oranı	Ticari Blok-Moloz Hacmi (m ³) / Toplam Kazılan Hacmi (m ³), (%)				
B. Enerji Tüketim Yönetimi	B.1	Yenilenebilir Enerji Üretimi	Üretilen enerji (kWh) / Tüketilen enerji (kWh) oranı				
	B.2	Elektrik Enerjisi Tüketim Oranı	Özgül/spesifik Enerji (Birim Blok Üretimi İçin Üretimde Kullanılan Toplam Elektrik Enerji Miktarı (kWh) / Ticari Blok Hacmi (m ³)), (kWh/m ³)				
	B.3	İş Makinelerinin Yakıt Tüketim Oranı	Tüm İş Makinelerinin Yıllık Toplam Mazot Tüketimi (l) / Yıllık Blok Üretim Miktarı (m ³), (l/m ³)				

			İşletme Alanı Sınırında ve Sınır Dışındaki 60 m Mesafede Ölçülen Değeri (PM10 askıdaki partiküller $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)
	C.1	Hava Kalitesi	Karbon ayak izi (kg/m^3)
			Çalışan personelin işletmeye ulaşımında salınan CO_2 eşdeğeri ($\text{kg}/\text{kişi}$)
			BOI ve KOI değerleri
C. Çevre Kirliliği Yönetimi			Tüm işletme genelinde kullanılan su ayak izi (litre/m^3)
	C.2	Su Kalitesi	Yağmur suyu (yeşil su) kullanım miktarı (m^3) / İşletmede Kullanılan Toplam Su Miktarı (m^3), (%)
			Atık Su Geri Dönüşüm (gri su) Miktarı (m^3) / İşletmede Kullanılan Toplam Su Miktarı (m^3), (%)
	C.3	Gürültü	Ocak içinde üretim sırasında alınan Ölçüm Değeri (dB (A))
			Pasa döküm alanları/işletme alanı oranı (%)
	C.4	Görsel Kirlilik	ve ön görünüm alanı içinde bulunan yerleşim yerinde ikamet eden (varsa) yerel halk “Görsel Kirlilik Anketi” sonucu
D. Artık Üretimi ve Yönetimi	D.1	Pasa Değerlendirme Oranı	Değerlendirilen Pasa Miktarı (m^3) / Toplam Pasa Miktarı (m^3) Oranı, (%)
E. Ekosistem Sağlığı	E.1	Rehabilitasyon Oranı	Rehabilitasyon yapılan/devam eden Alan (ha) / İşletme ve Pasa Döküm Sahasının Toplam Alanı (ha) oranı, (%)
			Üretim ve pasa alanlarında stabilite raporlarının varlığı ve güncelliği
F. İş Güvenliği ve İşçi Sağlığı	F.1	İş Güvenliği performansı	İş güvenliği denetimlerindeki başarı performansı
			İş güvenliği eğitim seminerleri

			İşletmede iş güvenliğine yönelik iş kaza sıklığı/türü
G. Sosyal Sorumluluk	G.1	İstihdam	Yıllık üretilen blok başına çalışan personelin mesai sayısı (personel-mesai saati/m ³)
	G.2	Toplumsal Bilgilendirme	Yerelde veya genelde yıllık bazda toplumsal bilgilendirme faaliyetlerinin türü-sayısı
			Yöre yerleşim yerindeki çeşitli sosyal/kültürel ve toplumsal alanların yapımına yıllık bazda yapılan katkı
			Bölgede Eğitime yapılan katkı
	G.3	Toplumsal Katı	Toplumsal sorunların çözümüne katkı
			Dezavantajlı bireylere yönelik hizmetlere katkı
			Sosyal imkanların iyileştirilmesine katkı
	G.4	Teşvikler	Bölgeye özgü tarım, hayvancılık, geleneksel el sanatları, turizm vs. sosyal girişimcilik projelerini destekleme
...	...	...	...
Ara Toplam Puan (A.T.P.)			
İşletme Genel Puanı (İ.G.P.)			
0: Sorunlu, 1: Yeterli, 2: İyi, 3: Çok iyi			

Çizelge 4'te verilen bazı değerler örnek olarak verilmiş olup her bir kriterin sınır değerleri ilgili mevzuatta verilen sınır değerleri dikkate alınarak titiz bir çalışmayla belirlenmelidir.

Çizelge 4. Eko-Verimlilik Etiketi Belirleme Kriterleri Puanlama Parametreleri

İşlem Kodu	Puanlar			
	3	2	1	0

A.1				
A.2				
A.3	>50	50-40	40-20	<20
A.4	<15	15-30	31-50	>50
A.5				
B.1				
B.2				
B.3				
C.1a				
C.1b				
C.1c				
C.2a				
C.2b				
C.2c				
C.2d				
C.3				
C.4				
D.1				
E.1				
F.1a				
F.1b				
F.1c				
F.1d				
G.1	>%10	%10-%5	%5-%1	<%1
G.2	>10	10-5	5-1	<1
G.3a				
G.3b				
G.3c				
G.3d				
G.3e				
G.4	>2	2-1	1-0	0

Çizelge 5. İşletmenin Eko-Verimlilik Etiketinin Belirlenmesi

EKO-VERİMLİLİK ETİKETİ KATEGORİSİ	İŞLETME GENEL PUANI		AÇIKLAMA
	(İ.G.P./ (Top. Max puan=93*)x100), (%)		
Yeşil İşletme	100 - 81		Eko-Verimlilik Etiketi ve Çevre Mevzuatına Uygun
Sarı İşletme	80 - 61		Eko-Verimlilik Etiketi ve Çevre Mevzuatına koşullu/Sınırlı Uygun
Gri İşletme	60 - 40		Çevre Mevzuatı açısından Sınırdır
Kırmızı İşletme	< 40		Geliştirilmesi / İyileştirilmesi Gerekli

*Çizelge 3’te verilen 31 parametrenin maksimum puan aldığı kabulüyle 93 puan olarak dikkate alınmıştır. Bu puan değeri parametrelerin sayısına bağlı olarak değişir.

4. GENEL DEĞERLENDİRME

Doğaltaş sektörü, yüksek estetik ve ekonomik değere sahip ürünlerin üretildiği önemli bir alandır. Ancak üretim süreçlerinin çevresel etkileri nedeniyle zaman zaman kamuoyunda olumsuz algılarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu algının temelinde doğal kaynakların israfı, doğa tahribatı ve geri dönüşü olmayan çevresel zararlar yer almaktadır. Günümüzde bu olumsuz algının dönüştürülmesinde, eko-verimlilik temelli yönetim yaklaşımları ve çevresel etiketleme sistemleri kilit rol oynamaktadır.

Eko-verimlilik, üretim süreçlerinde çevresel etkileri azaltırken ekonomik katma değeri artırmayı hedefleyen bütüncül bir yaklaşım sunarak ön plana çıkmaktadır. Doğaltaş madenciliğinde bu yaklaşım; enerji ve su tüketiminin azaltılması, karbon ayak izinin düşürülmesi, atık yönetimi, blok verimliliğinin artırılması ve çevresel rehabilitasyonun etkin uygulanması gibi birçok boyutta uygulanabilir çözümler sunmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen çevresel etiketleme sistemleri ise ürünlerin çevreye duyarlılık düzeyini belgelendirerek hem ulusal hem de uluslararası pazarda rekabet gücünü artırmaktadır.

Avrupa Birliği Eko-Etiketi gibi gönüllülük esasına dayalı sistemler, tüketicilere çevresel etkileri düşük ürünler hakkında güvenilir bilgi sağlamakta ve çevre dostu tüketim alışkanlıklarını teşvik etmektedir. Türkiye’de bu alandaki dönüşüm, 2018 yılında yürürlüğe giren "Çevre Etiketi Yönetmeliği" ve "Doğaltaş Ürünlerine Çevre Etiketi Verilmesine Dair Kriterler" ile başlamış, 2022 yılında Türkiye’nin Küresel Eko-Etiket Ağı’na (GEN) tam üye olmasıyla uluslararası düzeyde tanınırlık kazanmıştır. Ancak mevcut sistemin sektöre özgü teknik ve çevresel gerçeklikleri yeterince yansıtmadığı, bu nedenle daha detaylandırılmış ve sektörel ihtiyaçlara uygun kriter setlerinin geliştirilmesinin gerekli olduğu görülmektedir.

Sürdürülebilir madencilik anlayışının yerleşmesi için eko-verimlilik ve çevresel etiketleme kriterlerinin sadece çevresel değil, ekonomik faydalarla da desteklenmesi büyük önem taşımaktadır. Yeşil etiket uygulamaları; uluslararası pazarlara erişim, kamu ihalelerine katılım, rekabet avantajı, marka değeri artışı ve yeşil finansman olanaklarına erişim gibi doğrudan ekonomik yararlar sağlamaktadır. Ancak işletmelerin tüm çevresel kriterleri eşzamanlı karşılaması kısa vadede güç olabileceğinden, kademeli geçişleri destekleyen “koşullu”, “kısmi” veya “belirli süreli” etiket modelleriyle süreç yönetimi kolaylaştırılabilir.

Türkiye’nin 2021 yılında Paris İklim Anlaşması’na taraf olması, 2025’te yürürlüğe giren İklim Kanunu ve 2053 net sıfır emisyon hedefi, doğaltaş sektörü dâhil tüm sektörlerde yeşil dönüşümün zorunluluğunu pekiştirmektedir. Artan sera gazı emisyonları ve azalan su kaynakları gibi çevresel

göstergeler, bu dönüşümün aciliyetini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, çalışmada önerilen çevresel etiket puanlama sistemleri ve model yaklaşımlar, ara mamulden nihai ürüne kadar sektöre uygulanabilir, ölçülebilir ve geliştirilebilir bir yol haritası sunmaktadır.

Sonuç olarak, eko-verimlilik temelli bu bütüncül değerlendirme; doğaltaş sektöründe çevreye duyarlı, sürdürülebilir ve uluslararası normlarla uyumlu üretim sistemlerine geçişte yol gösterici bir model teşkil etmekte ve Türkiye'nin yeşil dönüşüm politikalarına stratejik düzeyde katkı sunmaktadır. Aynı zamanda, kurumsallaşma ve şeffaf yönetim süreçlerini destekleyerek sektörde uzun vadeli sürdürülebilirliği ve sosyal kabulü güçlendirecek bir dönüşüm çerçevesi önermektedir.

5. KAYNAKLAR

Altındağ, R., Demirdağ, S., Mutlutürk, M., Karagüzel, R., Aslanboğa, İ., Kurucu, Y., Gürbüz, F., Papatya, N., Akıncı, G., Şengün, N., Soyaslan, N., Akbay, D. (2018). Türkiye doğaltaş potansiyeli, ekonomisi ve çevresel etkileşimleri Projesi. İstanbul Maden İhracatçıları Birliği.

Aydın, G. Ş. (2019). Eko-etiketleme ve türkiye çevre etiketi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 4(1), 40–47. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/704401>

Boström, M., Klintman, M. (2011). Eco-standards, product labelling and green consumerism. Palgrave MacMillan.

Çaça, A. (2016). ISO 14000 Çevre Yönetim Sistemi Standartları ile Avrupa Birliği Çevre Etiketi ve Aralarındaki İlişki: Türkiye'deki Uygulamalar. Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi. Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Dalfes, N. N. (2022). İklim değişimi ve karbon salınımları: Ne yapmalıyız, ne yapabiliriz? Türkiye Nereye Koşuyor (s. 293). Doğu Kitabevi.

EU Comission. (1992). Council Regulation (EEC) No 880/92 of 23 March 1992 on a Community eco-label award scheme.

Güngör, B., & Felekoğlu, B. (2018). Eko-verimlilik kavramı, gelişimi ve uygulanma süreci. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(3), 90–104. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/571215>

İstanbul Maden İhracatçı Birlikleri İMİB. AB Mevzuatı ve Politikaları: Eko-etiket. <http://ab.immib.org.tr/AB-Mevzuati-ve-Politikalari/Eko-etiket>

Karagüzel, R. Türkiye su kaynakları. Türkiye Nereye Koşuyor (s. 293). Doğu Kitabevi.

Mutlutürk, M. (2017). Doğaltaş üretimi ve su ilişkisi. Türkiye 9. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi ve Sergisi Bildirileri (ss. 481–488). Antalya.

Onargan, T. (2009). Doğaltaş Madencilğinde Eko-Üretim, Verimlilik ve Çevre Yönetimi. Uluslararası Katılımlı Mermer Artıklarının Değerlendirilmesi ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı (ss. 267–283). Diyarbakır.

Onargan, T. (2012). Doğaltaş Madenciliğinde Ekolojik Üretim, Koşullarının Avrupa Birliği Direktifleri Kapsamında Değerlendirilmesi. 8. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi Kongre Bildiriler Kitabı (ss. 3–12). Afyonkarahisar.

Tire, S. U. (2021). Doğaltaş Ocaklarında Sayalama (Blok Ebatlama) Teknikleri ve Verimlilik Mukayesesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

TÜİK. (2025). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990–2021.
<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021>

Üçüncü, O. (2009). Turizmde Çevre Etiketleri Olarak Mavi Bayrak. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi. Sosyal Bilimler Enstitüsü Coğrafya Anabilim Dalı.

Anonim 1. Bir Ürünün Üretimi Aşamasında Ne Kadar Su Kullanılıyor Biliyor Muyuz.
<https://www.vatekcevre.com/blog/bir-urunun-uretimi-asamasinda-ne-kadar-su-kullaniliyor-biliyor-muyuz>

Anonim 2. (2022). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990–2021.
<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672>

Anonim 3. Doğaltaş Ürün Grubu Çevre Etiketleri Kriterleri.
https://webdosya.csb.gov.tr/db/cevreetiketi/icerikler/dogaltasurun-grubu_ceveret-ket-kr-terler-20230119152639.pdf

4.Bölüm

DOĞALTAŞ OCAKLARINDA PASA TAŞIMA İŞLEMİ YAPAN KAMYONLARDA ŞOFÖRLERİN MARUZ KALDIKLARI TİTREŞİMİN İNCELENMESİ

EVALUATION OF VIBRATION EXPOSURE IN ROCK TRUCK OPERATORS ENGAGED IN WASTE ROCK TRANSPORTATION AT NATURAL STONE QUARRIES

A. E. Arıtan ^{1*}, E. Ahi ¹, S. Çelebi ¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

(*Sorumlu yazar: aritan@aku.edu.tr)

ÖZ

Ülke madenciliğinde doğaltaş madenciliğinin yeri oldukça önemlidir. İnsan nüfusunun ve doğal olarak ihtiyacının da artması ile doğaltaşa olan talep gün gittikçe artmaktadır. Teknolojinin gelişmesi, madencilikte kullanılan araç, makine ve ekipmanların hem artmasına hem de gelişmesine sebep olmuştur. Bu durum çalışanların sağlıkları ve güvenlikleri açısından incelenmesi gereken bir risk olarak karşımıza çıkmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği biliminde bu konular genel manasıyla fiziksel risk etkenleri başlığı altında incelenmektedir. Bu başlık altında; titreşim, gürültü, termal konfor, basınç, radyasyon gibi konular çalışılmaktadır. Özellikle madencilik alanında titreşim konulu çalışmalar oldukça azdır. Titreşim gerek maruziyet süresi gerekse sonucunda oluşan meslek hastalıkları bakımından üzerinde çalışılması ve araştırılması gereken önemli konulardan biridir. Çalışma, Afyonkarahisar İli İscehisar İlçesi sınırları içerisinde faaliyet gösteren doğaltaş firmasından yapılmıştır. Firma doğaltaş üretimini açık işletme yöntemi ile yapmaktadır. Ocakta, pasa kaldırma ve üretim faaliyetleri yapılmaktadır. Kaya kamyonu genel olarak pasa taşıma işleminde aktif olarak kullanılmaktadır. Ocak yollarının gerek çukur ve tümseklerin çok fazla olması gerekse yolların rampalı ve virajlı olması kamyon şoförlerinin titreşim maruziyetinin değişmesine sebep olmaktadır. Bu sebepten ötürü etkileşimin değişimini görebilmek için kaya kamyonunu kullanan şoför üzerinde tüm vücut titreşim (TVT) ölçümleri alınmıştır. Ölçümler; doğaltaş ocağının zemin yapısı (tümsek, çukur, viraj ve rampa gibi düzensizlikler) dikkate alınarak yapılmıştır. Ayrıca, kaya kamyonu boş ve dolu iken ayrı ayrı titreşim maruziyeti ölçümleri alınmıştır. Zemin yapısındaki değişkenliklerin ve aracın yük durumunun kamyon şoförleri üzerindeki titreşim maruziyet etkisinin farkı böylece ortaya konmaya çalışılmıştır. TVT, kamyonun kasası boş ve düz yolda ilerlerken 0,916 m/s² iken yine kasası boş fakat tümsek yolda 1,419 m/s² olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Doğaltaş, Tüm vücut titreşimi, Kaya kamyonu

ABSTRACT

The role of natural stone production in the country's mining is of major importance. With the increase in the human population and naturally their consumption, the demand for natural stone is increasing day by day. The development of technology has led to both the increase and development of tools, machinery, and equipment used in mining. This situation is a risk that needs to be examined in terms of the health and safety of the employees. In occupational health and safety science, these issues are generally examined by physical risk factors. Under this concept, issues such as vibration, noise, thermal comfort, pressure, and radiation are studied. Especially in the field of mining, there are very few

studies on vibration. Vibration is one of the important issues that need to be studied and researched in terms of both exposure time and occupational diseases that occur as a result. The study was carried out at a natural stone company operating within the borders of the İscehisar District of Afyonkarahisar Province. The company produces natural stone with the quarrying method. In the quarry, waste removal and production activities are carried out. Off-highway trucks are generally used in the process of transporting waste. The fact that the quarry roads have a lot of potholes and bumps, and that the roads have ramps and curves, causes the vibration exposure of truck drivers to change. For this reason, whole body vibration (WBV) measurements were taken on the driver of the truck in order to see the change in the interaction. Measurements were made by taking into account the ground structure of the natural stone quarry (irregularities such as bumps, pits, bends, and ramps). In addition, vibration exposure measurements were taken separately when the truck was empty and full. Thus, the difference between the variability in the ground structure and the vibration exposure effect of the load condition of the vehicle on truck drivers has been tried to be revealed. TVT, when the truck's bed is empty and moving on a flat road, has an acceleration of 0.916 m/s^2 , while it is also empty but on a bump road, it is observed to be 1.419 m/s^2 .

Keywords: Natural stone, Whole body vibration, Rock truck

1. GİRİŞ

Madencilik teknolojisinin gelişmesi ve insanoğlunun bugünkü refah düzeylerine ulaşmalarında önemli etkiye sahip olan ekonomik kaynaklarıdır. Hayatımızın birçok yerinde kullandığımız işimizi kolaylaştıran araç ve gereçlerin büyük bir çoğunluğunun üretiminde doğrudan veya dolaylı olarak maden ürünlerine ihtiyaç bulunmaktadır (Aydın ve Karakurt, 2021). Madencilikte daima amacımız, önceliğimiz insan olacak şekilde iş sağlığı ve güvenliği kurallarına uygun olmak şartıyla en az maliyetle üretim yapmak ve üretim tamamlanınca doğayı ilk haline en yakın şekilde bırakmaktır. Madenler, açık ocak ve yeraltı ocak işletmeciliği ile üretilmektedir. İş sağlığı ve güvenliği açısından her iki yöntem de benzer özelliklere sahip olmasına rağmen her iki işletmede de karşılaşılan riskler farklı olabilir. Madencilik işlemleri başlıca: planlama, hazırlık, üretim, zenginleştirme, pazarlama ve satış işlemlerinden oluşur (Aydın ve Karakurt, 2021). Üretim sürecinde kullanılan makine ve aletler ile çalışanlar arasındaki uyumsuzluklar çalışma ortamında birtakım problemlerin meydana gelmesine neden olabilmektedir. Çalışanların fiziksel özellikleri, iş konusundaki eğitim yetersizlikleri ve psikolojik durumlarına bağlı olarak değişen tutum ve davranışları insan-makine arasındaki uyumu bozmaya neden olabilecek faktörlerdendir. Bu durum iş verimi ve kalitesini düşürmekte, iş sağlığı ve güvenliği sorunlarına neden olmaktadır (Öztürk, 2016). Madencilik üretim açısından oldukça çeşitlidir, bunların başlıca olanları: metalik cevherler, kömür, bor ve doğaltaş gibi doğal kaynaklardır.

Doğaltaş madenciliğinin dünya üzerinde oldukça önemli bir yeri vardır. Ülkemiz çok çeşitli ve büyük mermer rezervine sahiptir. Dünya doğaltaş rezervlerinin yaklaşık %40'ına sahip olan Türkiye dünya doğaltaş sektöründe üretimde %3,1'lik bir payla dokuzuncu, ihracatta ise %2,3'lük bir payla sekizinci sırada yer almaktadır (Arıtan ve Tümer, 2018). Afyonkarahisar, Türkiye'nin önemli doğaltaş rezervlerine sahip bölgelerinden biridir. Doğaltaşa olan talepler doğrultusu üzerine üretim gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışla birlikte zorlu hava şartları haricinde kış aylarında da devam edilmektedir. Bu durumla birlikte sektör çalışanlarında fiziksel risk etmenleri de artmaktadır. Fiziksel risk etmenleri genel olarak değerlendirildiğinde, en önemli risk etmeni titreşim olarak görülmektedir. Yüksek düzeyde ve uzun süre titreşime maruz kalmanın insan vücudu üzerinde ciddi etkilere sahip olabileceğini ve çeşitli hayati organların zarar görmesine neden olduğu tespit edilmiştir (Arıtan ve Can, 2024).

Doğaltaş açık maden ocaklarında çalışan kamyon şoförlerinin üretim esnasında oluşan pasaların döküm sahasına taşırken yol güzergahının tümsek, çukur, viraj ve rampa gibi düzensizlikler olduğu görülmektedir. Kamyon şoförleri yol güzergahında titreşime maruz kalırlar. Kamyon şoförlerinin, yol güzergahındaki düzensizliklerde (tümsek, çukur, viraj ve rampa), kamyonun boş ve dolu halinde ölçüm alınarak ne kadar titreşime maruz kaldıkları belirlenmiştir.

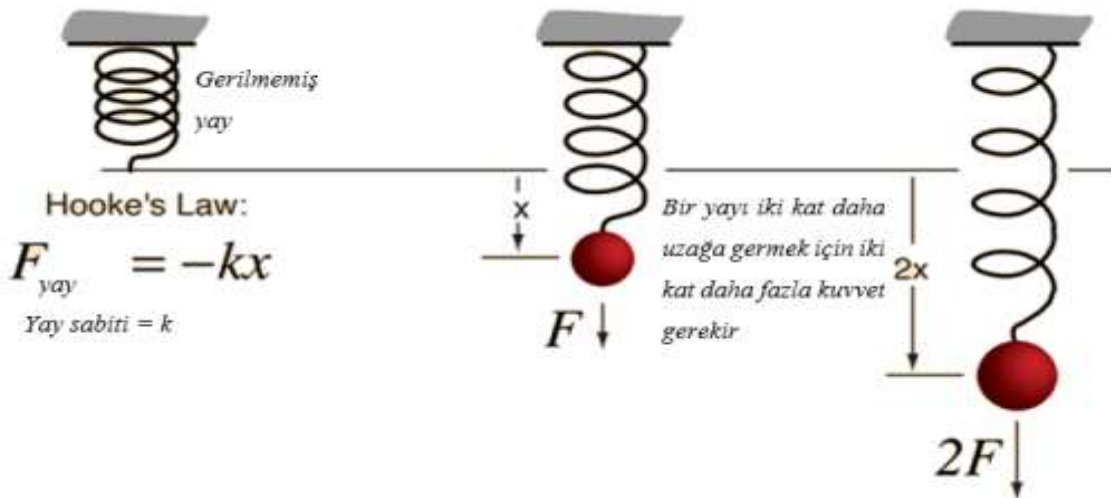
Bu çalışmada doğaltaş ocağında çalışan kamyon şoförlerinin tüm vücut titreşim maruziyeti incelenmiştir. Kamyon şoförlerinin düz yolda taşıma yaparken daha az titreşime maruz kaldığı ölçümlerle tespit edilmiştir. Ancak titreşimden kaynaklanan riskler tespit edilebilir ve bu riskler için planlamalar yapılarak gerekli önlemler alınabilir. Böylece bu riskler sonucu oluşabilecek hastalıklar en aza indirilebilir (Arıtan ve Tümer, 2018). Bu ölçümlere göre çalışılan ocakların olabildiğince yollarını düz yapmak çalışan operatörlerin sağlığı için önem taşımaktadır. Elde edilen sonuçlara göre değerlendirme yapılmış ve alınacak önlemler belirtilmiştir. Şekil 1’de kaya kamyonu gösterilmiştir.



Şekil 1. Kaya Kamyonu

2. TİTREŞİM

Titreşim, bir referans noktası etrafındaki salınımlı, frekansı, büyüklüğü ve süresi ile karakterize edilen, harekettir (Arıtan ve Tümer, 2018). Şekil 2 ‘de Hooke Yasası gösterilmiştir (Çalış, 2022).



Şekil 2. Hooke Yasası (Çalış, 2022)

Kütle serbest bırakıldığında, kütle çekim kuvveti ile yayın gerilme kuvvet eşitlendiğinde asılı kütle durgun konuma gelir. Kütle, denge konumundan aşağı veya yukarı yönde biraz yer değiştirdiğinde artık denge konumunda değildir. Kütlenin denge konumu etrafındaki aşağı ve yukarı hareketi dış bir kuvvet etki edene kadar devam edecektir. Bu hareket çeşidine basit harmonik hareket denir (Öztürk, 2016).

2.1. Titreşimin İnsan Vücuduna Etkisi

İnsan vücudu oldukça karmaşık doğası olan fizyolojik ve biyolojik bir sistemdir. Mekanik bir sistem olarak bakıldığında, yapısında lineer elementler ve lineer olmayan elementleri de bulundurur; mekanik özellikler kişiden kişiye oldukça büyük değişiklikler gösterebilir. İnsanların titreşim ve şoklara tepkisi söz konusu iken, bunların hem fizyolojik hem de mekanik etkilerini de göz önüne almak gerekir (Öztürk, 2016).

İnsanlarda titreşim, mekanik titreşimin insan vücudu üzerindeki etkisine göre tanımlanır. Titreşimin etkisi tüm vücut üzerinde olabileceği gibi, sadece vücudun bir kısmı üzerinde de olabilir. El-kol titreşimi tutamak kısmı olan martopikör, martoperfaratör, darbeli matkap, el sondajı, taşlama makinesi gibi enerji ile çalışan aletlerden kaynaklanır. Bütün vücut titreşimi ise araçlardan, titreşen zeminlerden veya operatörün üzerinde oturarak çalıştığı büyük makinelerden kaynaklanır (Öztürk, 2016). Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik'te belirtildiği üzere, sekiz saatlik çalışma süresi için günlük maruziyet sınır değeri: $1,15 \text{ m/s}^2$, sekiz saatlik çalışma süresi için günlük maruziyet eylem değeri ise $0,5 \text{ m/s}^2$ 'dir. Avrupa birliği ve diğer normlara göre ise TVT için maruz kalma sınır değerleri Çizelge 1'deki gibidir.

Çizelge 1. TVT İçin Maruz Kalma Sınır Değerleri (Niekerk, 2008; Eger and Godwin, 2014; Doğan vd., 2020).

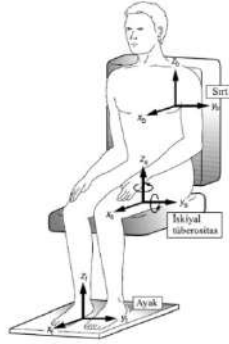
Maruziyet Düzeyi	ISO 2631-1 (1997) A(8) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) a	ISO 2631-1 (1997) A(8) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) b	Avrupa Birliği Direktifi 2002/44/EC A(8) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) a	Avrupa Birliği Direktifi 2002/44/EC A(8) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) a-b	BS 6841 (1987) VDV ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1.75}$) a	BS 6841 (1987) VDV ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1.75}$) a-b	ISO 2631-5: 2004 Sed (MPa)	ISO 2631-5: 2004 R
Düşük	0,43	< 0,45	8,5	< 8,5	8,5	< 9,1	Alt sınır < 0,50	< 0,80
Orta	0,45– 0,90		8,5–17,0	0,5–1,15	9,1–21,0		Ara bölge 0,5–0,80	0,80– 1,20
Yüksek	0,86	> 0,90	17,0	> 17,0	> 1,15	> 21,0	Üst sınır > 0,80	> 1,20

2002/44/EC sayılı “AB Direktifi ve Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik”, elle iletilen titreşim ve tüm vücut titreşimi için “günlük maruz kalma eylemi değerlerini” ve “günlük maruz kalma sınır değerlerini” belirtmektedir. Direktif ve yönetmeliğe göre idari, teknik ve tıbbi önlemlerin işverenler tarafından uygulanması gerekmektedir. Çalışanların titreşime maruz

kalmasından kaynaklanan risklere ve sonucunda oluşabilecek hastalıklara karşı korumayı amaçlamaktadır (Doğan vd., 2020).

2.2. Tüm Vücut Titreşimi (TVT)

Tüm vücut titreşimi, bir yüzey aracılığıyla (bu yüzey genellikle bir koltuk ya da zemindir) tüm vücudu sallayan ya da sarsan titreşimdir. Bir kişi ayakta durduğu zaman, titreşim enerjisi kesinlikle kişinin ayaklarından giriş yapacaktır. Oturduğu zaman, titreşim enerjisi ayaklar veya kalça aracılığıyla girecektir. Bazı durumlarda sırtın ya da kafanın dayandığı yerden de titreşim enerjisi giriş yapabilir. (South, 2004; HSE, 2005; Çalış, 2022). Şekil 3'te tüm vücut titreşimini ölçmek için kullanılan eksenler gösterilmiştir.



Şekil 3. Tüm vücut titreşimini ölçmek için kullanılan titreşim eksenleri. (Gardiner ve Harrington, 2005; Çalış, 2022)

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Materyal

Çalışma, Afyonkarahisar il sınırları içerisinde bulunan İscehisar ilçesindeki bir doğaltaş maden ocağında yapılmıştır. Ocakta çalışan kamyon şoföründen tüm vücut titreşim ölçümleri ISO 2631-1 standardına göre, Şekil 4' teki Cesva VC431- titreşim ölçüm cihazı tüm vücut uygulamaları için AC033 üç eksenli ivmeölçer ile yapılmıştır.



Şekil 4. Titreşim ölçüm cihazı

Titreşim maruziyet ölçümlerine ocakta bulunan kamyonların pasa yükleme işleminden başlanmıştır. Standart dikkate alınarak kamyon operatörünün maruz kaldığı tüm vücut titreşimini ölçmek için kullanılan prob, koltukta otururken kalçasının altına, -x,-y,-z eksenleri dikkate alınarak yerleştirilmiştir.

Yükleme ve pasanın, nakliyatı esnasındaki sürenin fazla olması sebebi ile ISO 2631-1 (1997) standardında belirtildiği üzere ölçümler 8 saat içerisinde 7-8 dakika olmak üzere iki veya üç defa alınmıştır. Ölçümler m/s^2 biriminden genliği belirlenerek frekans ağırlıklı ivmenin en yüksek RMS (Root Mean Square) değerinde ölçümler alınmıştır (Arıtan ve Memiş, 2022).

Ölçümler cihazdan kalibre edilerek bilgisayara kaydedilmiştir ve günlük maruziyet değerleri hesaplamaları yapılmıştır.

3.2. Yöntemler

Titreşim ölçümleri, yeni aletlerin geliştirilmesinin önünü açmak, iş yerine alınacak araç veya ekipmanların titreşim seviyelerini kontrol etmek ve uygun araçlar seçmek, bakım programlarını belirlemek ve iş yerinde çalışanların titreşim maruziyetlerini değerlendirmek ve sonucunda oluşabilecek riskleri tespit edip gerekli önlemleri almak amacıyla yapılabilir. Titreşim ölçümleri, ayakta durulduğu durumlarda, üzerinde durulan zeminde, oturulan durumlarda ise oturulan zeminde (koltuk vb.) yapılmalıdır. Tam ve doğru sonuçlar elde etmek için dikkatli bir şekilde ivmeölçer seçimi yapılmalı (örneğin, tipi, hassasiyeti, kütlesi) ve ivmeölçeri titreşen yüzeye, uygun aparat ile monte edilmelidir. Titreşim vektörel bir nicelik olduğundan, ölçümler üç ortogonal eksenle yapılmalıdır (Özkan, 2024).

Dünyada pek çok ülkede tüm vücut titreşimini inceleyen ve konfor ile sağlık açısından titreşimin önemini ortaya koymayı amaçlayan ISO 2631-1 ile ISO2631-5 standartlar kullanılmaktadır. Titreşimin ölçülmesi, kayıt altına alınması ve raporlanması; titreşim yönetmeliği ve uygulanmakta olan titreşim standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Titreşim ölçümünde kullanılan algılayıcılar yer değiştirme, hız ve ivme algılayıcıları olmakla birlikte rahatsız edici en büyük niceliğin ivme olması nedeniyle genellikle bu büyüklük ölçülmektedir (Sara 1976; Anonim, 1998; Çay, 2006; Doğan vd., 2020). TS EN 1032+A1 (2011)'e uygun olarak, ocakta bulunan kaya kamyonlarında titreşim maruziyet ölçümleri yapılmaya başlanmadan önce, normal çalışma şartlarına ulaşmak amacıyla, kamyonun ısınması için yeterli zaman (en azından 10 dakika), kamyonun belirli bir aralıkta hareket ettiği ve koltuk süspansiyon mekanizmasının (yerleştirilmişse) çalışması sağlanmıştır (Arıtan ve Tümer, 2018).

Ölçümlere başlanmadan ocakta ölçüm alınacak kamyonun çalışma süreleri ve bakım periyodları kontrol amaçlı ön inceleme yapılmıştır. Titreşime sebep olan tüm çalışma koşulları incelenerek titreşime maruz kalma değerini yüksek oranda etkilemesi muhtemel olan işler belirlenmiştir. ISO 2631-1 (1997) standardında belirtildiği üzere ölçüm alınacak süre 7 dakikadan az olmayacak şekilde -x, -y ve -z eksenleri ile ölçüm alınmıştır. Titreşim genliğini belirlemek için m/s^2 biriminden frekans ağırlıklı ivmenin RMS (Root Mean Square) değerinden ölçümler alınmıştır. Günlük titreşime maruziyet ölçümleri için 8 saatlik frekans ağırlıklı toplam titreşim değeri $A(8)$ ile ifade edilir (Arıtan ve Tümer, 2018).

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

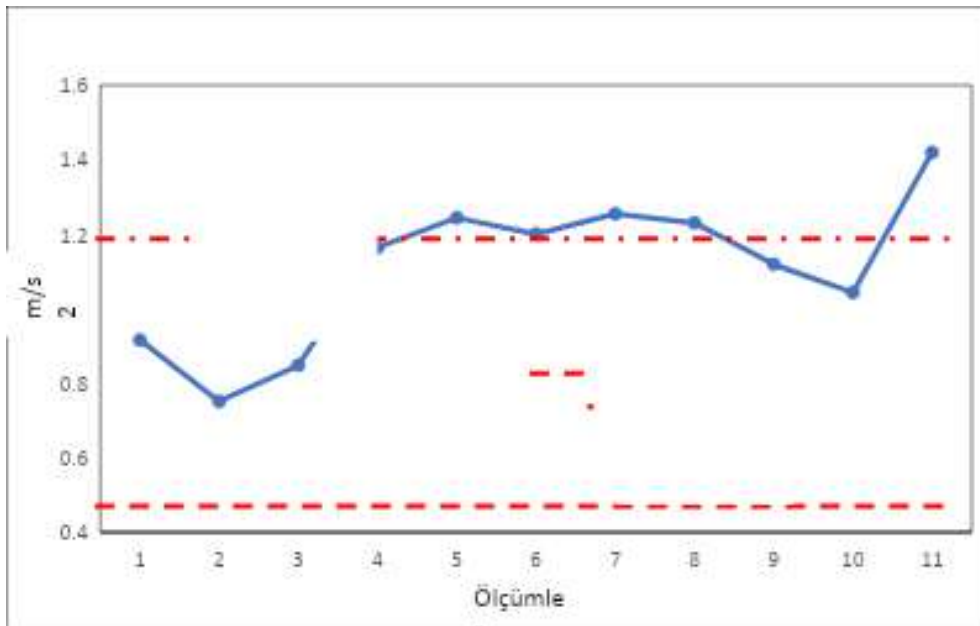
Doğaltaş maden ocağından, kamyon şoförlerinin maruz kaldığı titreşim değeri sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Kamyonun dolu ve boş hali titreşim maruziyetini etkilemektedir. Aynı zamanda kamyonun boş ve dolu halinin düz yolda ve tümsekten geçerken ki amortisörlerin hareketi sonucu oluşan hareketin titreşim değerleri de farklılık göstermektedir. Ocaktan aldığımız ölçüm sonuçlarına bakarak yönetmelikte verilen günlük maruziyet sınır değerini ($1,15 m/s^2$) göz önüne alarak değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 2. Kaya kamyonu operatörünün tüm vücut titreşim değerleri

Ölçüm No	Yol Durumu	Kasa Durumu	Tüm Vücut Titreşimi (m/s ²)
1	Düz Yol	Boş	0,916
2	Düz Yol	Dolu	0,751
3	Düz Yol	Aşırı Dolu	0,848
4	Düz Yol	Dolu + Döküm	1,164
5	Tümsek	Boş	1,244
6	Düz Yol	Dolu	1,200
7	Düz Yol	Dolu + Döküm	1,255
8	Düz Yol	Boş	1,230
9	Tümsek	Dolu	1,119
10	Düz Yol	Dolu + Döküm	1,043
11	Tümsek	Boş	1,419

Şekil 5'te düz yolda pasa taşıyan kamyon operatörünün taşıdığı yükün dolu, boş ve aşırı dolu olduğu durumlarda farklı tüm vücut titreşime maruz kaldığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde pasanın döküm işlemi sırasında da tüm vücut titreşimine maruz kalmıştır.

Aynı şekilde tümsekli yolda da TVT değerinin üstünde bir sonuç elde edilmiştir. Kasa boş iken tümsekten geçen kamyon operatörü kasanın dolu haline göre daha fazla tüm vücut titreşimine maruz kalmıştır.



Şekil 5. Kamyon operatörünün tüm vücut titreşim değerleri

Operatörün TVT ivmesi maruziyeti kullandığı aracın kütlesi ile ters orantılıdır. Kamyon yükü azaldıkça TVT ivme değeri artmakta, ağırlaştıkça azalmaktadır. Bu nedenle özellikle taşımada kullanılan lastik tekerlekli araçların boş seyahatlerinde, üretici tarafından önerilen hız sınırlarını aşmamaları gerekmektedir (Doğan vd., 2015).

Alınan ölçümlere bakılarak güzergâh da ki yolun düz olması ve kasanın doluluk oranının fazla olmaması, maruziyet sınır değerinin geçmemesi için önemlidir. Kamyonun bakımlarının aksatılmaması, zamanında yapılması da tüm vücut titreşim değerini etkilemektedir.

Zemin koşulları ve taşıma yolu düzgünlüğü TVT maruziyetini etkilemektedir. Düzgün, bakımlı ve çukur/tümsek bulunmayan yollar daha düşük TVT maruziyeti vermektedir (Doğan vd., 2015).

Sonuç olarak yolların düz (çukur, tümsek olmaması) olmasına önem verilmeli ve kamyonun bakımlarının aksatılmaması operatörlerin iş sağlığı ve güvenliği için önemli olduğunu söyleyebiliriz.

5. KAYNAKLAR

- Anonim. Introduction to Shock & Vibration. Brüel & Kjaer Sound and Vibration Measurement A/S.
- Arıtan, A. E., Tümer, M. (2018). Doğaltaş Ocaklarında Ekskavatör Operatörlerinin Tüm Vücut Titreşim Maruziyetinin İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Bilim Dergisi, 7(2), 321–330.
- Arıtan, A. E., Memiş, Z. (2022). Doğaltaş Madenciliğinde Ekskavatörlerde Farklı Uç Kullanımının Titreşim Maruziyetine Etkisinin Araştırılması. Uluslararası Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu.
- Arıtan, A. E., Can, M. F. (2024). Doğaltaş Madenciliğinde Ocak-Fabrika Ortamında Titreşim ve Gürültü Maruziyetinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(2), 467–474.
- Aydın, G., Karakurt, İ. (2021). Yeraltı Maden İşletmeciliğinde Sağlık ve Güvenlik Sorunları. Teknik Bilimleri Dergisi, 11(1), 1–12.
- Çalış, Ç. (2022). İş Sağlığı ve Güvenliğinde Titreşim Maruziyet Ölçümü. Ankara İktisat Yayınevi.
- Çay, İ. C. (2006). Tarım Traktörleri Sürücü Koltukları Titreşim Sönümleme Elemanları Üzerine Bir Araştırma Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makineleri Anabilim dalı.
- Doğan, T., Erdem, B., Duran, Z. (2015). Tüm Vücut Titreşiminin Operatör ve Sürücüler Üzerindeki Etkileri: Ölçümü ve Değerlendirilmesi. Madencilik Dergisi, 54(3–4), 25–39.
- Doğan, T., Erdem, B., Duran, Z. (2020). Oturma Pozisyonunda Çalışanların Tüm Vücut Titreşim Maruziyetinin Belirlenmesinde Kullanılan ISO2631-1, ISO2631-5, BS6841 ve Avrupa Birliği Direktifi (EU) 2002/44/EC'nin Karşılaştırılması. Ergonomi Dergisi, 3(2), 108–117.
- Eger, T., Godwin, A. (2014). Whole-body Vibration Exposure: What You Need to Know to Prevent Vibration-Induced Injuries WSN. Health of a Miner Symposium. Anonim (1998).
- Gardiner, K., Harrington, J. M. (2004). Occupational Hygiene (3rd ed.). Blackwell.

HSE. (2005). Whole-body vibration: The Control of Vibration at Work Regulations 2005 Guidance on Regulations (ss. 28–41).

Özkan, M. O. (2024). Çalışanların Bütün Vücut Titreşimine Maruziyet Risklerinden Korunmalarına İlişkin Uygulama Rehberi. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.

Öztürk, N. (2016). Açık İşletmelerde Ağır İş Makinesi Operatörlerinin Gürültü, Titreşim ve Toz Maruziyetlerinin Değerlendirilmesi. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.

South, T. (2004). Managing Noise and Vibration at Work (pp. 104–161). Elsevier.

Van Niekerk, W. (2008). Human Vibration in the Workplace Measurement, Analysis and Assessment. Sound & Vibration Research Group, South African Society of Occupational Medicine.

DOĞALTAŞ FABRİKA ÇALIŞANLARININ FARKLI MEVSİM ŞARTLARINDA TERMAL KONFOR ŞARTLARININ ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THERMAL COMFORT CONDITIONS OF NATURAL STONE FACTORY WORKERS UNDER DIFFERENT SEASONAL CONDITIONS

A.E. Arıtan ^{1*}, Z. Memiş ¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

*Sorumlu yazar: aritan@aku.edu.tr

ÖZ

Gün geçtikçe artan ihtiyacı karşılamak için üretim rakamları da artmaktadır. Bu durum çalışan istihdamını da artırmaktadır. Artan istihdamla birlikte iş sağlığı ve güvenliği sorunlarının da fazlaştığı görülmektedir. Makineleşmenin arttığı dünyamızda insan hayatını tehdit eden birçok etken de çalışma ortamlarında yerini almıştır. İş sağlığı ve güvenliğinin belki de en az araştırılan konularına baktığımızda titreşim ve termal konfor konuları karşımıza çıkmaktadır. Çalışan konforunu direkt etkileyen bu konularda çalışmaların artırılması gerekmektedir. Doğaltaş sektöründe hem ocaklarda hem de fabrika ortamında görülen ısı konfor problemleri üzerinde çalışmalar bulunmakta fakat yetersiz durumdadır. Bu çalışma, açığı kapatmada bir nebze de olsa faydalı olmak için yapılmıştır. Özellikle sulu ortamlarda, sıcak ve soğuk havalarda nasıl bir durumla karşı karşıya kalınacağını tespit etmek amacı ile çalışma, Afyonkarahisar İli İscehisar İlçesi sınırları içerisinde bulunan doğaltaş işleme tesisinde yapılmıştır. Çalışanların giydikleri giysiler, metabolizma hızları, ortamın hava hızı, sıcaklığı, nemi gibi faktörler dikkate alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde termal konfor ölçüm cihazı, ölçüm endeksi olarak da PMV (Predicted Mean Vote)-PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) kullanılmıştır. Çalışma ortamında bulunan kişilerin yüzde kaçının bulunduğu ortamdan rahatsız olduğunu gösteren bir indekstir. Çalışmanın sonucunda; doğaltaş fabrika ortamında, termal konfor problemleri ortaya konmuş, konforsuzluğun nasıl giderileceği ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İş sağlığı ve güvenliği, doğaltaş madenciliği, termal konfor.

ABSTRACT

Production rates have risen to meet the growing demand, which in turn has increased employment in the sector. However, alongside this growth in employment, occupational health and safety issues have also become more prevalent. In today's increasingly mechanized world, numerous hazards threatening human life have emerged in workplaces. Among the least researched topics in occupational health and safety are vibration and thermal comfort. More studies are needed on these issues, as they directly impact worker comfort. While some research exists on thermal comfort problems in natural stone quarries and processing plants, it remains insufficient. This study was conducted to help bridge this gap. Specifically, it aimed to assess the conditions workers face, particularly in wet environments and during extreme temperatures. The research was carried out in natural stone processing facilities located in İscehisar District, Afyonkarahisar Province. Factors such as workers' clothing, metabolic rates, air velocity, temperature, and humidity were taken into account. For measurements, a thermal comfort measuring device was used, with PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) as the evaluation indices. This index shows the percentage of employees who are dissatisfied with their workplace environment. The study's findings revealed thermal comfort issues in natural stone processing plants and provided recommendations on mitigating discomfort in the workplace.

Keywords: Occupational health and safety, natural stone mining, thermal comfort.

1. GİRİŞ

Doğaltaş sektörü ülkemiz madenciliğinin önde gelen sektörlerinden biridir. Gerek ihracat gerekse istihdam rakamlarına bakıldığında bu gerçek çok daha iyi anlaşılır olmaktadır. Alp kuşağında bulunan Türkiye, dünyanın en zengin mermer yataklarının bulunduğu bölgede bulunmaktadır. Ülkenin muhtemel mermer rezervleri yaklaşık 13,9 milyar ton (5,1 milyar m³) olup bu miktar 15 milyar m³ olduğu tahmin edilen dünya toplam rezervlerinin %33'üne karşılık gelmektedir (TCTB, 2021; Arıtan ve Şensöğüt, 2023).

Türkiye, beğenilere hitap edebilecek renk ve desenlerde doğaltaş rezervlerine sahiptir. Bu rezervler; kristalin_kireçtaşı (mermer), kireçtaşı, traverten oluşumlu kireçtaşı (oniks), konglomera, breş ve magmatik kökenli kayalar (granit, siyenit, diyabaz, diyorit, serpantin vb.) şeklinde sınıflandırılabilir. Türkiye'nin doğaltaş rezervleri, Anadolu ve Trakya genelinde geniş bir coğrafyaya yayılmıştır. Toplam doğaltaş rezervlerinin bölgesel dağılımı incelendiğinde; %32 Ege, %26 Marmara, %11 İç Anadolu ve %31 Doğu Anadolu, Güneydoğu Anadolu, Karadeniz ve Akdeniz bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir (TCTB, 2021; Arıtan ve Şensöğüt, 2023).

Küresel nüfus artışına bağlı olarak, inşaat sektöründeki doğaltaş talebini karşılamak üzere üretim faaliyetleri her geçen gün yoğunlaşmaktadır. Ancak bu üretim artışı, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından çeşitli riskleri de beraberinde getirmektedir. Söz konusu riskler, özellikle iş kazaları ve meslek hastalıkları şeklinde kendini göstermektedir. Bu artan rahatsızlıkların içinde özellikle madencilikte en az araştırılan konu termal konfordur (Arıtan ve Şensöğüt, 2023).

Termal konforun tanımına baktığımızda; çalışanların fiziksel ve zihinsel aktivitelerini sürdürürken kendilerini rahat hissettikleri sıcaklık, nem, hava akımı ve ısınım sıcaklığı değerlerinden oluşan bir olgu karşımıza çıkmaktadır (ASHRAE, 2010; ILO, 2014; Luoa vd. 2018). Termal konforun istenilen düzeyde yani çalışanların rahat olduğu bir ortamda zihinsel ve fiziksel performans da artmaktadır (Olesen, 1985).

Doğaltaş fabrikalarında çalışanların meslek hastalıklarına yakalanmasını ortam kalitesi etkilemektedir. Ortam kalitesini belirleyen en önemli faktörler; termal konfor, aydınlatma, ortaya çıkan gürültü ve titreşimdir (Arıtan ve Memiş, 2021).

Doğaltaş işleme tesisinde makinelerin kesme/işleme işlemleri sırasında kullanımlarından dolayı ortamda suyun fazla olması, termal konforu etkileyen faktörler arasındadır. Blok ve moloz kesme işlemlerinin yapıldığı; S/T, ktrak makinelerinin olduğu bölümlerde bu durum daha problemli bir durum oluşturmaktadır. Ortamda bulunan su, tahmin edileceği üzere nem sorunu oluşturmaktadır. Üzerine bir de havalandırmanın yetersiz yapılması yani hava hızının ayarlanamaması da büyük sorun oluşturmaktadır. Çalışma ortamında düşük sıcaklıkların oluşması ve nem oranının artışı ile çalışanlarda üşüme hissini daha da artırmaktadır. Çalışanların iş kıyafetleri termal konfor hislerini etkileyen ana faktörlerdendir. Termal konfor sadece çalışanın çevre ile etkileşimi değil aynı zamanda vücut ısı dengesi ile de ilgili olduğu için kıyafet özel bir önem taşımaktadır. Burada konuşulması gereken diğer bir faktör de çalışanın metabolizma oranıdır. Termal konforun temel bileşenlerine baktığımızda çevresel faktörler, dış faktörler ve kişisel faktörler karşımıza çıkmaktadır. Çevresel faktörler; hava sıcaklığı (T), hava hızı (V), ortalama ısıma sıcaklığı (Tg) ve bağıl nemdir (RH) (Arıtan vd., 2017).

Bu çalışmada, doğaltaş işletmelerinde çalışanların termal konforunun belirlenmesi için gerekli ölçümler alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre durum değerlendirmesi yapılarak alınması gereken önlemler belirtilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Termal konfor için ölçüm alınan tesis, Afyonkarahisar İl sınırları içerisinde bulunmaktadır. Fabrika, doğaltaş levha ve plaka üretimi üzerine çalışmaktadır. Fabrikada katrak, ST, eskitme bölümü, cila hatları bulunmaktadır. Bu bölümlerde; sıcaklık, nem, hava hızı ve ısıma sıcaklığı ölçümleri alınmıştır.

Termal konfor araştırması dört aşamada yapılmıştır. İlk aşamada, ölçülecek bölümler tespit edilmiştir. İkinci aşamada ölçümler alınmıştır. Üçüncü aşamada PMV grafikleri çizilmiştir. Dördüncü ve son aşamada PMV'ye bağlı olarak PPD'ler hesaplanmıştır. Değerlendirmenin bir sonucu olarak, çalışanlar için optimum termal konforu sağlamak için önerilerde bulunulmuştur.

Termal konfor ölçümleri; sıcaklık, nem, ısıma sıcaklığı, glop ve hava hızı propları ile ölçüm yapan DELTA OHM WBGT 32.3 termal konfor ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, standartta verilen aşağıdaki hususlar göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir;

1. Cihaz ölçüm yapılacak çalışanın normal çalışma alanına yerleştirilir,
2. Eğer bu mümkün değilse ortamdan yaklaşık olarak aynı etkilenmeye maruz kalacağı yere yerleştirilir,
3. Metabolik oran ve kıyafet katsayısı değerleri cihaza girilir,
4. Sensörlerin uyum sağlaması için cihaz açık şekilde 20 dakika beklenir,
5. Cihaz dakikada bir ölçüm almak üzere ayarlanmalıdır,
6. Ölçümler ayakta çalışanlar için zeminden 1,1 m yükseklikte yapılır,
7. Oturan çalışan için zeminden 0,6 m yükseklikte yapılır.
8. Ölçüm süresi en az 1 saat olmalıdır.

Ölçüm yapan makineye bazı verilerin önceden girilmesi gereklidir. Bunlar giysi ısıl direnci ve metabolizma oranı değerleridir.

Çizelge 1. Çeşitli Giysi Türleri ve Yalıtım Katsayıları (ASHRAE, 2010; İmancı, 2014)

Kıyafet türü	Yalıtım katsayısı
Pantolon, kısa kollu gömlek	0,57
Pantolon, uzun kollu gömlek	0,61
Pantolon, uzun kollu gömlek, ceket	0,96
Diz uzunluğunda etek, kısa kollu gömlek	0,54
Ayak bileği uzunluğunda etek, uzun kollu gömlek, ceket	1,10
Etek / Elbise	0,54-1,10
Şort	0,36
Önlük / Tulum	0,72-1,37
Spor Kıyafetleri	0,74

Giysi ısıl direnci ve metabolizma oranı fabrika ortamı göz önüne alınarak ASHRAE 55 standardına göre kabul edilmiştir (bk. Çizelge 1 ve Çizelge 2). Kış aylarında yapılan ölçümler için yalıtım katsayısı 0,96, yaz için ise 0,57 alınmıştır.

Çizelge 2. Bazı Günlük Aktiviteler İçin Metabolizma Oranları (ANSI-ASHRAE 55-2010)

Aktivite	Metabolik oran (W/m ²)	Metabolik oran (met)
Yürüme	115	2.0
Oturarak okuma, yazma	60	1.1
Kaldırma/ paketlenme	120	2.1
Testere ile yapılan işler	105	1.8
Hafif işler	115-140	2.0-2.4
Ağır işler	235	4.0
Ağır yük kaldırma (50kg)	235	4.0
Kazma, kırma işlemleri	235-280	4.0-4.8

Metabolizma oranları ile ilgili kabul verileri aşağıda verilen Çizelge 2’den ve metabolik oranların aktiviteye göre sınıflandırılması (ISO 8996, 2004) ile ilgili standarda uygunluğu kontrol edilerek belirlenmiştir. Ortalama metabolik hızdan, 1 Met = 58,2 W / m² (18.4 BTU / H FT²) formülü kullanılarak metabolik oran değerleri bulunmuştur.

Değerlendirme için; TS EN ISO 7730 standardında belirtilen PMV-PPD indeksi kullanılmıştır. Ve elde edilen değerlerin ortalamaları alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucu elde edilen PMV değerleri ile ilgili değerlendirme Çizelge 3’e göre yapılmaktadır.

Çizelge 3. ASHRAE Isıl duyum ölçeği (ASHRAE, 2010)

PMV değeri	3	2	1	0	-1	-2	-3
Anlamı	Aşırı sıcak	Sıcak	Biraz sıcak	Nötr	Biraz serin	Serin	Soğuk
Yorum	Bunaltıcı, tolere edilemez	Çok sıcak	Sıcak, tolere edilebilir	Konforlu	Soğuk, tolere edilebilir.	Çok soğuk	Tolere edilmez, soğuk.

3. SONUÇLAR

Fabrikada yaz ve kış aylarında, sıcak ve soğuk ortamların doğru tespiti için farklı dış sıcaklık şartlarında ölçümler alınmıştır. Günlük değişen şartlar incelenmiş ve en sıcak ve en soğuk ölçüm günleri ile ilgili veriler aşağıda bulunan çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4. Kış aylarında alınan termal konfor ölçüm sonuçları

Bölge	Kuru Hava Sıcaklığı Ta (°C)	Küre Sıcaklığı Tg (°C)	Hava akım hızı (m/s)	Nem (%)	Metabolik oran (met)	Giysi ısııl direnci (clo)	PMV	PPD (%)
Silim Hattı	8,9	9,1	0,45	73,5	2,0	0,96	-2,16	84,0
ST Bölümü	7,8	8,2	0,42	82,1	2,0	0,96	-2,33	89,0
Eskitme Alanı	7,6	8,2	0,53	86,3	2,0	0,96	-2,44	92,0
Katraklar	7,9	8,3	0,55	86,9	2,0	0,96	-2,40	91,0

Çizelge 4'te görüldüğü üzere, kış aylarında ortamın soğuması ve hava hızının da etkisi ile PMV ve PPD değerleri çok soğuk bir ortamı işaret etmektedir.

Çizelge 5. Yaz aylarında alınan termal konfor ölçüm sonuçları

Bölge	Kuru Hava Sıcaklığı Ta (°C)	Küre Sıcaklığı Tg (°C)	Hava akım hızı (m/s)	Nem (%)	Metabolik oran (met)	Giysi ısııl direnci (clo)	PMV	PPD (%)
Silim Hattı	27,2	28,0	0,35	81,1	2,0	0,57	0,70	15,0
ST Bölümü	27,7	28,1	0,30	86,2	2,0	0,57	0,92	23,0
Eskitme Alanı	28,8	29,1	0,49	87,6	2,0	0,57	1,08	30,0
Katraklar	28,3	28,6	0,37	86,5	2,0	0,57	1,02	27,0

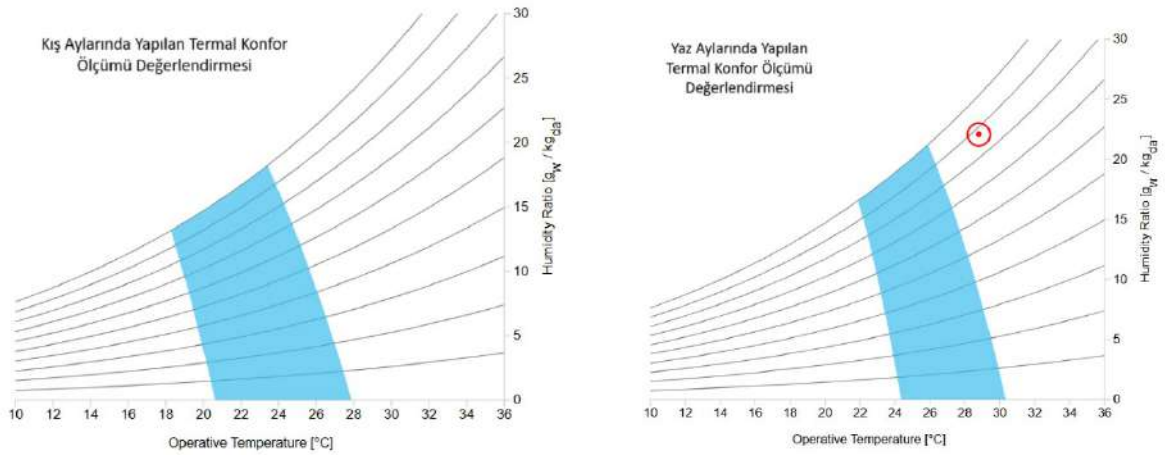
Yaz aylarında alınan ölçümlerde ortamın termal konforunun çalışanlar için tolere edilebilir seviyede sıcak değerler olduğu görülmüştür. Ölçümler sonucunda elde edilen PMV ve PPD değerleri, ortam tam olarak konforlu denilememesine karşılık tolere edilebilir seviyede sıcak olduğunu göstermektedir.



Şekil 1. Termal konfor bölgesi

Şekil 1’de görüldüğü üzere, her iki mevsimde de çalışma ortamı termal konfor bölgesi içerisinde değildir. Bu bölge şekilden verilen yeşil bölge yani $\pm 0,5$ aralığıdır.

Berkeley Üniversitesinin geliştirdiği termal konfor ölçüm değerlendirme grafik sistemine veriler işlendiğinde ise aşağıdaki grafikler ortaya (Şekil 2) çıkmaktadır.



Şekil 2. Berkeley’e göre yaz ve kış PMV değerleri (Berkeley, 2025)

Kış aylarında elde edilen değerler termal konfor standartlarına oldukça uzak olduğu için kırmızı halka hiç görülmektedir. Yaz termal konfor değerleri daha makul seviyede ve standarda yakın olduğu için kırmızı halkaya daha yakındır.

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Alınan ölçümler ve elde edilen PMV ve PPD değerleri, çalışma ortamının hem yaz hem de kış koşullarında termal konfor açısından uygun olmadığını göstermektedir. TS EN ISO 7730’a göre, ortamın termal konforunun iyi olduğu PMV değerinin $-0,5$ ile $+0,5$ arasında olması ile anlaşılır. Alınan

ölçümler sonucunda PMV değerleri -2,44 ile +0,70 arasında değişmektedir. Fabrika ortamında çalışanların ısı konforunun sağlanabilmesi için önlemler alınması şarttır. Özellikle kış aylarında devamlı açık duran ana kapının büyük sorun teşkil ettiği görülmüştür. Her ne kadar lokal ısıtmalar yapılmaya çalışılsa da sulu çalışma yönteminin de etkisi ile maalesef ısıtma konusunda başarılı olunamamaktadır.

Her iki mevsim için hava hızlarına baktığımızda 0,30 ile 0,55 m/s arasındadır. Bu hava hızlarının aslında yeterli olduğu, durgun ya da çok esintili bir hava oluşturmadığı görülmektedir.

Aslında en büyük sorunun ortamın soğutulması ve ısıtılması için genel bir havalandırma sisteminin kurulmamasıdır. Doğal havalandırmadan yararlanılarak ortamın sıcaklığının düşürülmeye çalışılmasının başarısız olduğu açıkça görülmektedir.

Yapılan ölçümler ve değerlendirmeler de bize açıkça göstermektedir ki aşağıda sıralanan önlemlerin acilen alınması gerekmektedir;

1. Ortam ısıtması ve soğutması için genel bir havalandırma sistemi kurulmalıdır.
2. Çalışanların giydikleri kıyafetler ortam sıcaklığını tolere edecek şekilde özel tasarlanmalıdır, bu termal konfor konusunun en önemli bileşenlerden biri olan kıyafet faktörü açısından büyük ehemmiyet taşımaktadır.
3. Özellikle giriş kapısının devamlı açık kalmaması ya da hava perdesi konularak iç ortam sıcaklığına etki etmeyecek hale getirilmesi gerekmektedir, bu hem kış ayları hem de yaz ayları için kritik önlemlerdendir.
4. Çalışanların hareketsiz kalmalarının önlenmesi gerekmektedir. Bu hem ısı konforu hem de ergonomik açıdan önemlidir.
5. Termal konforu etkileyen kriterlerden biri olan çalışanların metabolizma hızlarına göre kıyafet verilmesi konusuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Sadece sulu ortamda çalışanlara önlük vermekle bu sorunu aşmak mümkün değildir.
6. Fabrikayı sulu ve susuz ortamlara bölmek, sıcaklık değişikliğinin fazla olduğu ortamlara göre önlemler almak da düşünülmelidir.

5. KAYNAKLAR

Arıtan, A. E., Şensöğüt, C., & Tümer, M. (2017). Doğaltaş İşleme Tesisinde Termal Konfor Analizi. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1(23), 1–10.

Arıtan, A. E., Memiş, Z. (2021). Bir Doğaltaş işleme fabrikasında çalışanların metabolizma hızları göz önüne alınarak termal konfor şartlarının incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(1), 25–32.

Arıtan, A. E., Şensöğüt, C. (2023). Investigation Of the Change in the Work Environment and in Thermal Comfort Satisfaction of the Natural Stone Industry Employees. International Journal of Economic and Environmental Geology, 14(1), 06–09.

ASHRAE. (2010). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI/ASHRAE Standard No. 55-2010).

Berkeley University. (2025). <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>

İmancı, C. (2014). Döküm Atölyelerinde Termal Konfor Şartlarının İncelenmesi. Uzmanlık tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü.

International Labour Organization. (2014). Physical Hazards, Heat in the Workplace. ILO.

Luoa, M., Wanga, Z., Ke Kec, Caod B., Yo Zhaib, Zhoue X. (2018). Human Metabolic Rate and Thermal Comfort in Buildings: The Problem and Challenge. Building and Environment, 131, 52.

Olesen, B. W. (1985). A New Simpler Method for Estimating the Thermal Insulation of a Clothing Ensemble. ASHRAE Transactions, 91(2), 478–492.

Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı. (2021). Doğaltaşlar Sektör Raporu. Ticaret Bakanlığı.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2006). Orta Dereceli Termal Ortamlar- PMV ve PPD İndislerinin Tayini Termal Rahatlık İçin Şartların Belirlenmesi (TS EN ISO 7730). Türk Standartları Enstitüsü.

MERMER İŞLEME TESİSLERİNDE HATALARIN HATATÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZ (HTEA) YÖNTEMİYLE RİSK DEĞERLENDİRMESİ

RISK ASSESSTMENT OF DEFECTS IN MARBLE PROCESSING PLANTS WITH THE FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) METHOD

I. Kutbay^{1, 2, *}, S.N. Günaydın¹

¹*Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği ABD, Üsküdar/ İstanbul* ²*Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Üsküdar /İstanbul*

*Sorumlu yazar: isil.kutbay@sbu.edu.tr / kutbay2001@yahoo.com

ÖZET

Mermer kalitesi açısından, Türkiye’deki mermerlerin oldukça iyi olduğu bilinmektedir. Maden ocaklarından çıkarılan mermer blokları fabrikalara plaka üretimine ve plakalar mermer işleme tesislerinde işlenerek yarı mamul haline getirilmektedir. Mermer çıkarıldığı bölge, oluşum süreci ve jeolojik etkilere bağlı olarak kendine özgü mineral içeriği, doku, renk, desen, yoğunluk, sertlik gibi farklı özellikler gösterebilmektedir. Tesislerde plakalar istenilen ebatlarda kesilme, dilimleme, zımparalama, cilalama, tasarımlama, şekillendirme, düzeltme, detay işlemlerinin verilmesi gibi çalışmalar yapılarak ticari ürün haline getirilmektedir. Mermer üretim sürecinin tamamında çalışanlar ağır çalışma koşullarında görev yapmakta, birçok tehlike ve risklere maruz kaldığı için işveren ve çalışanları maddi manevi kayıplara uğratabilmektedir. Çalışma koşulları, makine ve teçhizat, kullanılan malzemeler, çalışan organizasyon hatasından kaynaklanan tehlikeler belirlenerek, risk değerlendirilmesi ve derecelendirilmesi ile gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Kayıpları önleyebilmek için iş sağlığı ve güvenliği açısından düzenli sistemli çalışmalar yapılmasına gereksinim duyulmaktadır. Çalışmamızda mermer işleme tesislerinde çalışanların karşılaştığı tehlikeler ve olası riskler, hata türleri ve etkileri analiz (HTEA) yöntemi kullanılarak risk öncelik skoruna göre belirlenmiş, önerilen faaliyetler saptanmış ve risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Sonuç olarak tesiste kaynağına göre gerekli önlem, maliyetlerin düşürülmesi ve eğitim planlaması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mermer İşleme, Mermer İşleme Tesisi, Tehlikeler, Riskler, HTEA (Hata Türleri ve Etkileri Analizi)

ABSTRACT

In terms of marble quality, it is well known that the marbles in Turkey are of very high quality. Marble blocks extracted from quarries are sent to factories for slab production, and the slabs are then processed in marble processing plants into semi-finished products. Depending on the region of extraction, the formation process, and geological influences, marble may exhibit unique characteristics such as mineral content, texture, color, pattern, density, and hardness. In the processing plants, slabs are transformed into commercial products through operations such as cutting, slicing, sanding, polishing, designing, shaping, flattening, and detailed finishing in desired dimensions. Throughout the entire marble production process, workers operate under harsh working conditions and are exposed to various hazards and risks, which may result in financial and emotional losses for both employers and employees. It is essential to identify hazards arising from working conditions, machinery and equipment, materials used, and organizational failures among employees. Risk assessments and classifications must be carried out to implement necessary preventive measures. To prevent such losses, regular and systematic studies

must be conducted in terms of occupational health and safety. In our study, the hazards and potential risks faced by workers in marble processing plants were identified using the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method. Risks were prioritized based on the Risk Priority Score (RPS), and recommended actions were determined accordingly. As a result, appropriate preventive measures, reducing costs and training plans were developed based on the source of the risks identified in the facility.

Keywords: Marble Processing, Marble Processing Plants, Hazards, Risks, FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)

GİRİŞ

Mermer kalitesi açısından Türkiye'deki mermer kaynakları dünya da önemli bir yere sahiptir (Çetin, 2003). Ülkemizde ilkel üretim, güncel üretim ve kombine üretim yöntemleriyle çıkarılan ham mermer blokları maden (taş) ocaklarından alınarak mermer fabrikalarında mermer yarı mamul üretimi için gönderilmekte ve buradan mermer atölyelerinde yarı mamullerin işlenmesi sağlanmaktadır (Sırakaya ve Kasap, 2019).

Mermerler çıkarıldığı bölge ve mermer çeşidine göre oluşum süreci ve jeolojik etkilere bağlı olarak kendine özgü bir; mineral içeriği, doku, renk, desen, yoğunluk, sertlik gibi farklı özellikler gösterebilmektedir (Çetin, 2003). Mermerin bu özelliklerine göre yarı mamul mermer blokların işlenerek mermer atölyelerinde ticari ürün haline getirilmektedir. Bu atölyelerde genellikle mermer plakaları istenilen ebatlarda ihtiyaca göre kesilme, dilimleme, zımparalama, cilalama, tasarımlama ve şekillendirme, mermerin düzeltilmesi, mermere gerekli detay işlemlerinin verilmesi gibi sahada çalışmalar yapılmaktadır (Demir Şahin ve Eker, 2024)

Mermer maden ocağından çıkarılması ve son ticari ürün haline getirilmesine kadar geçen üretim sürecinde çalışanlar ağır çalışma koşullarında görev yapmakta, birçok iş kazası ve meslek hastalığına maruz kalmaktadırlar (U.S. Department of Labor OSHA, 2005). Bu durum işveren, çalışanları maddi ve manevi kayıplara uğratabilmektedir. Bunun sonucunda kayıpları önleyebilmek için iş sağlığı ve güvenliği açısından düzenli ve sistemli çalışmalar yapılmasına gereksinim duyulmaktadır. Çalışma koşulları, makine ve teçhizat, kullanılan malzemeler, çalışan ve organizasyon hatasından kaynaklanan tehlikeler gibi temel unsurlar belirlenerek risk değerlendirilmesi ve derecelendirilmesi ile gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir (Çınar ve Şensöğüt, 2016)

Bu durumda risk analizi yapıldığında mermer maden ocağından çıkarılması ve son ticari ürün haline getirilmesine kadar geçen üretim sürecinde faaliyetler sırasında olması muhtemel potansiyel tehlikelerin belirlenmesi, bunlara ilişkin risklerin derecelendirilmesi ve gerçekleşmesi tahmin edilebilen muhtemel risklerle ilgili kontrol tedbirlerinin alınmasına ait ulusal veya uluslararası standartlar esas alınarak nitel (öncül risk analizi yöntemi ve risk matrisleri (L matrisi vs.), tehlike ve çalışılabilirlik çalışması (HAZOP), hata türü ve etkileri analizi (HTEA) gibi), nicel (ağaç tabanlı teknik analizler (hata, olay, sebep-sonuç vs. statik analiz), dinamik sistemler için teknik analizleri (Markov modelleri, dinamik olay mantığı analitik yöntemler vs. dinamik analizler) gibi) analiz yöntemlerin ve esasların tümünü kapsamaktadır (Aslantaş ve Erpek, 2024; Önder et al., 2022). Nitel, nicel ve dinamik olmak üzere üç temel başlık altında yaklaşık 150 adet risk değerlendirme metodu bulunmaktadır. Risk değerlendirme metot seçimi yapılan çalışmaların etkinliği ve izlenebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu açıdan her sektörün risk değerlendirme metot veya metotları işletmenin büyüklüğü, üretimin kapasitesi, yapılan işlerin işlevine veya fonksiyonuna göre risk değerlendirme metotlarından biri veya birden fazla yöntemi kullanmak mümkündür (Erten ve Utlu, 2017).

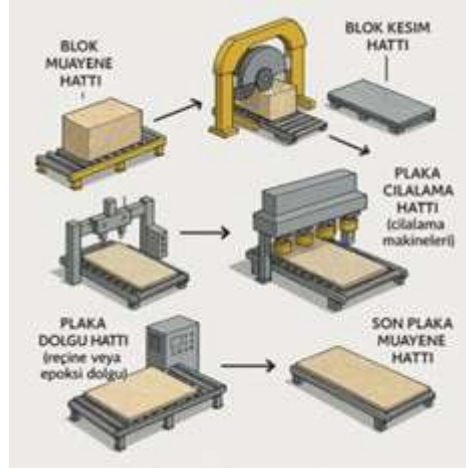
HTEA ile hataların veya risklerin tahminiyle üretim sistemi, yarı mamul tasarımı, işlem süreçleri, yapılan hizmetlerde oluşabilecek hataları veya riskleri değerlendirmek ve bu tür hataların veya riskleri önlemek için uygulanan güçlü bir nitel analiz tekniği (Sırakaya ve Kasap, 2019) olduğundan incelenen mermer üretim hattının potansiyel hata türlerini analiz etmek için hataları olasılıklarına ve benzerliklerine göre sınıflandırmamıza, üretilen yarı mamulün kalitesi, üretim verimliliğini geliştirme ve üretim sürecini en sağlıklı işlevini yerine getirme uygulamasını sağlanabilmektedir (Akın, 2005; Şaşal, 2024). Bu da üretim hatalarını iş sağlığı ve güvenliği açısından öngörülen tedbirlerin alınması ve yarı mamulün üretimi süreçlerinden itibaren hataların olası nedenlerini değerlendirilmesini sağlamaktadır. Hem çalışan işçilerin güvenli bir üretim sürecinde çalışmasına imkân verilmesine, hem de güvenilir kaliteli yarı mamullerin üretilmesine olanak sağlayarak mermer üretim süreçlerinin güvenilirliği kontrol edilmektedir (Özfırat ve Özfırat, 2021). Böylece üretim sisteminin her aşamasının geliştirilmesi veya iyileştirilmesi yapılırken; mevcut veya potansiyel hata/risk türlerinin belirlenmesini, sıralanmasını ve iyileştirilmesini veya geliştirilmesini planlayan bir yaklaşımla mermer atölyelerindeki işlem aşamasında öncelikleri belirlemede yardımcı olan bir metodolojidir (Önder et al.,2022).

Bu çalışmada mermer işleme tesislerinde iş sağlığı ve güvenliği açısından üretim sürecinde HTEA yöntemi kullanılarak üretim sürecinin nitel yönlerini değerlendirmek, sürecin gözlem, görüşme ve odak gruplarına göre nesnel görüşleri kapsayan verileri toplamak, derinlemesine tehlikeleri ve olası riskleri anlamak ve gerekli önlemleri almak hedeflenmiştir. Bu kapsamda yarı mamul üretimi esnasında çalışanların karşılaştığı tehlikeler ve olası risklerin belirlenmesi, değerlendirmesi, iş sağlığı ve güvenliği açısından gerekli kontroller yapılması, tehlike ve risk önceliğine göre önlemlerin ve faaliyetlerin belirlenmesi, maliyet simülasyon analizi ile maliyetlerin düşürülmesi, iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin yapılması planlanmıştır.

MERMER PLAKA ÜRETİM HATTI VE YÖNTEM

Mermer Plaka Üretim Hattı

Çalışmamızda Ordu ilinde bulunan 150 adet mermer işleme tesislerinde mermer fabrikasından temin edilen yurt içi ve yurt dışı toplam 62 çeşit mermer bloklardan yarı mamul mermer plaka üretimi ve işlemesi yapılmaktadır. Bu mermer işleme tesislerinde plaka üretiminin gerçekleştirildiği sahalarda hem işveren hem de çalışanlarla görüşülmüş sahadaki plaka üretim hattı incelenerek yarı mamul üretimi sırasında iş sağlığı ve güvenliği açısından tehlikelerin tanımlanması ve risklerin belirlenmesi yapılmıştır. Mermer plaka üretimi (Şekil 1) fabrikadan temin edilen bloklar seçilerek plaka üretim hattına getirilmekte burada gerekli muayeneler yapılarak katrak makinesinde istenen boyutlarda kesilmektedir. Kesildikten sonra mermer plakalar tekrar muayene yapılarak hatasız olanlar plaka halinde paketlenerek veya cila, kurutma, seleksiyon işlemi gibi kalite kontrol ve paketleme yapıldıktan sonra satışa sunulabilmektedir. Hatalı plakalar (çatlak oluşumu gibi); hataların giderilmesi (dolgu veya epoksi yapılması gibi) işlemlerine tabi tutularak kalite kontrol ve paketleme aşamalarından sonra tekrar satışa hazır hale getirilmektedir.



Şekil 1. Mermer işleme tesisleri plaka üretim hattı şeması

Tehlike ve Risk Değerlendirme Yöntemi

Çalışmamızda mermer işleme tesislerinde HTEA yöntemi kullanılarak tehlike ve riskler işveren-çalışanlar ile görüşülerek belirlenmiş ve risk değerlendirmesi yapılmıştır. Mermer işleme tesislerinde çalışan sayısı işleme tesislerinin büyüklüğü ve üretim kapasitesine bağlı olarak değişiklik göstermekte ve genellikle çalışan sayısı 10-50 arasında değişmektedir. Bu yöntemle mermer işleme tesislerinde mermer plaka üretimi hattının her aşaması için öncelikli mevcut ya da potansiyel hata veya risk türlerinin belirlenmesini, sıralanmasını, iyileştirilmesini ve geliştirilmesini planlayan bir yaklaşımdan yararlanılmıştır. HTEA’da risk öncelik sayısı (RÖS); olasılık, şiddet ve saptanabilirlik faktörlerini kullanarak, her hata tipi veya nedeni için hesaplanan risk skor değeri ile bulunmuştur. Burada olasılık tehlikenin gerçekleşme sıklığını, şiddet faktörü bu tehlikenin gerçekleşmesi durumunda ne kadar etki yaratacağını, saptanabilirlik faktörü ise bu tehlikenin gerçekleşmeden önce ne derecede saptanabileceğinin ölçüsünü ifade etmektedir. Risk faktörleri, RÖS değerinin hesaplanmasıyla sözel olarak tanımlanan değerler, 1-10 sayı aralığında (Çizelge 1) kullanılarak riskin değerlendirilmesi sağlanmıştır. HTEA’da riskin gerçekleşme olasılığı ve şiddeti arttıkça derecesinin arttığı görülmekte ve ne kadar çok artarsa riskin saptanabilirliği o kadar zor olmaktadır (Özfırat, 2014).

Çizelge 1. HTEA ile risk öncelik sayısının (RÖS) önem derecesi

Risk Öncelik Skoru	Değer	Risk Öncelik Skoru Değeri	Önlem
1-50 arası	Düşük riskli	$RÖS < 40$	Almaya gerek yok
50-100 arası	Orta riskli	$40 \leq RÖS \leq 100$	Alınabilir
100-200 arası	Yüksek riskli	$RÖS > 100$	Alınması gerekir
200-1000 arası	Çok yüksek riskli	$RÖS > 100$	Alınması gerekir

Mermer işleme tesislerinin üretim hattında potansiyel hatalar veya riskler üzerine yoğunlaşmış ve belirli işlem aşamalarında tekrarlamalar saptanmıştır. HTEA yöntemiyle mermer işleme tesislerinde uygulama aşamaları; mermer blok muayene aşaması, blok kesimi veya plaka üretimi aşaması, plaka muayene aşaması, plaka dolgu aşaması, plaka cilalama aşaması olarak tespit edilmiş ve yarı mamulün üretiminin analizi ve bulguların değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu aşamalardan elde edilen RÖS değerleri dikkate alınarak risk değerleri sınıflandırılması yapılmıştır. Önlemlerin gerekliliğine (Çizelge 2) göre önerilen faaliyetler belirlenmiş ve uygulaması için durum incelemesi yapılmıştır.

Çizelge 2. HTEA ile risk öncelik skoru değerleri ve skorunun belirlenmesi

Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik	Derece
Çok yüksek	Çok tehlikeli / Ciddi	İmkânsız / Çok zor	10 / 9
Yüksek	Çok büyük / Büyük / Önemli	Zor / Az / Çok az	8 / 7 / 6
Orta	Orta / Küçük / Önemsiz	Orta / Ortanın üstü / Yüksek	5 / 4 / 3
Düşük / Nadiren	Çok önemsiz / Etkisi yok	Çok yüksek / Kesin	2 / 1

Mermer Plaka Hattındaki İşlemlerin Maliyet Analizi Simülasyonu

Mermer işleme tesislerinde yaygın kullanılan maliyet kalemleri; ekipman, işçilik, enerji ve malzeme gibi temeller ele alınarak 2025 tahmini maliyet analizi simülasyonu yapılmıştır. Mermer sektöründe mermer maliyet raporu Demir (2017) ve bu konuda yapılan araştırmalar Karabay (2020), Tellioglu ve Karabay (2021) dikkate alınarak Ordu ilindeki mermer işleme tesislerinin tahmini maliyetleri mermer plaka üretim hattı için belirlenmiş ve ayrıca tahmini maliyetler, her kalem için ayrı ayrı olacak şekilde USD biriminde verilmiştir.

MERMER PLAKA ÜRETİM HATTINDAKİ BULGULAR

Mermer Plaka Üretim Hattındaki Tespit Edilen Tehlike, Risk ve Önlem Bulguları

Çalışmamızda mermer işleme tesislerinde HTEA yöntemi kullanılarak tehlike ve risk analizi yapıldı. Mermer plaka üretim aşamalarına göre tehlikenin tanımlanması ile riskler tespit edildi, alınması gereken tedbirler ve önerilen faaliyetler, düzeltilmesi gerekli durumlar belirlendi. Tehlike tanımlanması (T), tespit edilen riskler (R) ve önerilen faaliyetler (Ö) olarak ifade edildi. Hesaplanan RÖS değerine göre risklerin değerlendirilmesi yapıldı. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3, 4, 5, 6 ve 7'ye işlendi.

Blok Muayene Hattında Tespit Edilen T1, R1 ve Ö1 Bulgular

T1.1: Blokların getirilmesinde kullanılan vincin periyodik muayene ve bakım onarımının olmaması, R1.1: vincin yol açacağı kazalar, yaralanma, iş gücü kaybı, maddi zarar ve Ö1.1: önerilen faaliyetler olarak vinç bakım onarım faaliyetleri uzman teknik ekibe işveren tarafından yaptırılması, çalışmaya başlanmadan önce vinç halatlarının ve vinç kanca kilidinin uygunluğu kontrol edilmesi,

çalışma alanının sürekli olarak kontrol altında tutulması ve vincin kaldırma, dönme, indirme mesafesinde kimsenin olmaması gerekir. T1.2: Vinç ile taşınan mermer bloğuna yapılan gözle muayene ve bloğun altından geçen çalışanın olmasıyla, R1.2: İş kazası, ölüm, uzuv kaybı oluşumu, Ö1.2: Çalışanlar uyarılması gerekir. Uyarının dikkate alınmadığı tespit edildiği durumda ise ceza-i yaptırım uygulanarak tehlikenin tamamen ortadan kaldırılması amaçlanmalı ve işveren tarafından gerekli tüm önlemler alınması gerekir T1.3: Üçüncü şahısların saha alanının içerisine girmesiyle, R1.3: Yaralanma, maddi zarar oluşumu, Ö1.3: Saha içerisinde ve dışarısında gerekli uyarı levhaları ile bu durumun önüne baştan geçilmesi gerekir. Üçüncü şahısların izinsiz girişleri engellenmesi, takip edilmesi, izinli girişlerde ise yetkili bir çalışanın eşlik etmesi sağlanır. T1.4: Forklift, R1.4: Plakaların yüklenmesi ve boşaltılması esnasında yaralanma, sakatlanma, uzuv kaybı, kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, maddi zarar, Ö1.4: Operatörün ve yardımcı elemanların (plakaların yüklenmesi ve boşaltılması esnasında) çalışma koşullarına göre iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili eğitimler alması, forkliftin kullandığı güzergâh şeritler ile belirlenerek çalışanların buradan uzak tutulması sağlanmalı, forkliftin kişilere ve yapılarla çarpmasının önlenmesi için bariyer oluşturulmalıdır. Çalışma öncesi forkliftin durumu kontrol edilmelidir. Forklift ile çalışan elemanların uygun kişisel koruyucu donanımları (KKD) kullandığından emin olunmalıdır. Gerekli görüldüğü takdirde sahada bulunan tüm araçlar için trafik yönetim planı oluşturularak daha güvenli bir çalışma ortamı oluşturulabilir. T1.5: Acil toplanma alanının dolu olması, R1.5: Kargaşa sonucu yaralanma, maddi zarar oluşumu, Ö1.5: Çalışma alanının büyüklüğüne uygun olarak acil toplanma alanı ayrılmalı ve tatbikatlar yapılması, acil toplanma alanlarının yerleri tüm çalışanlar tarafından bilinmeli ve işaret levhaları ile gösterilmesi gerekir.

Çizelge 3. HTEA ile blok muayene hattında risk değerlendirmesi

Mermer Üretim Prosesi ve Kodu	Tehlikenin Tanımı	Tespit Edilen Risk	Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik	RÖS	Önerilen Faaliyetler
Blok Muayene (T1, R1, Ö1)	T1.1	R1.1	8	8	6	384	Ö1.1
	T1.2	R1.2	4	6	3	72	Ö1.2
	T1.3	R1.3	4	6	3	72	Ö1.3
	T1.4	R1.4	4	6	4	96	Ö1.4
	T1.5	R1.5	9	9	4	324	Ö1.5

Blok Kesim veya Plaka Üretim Hattında Tespit Edilen T2, T3 ve Ö3 Bulgular

T2.1: Islak zemin, R2.1 Kayarak düşme, yaralanma, sakatlanma oluşumu, Ö2.1: Zemin malzemesinin suya dayanıklı olması, oyuk oluşumu engellenmeli, oluşan çukurlar doldurulmalı, yeterli ızgaralar ile su birikimi engellenmeli, kaygan zeminlerde kaydırmaz bant vb. kullanılmalıdır. T2.2: Su dolu kuyu, R2.2 Kuyu içerisine düşerek yaralanma, boğulma durumu, Ö2.2: Kuyunun çevresinin emniyet şeridine alınması, uyarı işaretleri ile belirtilmeli, kuyunun üstü uygun malzeme ile kapatılmalı ve kuyu dolmadan boşaltılmalıdır. T2.3: KKD kullanılmaması R2.3: Yaralanma, incinme, meslek hastalıkları, uzuv kaybı durumu, Ö2.3: Çalışana kişisel koruyucu donanımı zimmetlenmesi, kullanmalarının sağlanması ile KKD kullanımı ile ilgili eğitimler verilmelidir. T2.4: Kabloların dağınık halde bulunması R2.4 Takılarak düşme, elektrik çarpması durumu Ö2.4: Kabloların çalışma sahasından kaldırılmalı, kablolar yalıtılmış malzeme ile kaplanmalıdır. T2.5: Plaka kesme makinesinin çıkardığı gürültü, R2.5 Meslek hastalığı, işitme kaybı, fizyolojik etki oluşumu, Ö2.5: Çalışanlara gerekli kişisel koruyucu ekipman işveren tarafından verilmeli ve kullanımı sağlanmalıdır, donanımlar kişiye özel olmalıdır. T2.6: Dağınık çalışma ortamı, R2.6 Takılarak düşme, düşme bağlı yaralanma, Ö2.6: Çalışanlara gerekli eğitimler verilmeli ve uyarılar yapılmalıdır. Kullanılan ekipman ve malzemeler kullanım sonrasında yerlerine konulmalıdır. T2.7: Yetersiz aydınlatma, R2.7 Görme

bozuklukları, iş aksaması, Uyarı ve ikaz levhalarının olmaması, R2.8: Çalışanların tehlikeli durum ve ortamlara karşı hazırlıksız yakalanması, yaralanma, maddi zarar, Ö2.8: Levhalar standartlara uygun boyutlarda, renklerde ve sayıda olacak şekilde uygun konumlara yerleştirilmelidir. T2.9: Tozlu çalışma ortamı, R2.9 Çalışanların tozdan etkilenmesi, kronik maruziyet sonucu meslek hastalığı Ö2.9: Sulu çalışma şekli benimsenmeli ve tüm çalışanlara yeterli ve gerekli tüm kişisel koruyucu donanımlar işverence tedarik edilmelidir. Çalışanların çalışma saatleri üzerinde dikkatle durularak maruziyetin minimuma indirilmesi için faaliyetler yapılmalıdır. T2.10: Granittin kesim esnasında yetersiz su besleme, R2.10: Granitin kesimi esnasında çıkan kıvılcımlar dolayısı ile yangın, Ö2.10: Granit içeriği dolayısı ile susuz kesim esnasında kıvılcım çıkartan bir taş çeşidi olduğundan makinelerin kesim esnasında özellikle granitte yeterli miktarda su beslemeyi yapması büyük önem arz etmektedir. Bu hususta kesim makinesinin bakımı periyodik olarak yapılmalı, kontrol önlemleri alınmalı ve çalışanlar granit hakkında yeterli bilgiye sahip olmalı, bilinçlendirilmelidir. T2.11: Taş sıçraması, R2.11: Kesim esnasında göze taş parçası kaçması, yaralanma, iş gücü kaybı Ö2.11: Mermerin kesimi esnasında irili ufaklı parçaların sıçraması noktasında ilk olarak çalışanların her birinin kendini muhafaza etmesi önemli cihettir. Bu noktada gerekli eğitimler verilmeli, uygulamalar takip edilmelidir. Çalışanlara göz koruyucu ve diğer vücut koruyucuları mutlaka işveren tarafından tedarik edilmeli ve kullanılmalıdır. T2.12: Çalışanların hareket sahasında atık ve parça mermerlerin dağınık bir şekilde bulunması, R2.12: Takılarak/kayarak düşme, yaralanma, sakatlanma, iş gücü kaybı durumu, Ö2.12: Çalışma ortamının daima derli ve toplu tutulmasına özen gösterilmeli, çalışanlar bu hususta uyarılmalı ve bilgilendirilmeli, gerekli görüldüğü takdirde bir çalışana görev olarak belirtilmelidir.

Çizelge 4. HTEA ile blok kesim veya plaka üretim hattında risk değerlendirmesi

Mermer Üretim Prosesi ve Kodu	Tehlikenin Tanımı	Tespit Edilen Risk	Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik	RÖS	Önerilen Faaliyetler
Blok Kesim (T2, R2, Ö2)	T2.1	R2.1	6	5	4	120	Ö2.1
	T2.2	R2.2	4	5	5	100	Ö2.2
	T2.3	R2.3	5	4	4	80	Ö2.3
	T2.4	R2.4	4	7	2	56	Ö2.4
	T2.5	R2.5	4	6	3	72	Ö2.5
	T2.6	R2.6	8	4	4	128	Ö2.6
	T2.7	R2.7	7	5	2	70	Ö2.7
	T2.8	R2.8	4	4	3	48	Ö2.8
	T2.9	R2.9	8	6	2	96	Ö2.9
	T2.10	R2.10	3	8	5	120	Ö2.10
	T2.11	R2.11	3	4	8	96	Ö2.11
	T2.12	R2.12	7	4	4	112	Ö2.12

Plaka Muayene Hattında Tespit Edilen T3, R3 ve Ö3 Bulgular

T3.1: Zeminin düzgün olmaması, R3.1 Mermer plakaların yerle tam temasının sağlanamaması sonucu devrilme, iş kazası, maddi hasar, Ö3.1: Stok ve istifleme yapılan alanlarda zeminin düzgün olması büyük önem arz etmektedir. Zemine gerekli bakımlar yapılmalı ve oluşabilecek oyuk, engebe ve çukurlara karşı gerekli önlemler alınmalıdır. T3.2: Mermer parçaların dik ve duvara yaslı bir şekilde desteksiz olarak istiflenmesi, R3.2 Taşların düşmesi, devrilmesi, kayması sonucu yaralanma, sakatlanma, işgücü kaybı, maddi zarar, Ö3.2: Düşebilecek, kayabilecek veya devrilebilecek taşlar

çalışma ortamı içerisinde dik bir şekilde ve desteksiz olarak güvensiz bir biçimde bırakılmamalıdır. Mermerler zemine paralel ve yatay olacak şekilde düzgün bir zemine altına takozlarla desteklenerek istiflenmelidir. Çalışan bireylere istifleme ve güvenli çalışma şekilleri hakkında gerekli eğitim işverence verilmelidir.

Çizelge 5. HTEA ile plaka muayene hattında risk değerlendirmesi

Mermer Üretim Prosesi ve Kodu	Tehlikenin Tanımı	Tespit Edilen Risk	Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik	RÖS	Önerilen Faaliyetler
Plaka Muayene (T3, R3, Ö3)	T3.1	R3.1	3	3	5	45	Ö3.1
	T3.2	R3.3	10	3	6	180	Ö3.2

Plaka Dolgu Hattında Tespit Edilen T4, R4 ve Ö4 Bulgular

T4.1: Plaka dolgu makinesinde vakumla yükleme R4.1 Taşın çatlak olması, taşın kırılması ile yaralanma, maddi kayıp Ö4: Vakum sisteminin emme gücü 6 milibarın (mbar) altında olmamalıdır. Emiş gücünün düşük olması önlenmelidir. Makine bakım ve onarımının periyodik aralıklarla yetkili kişiler tarafından yapılarak plaka düşmesi ile taş kırılması, parçalanması durumlarının önüne geçilmelidir. T4.2: Dolgu kimyasalının kullanılması, R4.2 Epoksi kimyasalının solvent içermesi, solunum problemleri, Ö4.2: Epoksi kimyasalının kullanım sıcaklığı 50°C'yi geçmesi önlenmelidir. Epoksi kimyasalının solvent içermemelidir. Kimyasalın içeriği ve kullanım sahası kontrol edilmelidir. T4.3: Dolgu işleminin yapılması sırasında KKD kullanılmaması, R4.3: Astım, solunum yolu tahrişi, alerjik reaksiyon, hassaslaşma, Ö4.3: Kimyasalın çalışanların vücuduna teması, her türlü kimyasal maruziyetine karşı önlemler alınarak maruziyet ortadan kaldırılmalıdır. Gürültü seviyesi kapalı mekânlarda sınıra yakın ise kulak odyografisi 6 ayda bir yapılmalıdır.

Çizelge 6. HTEA ile dolgu hattında risk değerlendirmesi

Mermer Üretim Prosesi ve Kodu	Tehlikenin Tanımı	Tespit Edilen Risk	Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik	RÖS	Önerilen Faaliyetler
Plaka Dolgu (T4, R4, Ö4)	T4.1	R4.1	6	10	4	240	Ö4.1
	T4.2	R4.2	7	6	3	126	Ö4.2
	T4.3	R4.3	10	5	2	100	Ö4.3

Plaka Cilalama Hattında Tespit Edilen T5, R5 ve Ö5 Bulgular

T5.1: Plaka cila makinesinin çıkardığı gürültü, R5.1 Meslek hastalığı, işitme kaybı, fizyolojik etki durumu, Ö5.1: Plaka cila makinesi ile çalışacak veya makine yakınında çalışanların 80 desibelin üzerinde olduğu kısımlarda gürültü seviyesi düşürülmeli veya çalışanlara KKD verilmelidir. Gürültü seviyesi mevzuatta belirtilen seviyede tutularak meslek hastalıklarının önüne geçilmelidir. T5.2: Plaka cila makinesinde aşındırıcıların yüksek basınç ve hızda kullanımı, R5.2 Aşındırıcıların fırlaması, yaralanma, iş kazası, maddi kayıp, Ö5.2: Aşırı basınç durumu önlenmeli ve böylece plaka kırılması ile abradantların fırlaması durumu ile karşılaşılması için önlemler alınmalıdır. T5.3: Plakanın yüksek basınç etkisinde kalması, R5.3 plaka kırılması, dağılması, maddi kayıp, iş kazası, Ö5.3: Vakum sisteminin emme gücü 6 mbar altında tutulmalıdır. Plaka kırılması, düşmesi ve parçalanması durumlarını ortadan kaldırmak amacıyla makinenin bakım onarımı yetkili kişilerce periyodik olarak yapılmalıdır.

Mermer Plaka Hattındaki İşlemlerin Maliyet Analizinin Bulguları

Ordu ilindeki mermer işleme tesislerindeki ortalama ekipman fiyatı, asgari ücret ve uzmanlık farkları göz önüne alınarak ortalama işçilik ücretleri kilowatt (kWh) başına enerji tüketim maliyeti, reçine, su aşındırıcı gibi sarf malzemelerin fiyatları temel alınarak tahmini maliyet analizi değerleri belirlendi (Çizelge 8). Bu sayede gerçek üretim başlamadan önce maliyet öngörüsü, mermer plaka üretim aşamalarında optimizasyon fırsatları, karar destek aracı olarak özellikle mermer yatırımcı ve destekçilerine dikkat çekmek için bu simülasyon yapıldı.

Çizelge 7. HTEA ile plaka cilalama hattında risk değerlendirmesi

Mermer Üretim Prosesi ve Kodu	Tehlikenin Tanımı	Tespit Edilen Risk	Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik	RÖS	Önerilen Faaliyetler
Plaka Cilalama (T5, R5, Ö5)	T5.1	R5.1	6	6	3	108	Ö5.1
	T5.2	R5.2	9	10	3	270	Ö5.2
	T5.3	R5.3	8	10	3	240	Ö5.3

Çizelge 8. Mermer plaka hattındaki işlemlerin tahmini maliyeti

Plaka Üretim Aşaması	Ekipman (USD)	İşçilik (USD)	Enerji (USD)	Malzeme (USD)	Toplam (USD)
Blok Muayene	10000	2000	500	200	12700
Blok Kesim	80000	5000	3000	1000	89000

Plaka Muayene	15000	2500	800	300	18600
Plaka Dolgu	30000	4000	1500	5000	40500
Plaka Cilalama	50000	6000	2500	1000	59000

MERMER PLAKA ÜRETİM HATTINDAKİ HTEA BULGULARI

Belirlenenlere göre iş sağlığı ve güvenliği açısından işleme tesislerindeki yapılan işlerin oluşturduğu tehlikeler önlenmesi, risklerin azaltılması ve önerilen faaliyetlerle kontrol altında tutulması için risk değerlendirilmesi yapılmıştır. HTEA analizinde RÖS risk öncelik skoruna göre tehlike sayılarının verilmiştir. RÖS değerlerindeki farklılıklar; mermer işleme tesislerinde toplam 25 adet tehlike ve bu tehlikelerden kaynaklı risk tespit edilmesinde önemli rol oynamıştır. 1. derece çok yüksek riske sahip olan tehlike sayısı 5 (T1.1, T1.5, T4.1, T5.2, T5.3), 2. derece yüksek riske sahip olan tehlike sayısı 9 (T2.1, T2.2, T2.6, T2.10, T2.12, T3.2, T4.2, T4.3, T5.1), 3. derece orta riske sahip olan tehlike sayısı 9 (T1.2, T1.3, T1.4, T2.3, T2.4, T2.5, T2.7, T2.9, T2.11), 4. derece düşük riske sahip olan 2 (T2.8, T3.1) tehlike sahada belirlenmiştir. Şekil 2’de risk öncelik skorlarına göre tehlike sayılarının yüzdelik dağılımının pasta grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2. Risk öncelik skorlarına göre tehlike sayılarının yüzdelik dağılımının gösterimi

Çalışmanın yapıldığı mermer işleme tesislerinde yaygın olarak gözlemlenen tehlikelerden kaynaklanan riskler ve sayıları; plaka üretim hattındaki makineden kaynaklı risklerin sayısı 10, takılarak düşme, yaralanma riski ve malzemeden kaynaklı riskler 5, elektrik çarpması ile ilgili risklerin sayısı 3, malzeme devrilmesi, toz ile ilgili, yangın ve acil toplanma yeri ile ilgili risklerin sayısı 2 olarak saptanmıştır. Şekil 3.’de tespit edilen tehlikelerden kaynaklanan riskler ve yüzdelik dağılımı pasta grafiğinde gösterilmiştir.



Şekil 3. Tespit edilen tehlikelerden kaynaklanan riskler ve yüzdelik dağılımı

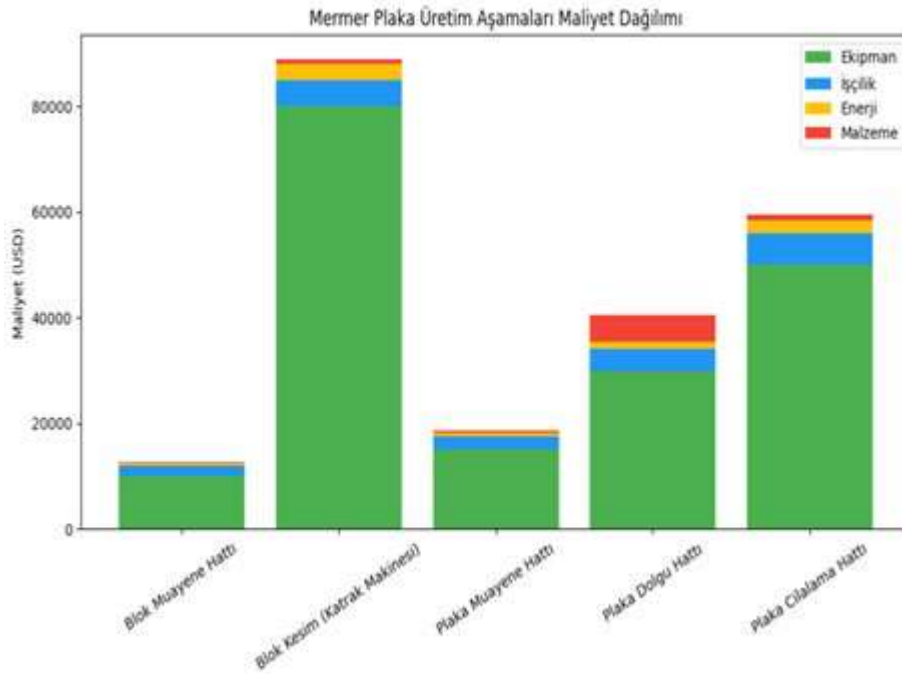
Çalışmamızda mermer işleme tesislerinde plaka üretim hattı HTEA yöntemiyle tehlike ve risk değerlendirilmesine alınmış olup yapılan değerlendirme sonucunda; en yüksek RÖS değerine sahip olan ve ortam olarak dış mekânda bulunan vincin periyodik bakım ve muayenesinin yapılmaması nedeniyle RÖS değerine göre önlem alınması gereken birinci tehlikedir (T1.1). Ardından ortam olarak dış mekânda bulunan acil toplanma alanının dolu olması nedeniyle RÖS değerine göre müdahale edilmesi gereken tehlikeler arasında ikinci sırada yerini almıştır (T1.5). Böylelikle çalışma bulgularından elde edilen 14 adet (R1.1, R1.5, R2.1, R2.2, R2.6, R2.10, R2.12, R3.2, R4.1, R4.2, R4.3, R5.1, R5.2, R5.3) müdahale edilmesi gereken, 11 adet (R1.2, R1.3, R1.4, R2.3, R2.4, R2.5, R2.7, R2.8, R2.9, R2.11, R3.1) müdahale edilebilir risk tespit edilmiştir. Tespit edilen riskler RÖS değerleri doğrultusunda bir müdahale sırasına koyulmuştur. Bu sıralama sırası ile; R1.1, R1.5, R5.2, R5.3, R4.1, R3.2, R2.6, R4.2, R2.10, R2.1, R2.12, R5.1, R2.2, R4.3, R2.11, R1.4, R2.9, R2.3, R1.2, R1.3, R2.5, R2.7, R2.4, R2.8, R3.1 şeklindedir.

Böylelikle mevcut işleme tesislerinde çalışmalar esnasında fark edilemeyecek pek çok tehlikenin ve bunların yol açabileceği potansiyel risklerin önceden tespit edilmesi ile risklerin minimize edilmesi konusunda önemli ölçüde farkındalık sağlanmıştır. Önerilen faaliyetler sayesinde mermer işleme tesislerinde izlenilmesi uygun görülen bir yol sunulmuştur. Bu şekilde tehlike ve riskler ilk öncelik sırasına göre kaynağında mücadele edilmesi öngörülmüş ve işverene gerekli bilgilendirmeler ve uyarılar yapılmıştır. HTEA yöntemiyle önleyici bir yaklaşımın sergilendiği, risklerin önem derecesinin belirlendiği ve bu noktada neler yapılması gerektiği çalışmamızda yer alan risk değerlendirmesinde işlenmiştir. Çalışmamızda küçük ve orta çaplı mermer işleme tesislerinde plaka üretim hattında; mermerin geçirdiği işlemler ve yapılan çalışma, işin yürütümü, işlemin türünden kaynaklanan çalışanların maruz kaldığı her türlü tehlike gözden geçirilmiştir. Bu işlemler esnasında meydana gelen irili ufaklı birçok risk söz konusudur. Çalışmamızda üretim hattında gereken standartlarda; kanun ve yönetmelik ile belirlenen çerçeve içerisinde en iyi çalışma koşullarının sağlanması ve mevcut koşulların iyileştirilmesi, kalitenin belirli bir düzeye getirilip artırılması için sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamının sağlanması gerekmektedir. Bunun için çalışma koşulları hem iş hem de çalışan açısından iyi ve verimli bir düzeye getirilinceye dek gözlemler, kontroller ve ölçümler ile risk değerlendirilmesi yapılarak meydana gelebilecek risklerin ortadan kaldırılabileceği tespit edilmiştir.

Mermer Plaka Hattındaki İşlemlerin 2025 Maliyet Analizi Bulguları

Mermer işleme tesisleri plaka üretim aşamalarında ekipman, işçilik, enerji, malzeme gibi maliyet bileşenlerinin simülasyon veri ve 2025 üretim aşamalarının maliyet tahminlerinin analiz bulguları Şekil

4' te gösterilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi maliyet kalemleri incelendiğinde; blok muayene hattında otomasyon, görsel inceleme ölçüm işlemleri yapılarak uzun vadede işçilik maliyetinin azaltılması, blok kalitesini artırmak için kusursuz blok satın alınması, personele daha hızlı ve doğru sınıflandırma yapılması için eğitim verilmesi verimliliği artıran en önemli fonksiyonlardır. Plaka üretim hattında enerji tüketimini azaltmak için yeni nesil enerji verimliliğini artıran makineler kullanılması, kesimin optimizasyonunun saplanması ve bu sayede atık oluşumunun azaltılması düzenli bakım ile arıza riskinin azaltılması ile üretim duruşlarının önlenmesi ile maliyet düşürülür. Plaka muayene hattında işçilik maliyetinin azaltılması için yapay zekâ destekli görüntüleme sistemlerinin geliştirilmesi gerekir. Standartlaştırma yaparak muayene kriterlerinin netleştirilmesi gerekir. Plaka dolgu hattında vakumlama ve uygulama sistemlerini optimize ederek reçine sistemlerini azaltmak, plakaları toplu işleyerek enerji tasarrufu sağlamak, alternatif plaka dolgu malzemelerinin uygun fiyatlı ve toplu alınması maliyeti düşürür. Plaka cilalama hattında cilalama süresinin optimizasyonunun sağlanması, aşındırıcı tüketimi optimize edilmesi, su tüketimini azaltmak için filtreleme ve geri dönüşüm sistemlerinin kurulması gerekir.



Şekil 4. Mermer plaka üretim aşamaları maliyet dağılımı

TARTIŞMA

Mermer işleme tesislerindeki tehlikelere bakıldığında, işletme içerisinde alınmış olan kontrol önlemleri yeterli olmamakla birlikte işçilerin işe ilk girdiklerinde alacağı temel iş sağlığı ve güvenliği eğitiminin son derece önemli olduğu görülmektedir. Mermer işleme tesislerinde bu tür incelemelerle tehlikeler gözden geçirilmeli ve görevli mühendisler nezaretinde iş güvenliği ve sağlığı uzmanlarınca uygun görülen riskler dikkate alınarak tedbir ve önlemlerin detaylı çalışılması gerekmektedir. Bu çalışmalarla istenmeyen tehlikelerin önüne geçilebilmektedir. İşverenin sağlık ve emniyet kurallarına uyması olası tehlikelerin ve risklerin minimize edilmesini sağlayabilmektedir. Uygulamalarda çalışanların görüş ve tavsiyelerinin alınması, çalışanların üretim hattının bir parçası olduğundan iş memnuniyetini ve iş verimini artırması bakımından önemlidir. Yapılan çalışmalar sadece kanuni gereklilik değil, aynı zamanda üretim hattının iyileşmesi, gelişmesi ve kaliteli ürün üretilmesine de imkân vermektedir. Maddi-manevi kazançlar sağlanması ve üretim sürecinin en sağlıklı şekilde işlevini yerine getirmesi açısından önemlidir. Üretim hatlarındaki birçok yapılan çalışmada (Özfarat, 2021; Aslantaş ve Erpek 2024,) HTEA yönteminin

daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. HTEA, deneyimli bir ekip tarafından sistematik bir çalışmayla uygulandığında üretim sırasındaki hata olasılığını en aza indirilebilmektedir. Literatürdeki (Akin, 2005; Özfirat, 2014; Sırakaya ve Kasap, 2019; Önder and Çiçek 2022, Demir Şahin ve Eker, 2024) sonuçlar kullanılan HTEA yöntemiyle mermer işleme tesislerinde risk değerlendirilmesi yaklaşımımızı destekleyici niteliktedir. Bu da yöntemin çalışanlarda iş sağlığı ve güvenliği bilinci oluşturarak farkındalık yarattığını ve iş kazalarını azalttığını ortaya koymuştur. Bu kapsamda mermer işleme tesislerindeki her aşama için önlem faaliyetlerinin iyileştirilmesi veya geliştirilmesi sağlanmıştır. En iyi, en etkili iş sağlığı ve güvenliği eğitim planlamasının tesisteki her aşama için sağlanabileceğini göstermiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada; mermer işleme tesislerine bizzat gidilmiş, bir mermer ustası eşliğinde gezilmiş ve çeşitli sorular sorularak röportaj yapılmış, saha denetimi yapılmış, çalışanlar aktif olarak çalışmasını gerçekleştirirken gerekli izlemeler yapılmış ve kendileriyle birebir görüşülmüş, notlar alınmıştır. Bu gözlemler ve incelemeler doğrultusunda; mermer işleme tesislerinde HTEA yöntemiyle yapılan risk değerlendirmesi ile tehlikelerin boyutları, yol açabileceği olası riskler göz önünde bulundurulmuş ve plaka üretim hattının her aşamasında risk değerlendirmeleri yapılmıştır.

Sonuç olarak; makine kaynaklı risklerde, iş sağlığı ve güvenliği açısından güvenlik tedbirlerinin alınması, emniyet sistemleri ve makinelerin geliştirilmesi, yetkili operatörlerle iş yapılması gerekmektedir. Malzeme kaynaklı risklerde, muayene yöntemlerinin geliştirilmesi ve sahadaki toz, malzeme depolanması, acil toplanma yerleri ve yangın riskleri olan yerlerde düzenleme yapılması, tedbirler alınması ve gerekli eğitimlerin verilerek acil durum ekiplerinin kurulması gerekmektedir. Elektrik ve su ortamından kaynaklanan riskler çok yüksek risk seviyesine sahip olduğundan ölümlü iş kazasına sebebiyet verebilir. Bu sahalarda kaynaktan müdahale, emniyet ve güvenlik sistemleri kurulumu ile KKD donanımlarının kullanılması gerekmektedir. Bu bağlamda mermer işleme tesisleri için HTEA risk analizi teknikleri uygulanarak önleyici bir yaklaşımla riskler meydana gelmeden önce en başta kaynaktan müdahale edilmesi gerektiği ve en hızlı şekilde önlem alınması gerektiği yapılan risk değerlendirmesi ile anlaşılmıştır. Mermer işleme tesislerinde devam eden mermer yarı mamul üretimi yolculuğunda çalışanların maruz kaldığı risklerin boyutu gözlemlenerek bunun sonucunda önlem alınmada geç kalınması durumunda maddi manevi zararın büyük boyutlu kayıplara neden olacağı tespit edilmiştir. Plaka üretim hattının her aşamasında ekipman maliyeti oldukça yüksektir. Blok kesim kısmında enerji tüketimi ve ekipman yatırımı daha yüksekken, plaka dolgu kısmında malzeme maliyeti ve plaka cilalamada işçilik maliyeti yüksek olmaktadır. Mermer plaka üretim hattında maliyetleri düşürmek için her üretim hattı aşamasına göre stratejiler belirlenmiştir. Blok ve muayene hattına otomasyon sistemlerinin geliştirilmesi işçilik maliyetlerinin azaltmış olur. Blok kesim ve plaka üretim hattında yeni nesil katarak veya kesim makineleri temin edilerek enerji tasarrufu sağlanarak enerji tüketimi düşürülebilmektedir. Plaka muayene hattında standartlaştırmayı artırmak ve işçilik maliyetini arttırmak için yapay zekâ destekli görüntüleme cihazları kullanılması gerekmektedir. Plaka dolgu hattı reçine tüketimini azaltma toplu işleme gibi durumların sağlanması gerekmektedir. Plaka cilalama hattı sürecin optimizasyonu ile enerji kaybını azaltılması, su tüketimini azaltmak için ise filtreleme ve suyun geri dönüştürülmesi sistemlerinin kurulması gerekmektedir. Mermer işleme tesislerinde enerji yönetimini takip edecek sistemler kurulması, malzeme ve yedek parça alımlarında toplu siparişlerin verilmesi, devlet teşviklerindeki desteklerin araştırılması önerilir. Bu kapsamda genel iş güvenliği tüm personele 2 saat, makine kullanım ve acil durumlar makine operatörlerine 3 saat, kimyasal güvenlik dolgu hattı çalışanlarına 2 saat, kaldırma ve taşıma teknikleri, depo ve taşıma personeline 1,5 saat, kişisel koruyucu donanım tüm personele 1 saat olarak iş güvenliği eğitim planlanması yapılması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

GÜNAYDIN MERMER ve GRANİT Atölyesi İşvereni Sayın Fazıl GÜNAYDIN Bey'e çalışmamıza gösterdiğiniz yardım ve destekten dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akın, H. B. (2005). Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) ve bir uygulama. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 271–278. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1532507>

Aslantaş, S., Erpek, Y. İ. (2024). Farklı risk analiz metotlarının karşılaştırılması: Kaynak atölyesi uygulama örneği. *Uluslararası Hukuk ve Sosyal Bilim Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 39–71.

Çetin, T. (2003). Türkiye mermer potansiyeli, üretimi ve ihracatı. *Marble potential, production and export of Turkey*, Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, 23(3), 243–256.

Çınar, İ., Şensöğüt, C. (2016, Ekim). Türkiye mermer ocaklarında risk değerlendirmesi ve uygulama örnekleri. *Risk assessment of marble quarries in Turkey and case studies*, 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, Kütahya, Türkiye.

Demir, E. (2017). Bir Mermer Ocağından Çıkarılan Blok Mermer ile Mermer Fabrikasından Çıkan Ürünlerin Maliyet Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi.

Demir Şahin, D., Eker, H. (2024). Bir mermer ocağındaki tehlike ve risklerin değerlendirilmesi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(6), 1294–1301.

Erten, B., Utlu, Z. (2017). İlaç lojistik sektöründe risk analizi yapılarak 5x5 Matris, Fine Kinney ve FMEA yöntemleri ile risk değerlendirmelerinin karşılaştırılması: bir firma örneği. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 12(48), 1–14.

Göztepe, C., Erdim, B., Akyıldız, S. (2013). Mermer ocağı ve mermer fabrikasında risk değerlendirmesi ve İSİG uygunsuzluk izleme sistemi. *İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Yerel Sempozyumu ve Sergisi*.

Karabay, B. (2020). Mermer Sektöründe Üretim Kayıplarının Maliyetlere Etkisi: Van İlinde Bir Uygulama. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Önder, S., Önder, M., Çiçek, F. (2022). Hata türü ve etkileri analizi yöntemi ile bir mermer fabrikasında risk değerlendirmesi. *Risk assessment in a marble factory with the method of Failure Mode and Effects Analysis*, *Yeraltı Kaynakları Dergisi (Journal of Underground Resources)*, 11(22), 1–11.

Özfırat, P. M. (2014). Bulanık önceliklendirme metodu ve hata türü ve etkileri analizini birleştiren yeni bir risk analizi yöntemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 755–768.

Özfırat, M. K., & Mızrak Özfırat, P. (2021). Yangın safhalarının HTEA risk analizi ile incelenmesi. *Examination of fire stages with FMEA risk analysis*. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 5(1), 37–44. <https://doi.org/10.33720/kisgd.823832>

Sırakaya, L., & Kasap, Y. (2019). Bir mermer işletmesinde Hata Türü ve Etkileri Analizi uygulaması. *Application of Failure Mode and Effects Analysis in marble quarries*, *MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 1(28), 1–10.

Şaşal, A. (2024). Hata türü ve etkileri analizi HTEA (Failure Mode and Effect Analysis) nedir? Sektöre katkıları nelerdir? Soğutma Dünyası, 92.

Tellioğlu, T., Karabay, B. (2021). Mermer Sektöründe Safha Maliyet Sistemi Fire Hesaplamaları ve Bir Uygulama Örneği. Denetim ve Güvence Hizmetleri Dergisi, 1(1).

U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration, Directorate of Technical Support and Emergency Management. (2005). Hazards of transporting, unloading, storing and handling granite, marble and stone slabs. OSHA.gov.

MERMER BLOK KESİMİNDE ELMAS TEL KOPMALARININ NEDENLERİ VE ÖNLEYİCİ TEDBİRLER

CAUSES OF DIAMOND WIRE BREAKAGE IN MARBLE BLOCK CUTTING AND PREVENTIVE MEASURES

O. Öz ^{1*}, Ö. Zontur ², E. Özkan ¹

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

² Pera İş Sağlığı ve Güvenliği Mühendislik Ltd. Şti.

*Sorumlu yazar: oguzhanoz@aku.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, mermer ocaklarında blok üretiminde kullanılan elmas tellerin kopma nedenleri ve bu durumun önlenmesine yönelik alınabilecek önlemler incelenmiştir. Elmas tel kopmaları mermer ocaklarında en çok karşılaşılan ve ciddi iş kazalarına yol açan sorunların başında gelmektedir. Bu durum, hem iş güvenliği açısından risk oluşturmakta hem de üretim süreçlerinde aksamalara neden olmaktadır. Çalışmada elmas tel kopmalarına sebep olan; yetersiz bakım, aşırı kullanım, malzeme yorgunluğu, kontrol-denetim eksikliği, çalışanların eğitim ve tecrübe eksikliği gibi unsurlar ele alınmıştır. Elmas tel kopmalarının önlenmesi veya en aza indirilmesi için alınması gereken tedbirler ile kopma durumunda meydana gelen zararların en aza indirilmesine yönelik güvenlik tedbirleri açıklanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Mermer ocakları, iş kazası, iş sağlığı ve güvenliği, elmas tel kopması

ABSTRACT

In this study, the causes of the breakage of diamond wires used in the production of portable size blocks in marble quarries and the measures that can be taken to prevent this situation are examined. Diamond wire breaks are one of the most common problems in marble quarries and cause serious occupational accidents. This situation both poses a risk in terms of occupational safety and causes disruptions in production processes. In this study, factors such as inadequate maintenance, overuse, material fatigue, lack of control and supervision, lack of training and experience of employees are discussed. Measures to be taken to prevent or minimize diamond wire breaks and safety measures to minimize damages in case of breakage are explained.

Keywords: Marble quarries, work accidents, occupational health and safety, wire breakages

GİRİŞ

Elmas tel kesme, doğaltaş kesimindeki verimliliği sayesinde uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak malzeme israfını azaltma ve kesim verimliliğini artırma gibi avantajlarına rağmen kapsamlı değerlendirilmesi gereken belirli güvenlik riskleri ve zorluklar taşımaktadır. Elmas tel kesme ile ilişkili en önemli sorunlardan biri elmas tellerin aşınması ve kopmasıdır. Elmas tel, gerilim, tork ve eğilme momentlerine maruz kalır, bu da malzeme yorulmasına ve telin sonunda kopmasına yol açar. Kopmaların çoğunlukla telin en yüksek gerilim yoğunluklarının olduğu bölgelerde, genellikle malzemede bulunan kusurlar veya operasyon sırasında yanlış gerilim ayarları nedeniyle meydana gelmektedir (Huang and Xu, 2006; Kumar et al., 2016; Gomes et al., 2021,

Korman et al., 2023). Kesim hızı, tel gerilimi gibi kontrol edilebilir parametreler performansı optimize etmek ve riskleri azaltmak için kritik öneme sahiptir. Ayrıca yanlış hesaplanan operasyonel parametreler nedeniyle kesme kuvvetlerinin tasarım sınırlarını aşması durumunda elmas tellerin dayanıklılığını ve ömrünü etkileyen kritik öneme sahiptir (Meng et al., 2006; Kumar et al., 2016, Denkena et al., 2021; Rasti et al., 2021;).

Bir diğer önemli risk faktörü, kesim işlemiyle ilişkili çevresel etkidir. Elmas tel kesme işleminde, operatörlerin güvenliği ve sağlığı açısından çeşitli riskleri de bulunmaktadır. Kesim işlemi genellikle yüksek hızlarda (30 m/s'ye kadar) gerçekleştirilir. Telin dolaşması veya işlem sırasında tellerin kopması durumunda, büyük bir kuvvetle etrafa savrulabilir ve ciddi yaralanmalara neden olabilir (Denkena et al., 2021). Elmas tel kesme ortamlarında çalışanların korunması için koruyucu önlemler şarttır. Çalışma sırasında erişimi önlemek için acil durdurma düğmeleri aktif çalışır durumda olmalıdır. Tel kopması veya parçacık maruziyetinden kaynaklanan yaralanmalara karşı koruma sağlamak için kesim alanlarının etrafında koruyucular gibi güvenlik önlemlerini içermelidir (Zhang et al., 2011, Xiao et al., 2012).

Kesimi sırasında oluşan bazı doğaltaşlardan çıkan toz ve parçacıkların solunması durumunda vücuda zararlı olabilmektedir. (Shetty et al., 2020; Denkena et al., 2021). Kesme parametrelerinin kontrol edilmesi, etkili toz kontrol önlemlerinin kullanılması, çalışanlara kişisel koruyucu ekipmanların (KKD) kullanılması bu riskleri önemli ölçüde azaltacaktır (Xiao et al., 2012; Costa et al., 2020). Çalışanların elmas tel kesme süreciyle ilgili riskleri tanımlama ve güvenli çalışma prosedürleri konusunda iyi bir şekilde eğitilmeleri, iş yeri güvenliğini sürdürmek için hayati öneme sahiptir (Rasti et al., 2021).

Sağlam izleme sistemlerinin uygulanması, potansiyel arızaların meydana gelmeden önce tespit edilmesine ve operatörlerin önleyici tedbirler almasına olanak sağlayabilir. Tel aşınmasının gerçek zamanlı ölçülmesi sonucu sağlanan verilerle güvenli bir kesme işlemi gerçekleştirilebilir ve önleyici bakım yapılması sağlanabilir (Li et al., 2011). Ancak, elmas tel kesme makinelerinde kasnakların ve elmas tellerin düzenli kontrolü için bir sistem kurulması iş kazalarının önlenmesinde etkili olacaktır.

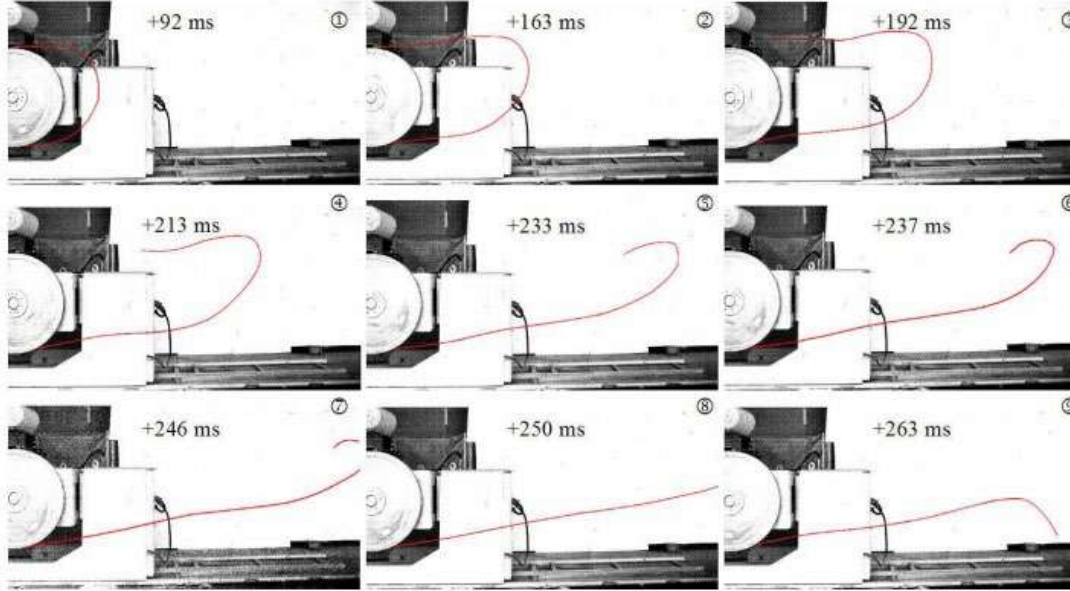
Sonuç olarak, elmas tel kesme, verimli malzeme işleme konusunda birçok avantaj sunsa da elmas telin aşınması ve kopması, operasyonel parametrelerin yönetimi, çevresel etkiler ve güvenlik sorunları gibi önemli risklerin titizlikle ele alınması gerekmektedir. Tel kazalarının mekanik yönlerini anlamak, toz ve fiziksel yaralanma ile ilgili tehlikeleri tanımak ve sıkı koruyucu önlemler uygulamak suretiyle, operatörler elmas tel kesme uygulamalarında hem güvenliği hem de performansı önemli ölçüde artırabilir.

ELMAS TEL KOPMASI SONUCU OLUŞAN RİSKLER

Elmas tel kesme makinelerinde telin kopması durumunda, elmas boncuklar veya halatın parçaları vücuda çarparak ciddi yaralanmalara veya ölümlere neden olabilir. Genellikle çalışma sırasında operatörler tarafından 1500 devir/dakika ve 45 kW ile çalışan elmas tel kesme makinelerinde ilk hareketin operatör tarafından verilmesi nedeniyle ani yüklenme, dengesiz gerilme veya yanlış başlatma sonucu elmas telde kopma meydana gelmektedir. Ayrıca halatın kopma yerine ve elmas boncuğun fırlama şekline göre hızı ve yüksekliği değişmektedir. 18 kW olan sayalama makinelerinde çalışanların el ile kasnağa ilk hız için çekme kuvveti uygulanmadığından halatın yerinden çıkması sonucu ölüm veya yaralanma riskleri yapılan saha çalışmalarında karşılaşılmamıştır.

Tantussi vd., (2008) yapmış oldukları çalışmada; korumalar olmadan tel kopmasından hemen sonra, üst segmentteki gerilim sıfıra düşer ve tel hızla hareket ederek kinetik enerjinin potansiyel elastik enerjiden yaklaşık yirmi kat daha fazla olduğunu görülmüştür. Telin kasnaktan ayrılması, sürtünmeyi ortadan kaldırarak telin daha serbest hareket etmesine neden olup telin sınırlı esnekliği nedeniyle U şeklinde bir eğri oluşturmuştur. Oluşan eğri U şeklinin en düşük noktası etrafında hızla dönerek tel

tamamen gerilmiştir. Bu sırada, serbest uca yakın elemanlar yüksek hızda fırlatılır ve kırbaç etkisi meydana gelir. Korumalar olmadan elmas tel elemanların (elmas boncuklar, yaylar ve/veya ara parçalar) kopma hızı 500 m/s'nin üzerinde tahmin edilmiştir. Tüm süreç yaklaşık 0,3 saniye sürerken, kırbaç etkisi birkaç milisaniye içinde gerçekleşmiştir (Resim 1).



Resim 1. Korumasız elmas telin blok ile tahrik kasnağı arasındaki yolunu ve hızını gösteren görsel (Tantussi et al., 2008)

Özellikle dikey kesimlerde, elmas boncukların baş, göğüs, omuz ve omurilik gibi (Resim 2) hayati bölgelere saplanması tehlikeli sonuçlar meydana gelebilirken, yatay kesimlerde ise, boncuklar daha çok ayak ve bacak yaralanmalarına sebep olabilmektedir. Bununla birlikte boncuğun sekmesi sonucu vücudun baş kısmında gelen yaralanmalar ve ölümle sonuçlanan kazalarda gözlemlenmiştir. Ayrıca, elmas telin kopması sonucu oluşan yaralanmalar tetanos gibi enfeksiyon riski de oluşmaktadır. Sosyal Güvenlik Kurumundan alınan verilerle mermer ocaklarında gerçekleşen kazalar incelendiğinde 2014-2024 yılları arasında toplamda blok üretimi işlemi sırasında 1246 adet kaza meydana geldiği, bu kazaların ise 403 adetinin elmas tel kopmalarından kaynaklandığı görülmüştür.



Resim 2. Omuriliğe Saplanan Elmas Boncuk Yaralanması (Kişisel Arşiv)

Çizelge 1. Elmas tel dayanım karşılaştırması.

Halat No	Halat şartları	Kökeni	Çekme Dayanımı (kg)
1	Yeni	Hindistan	1720
2	Yeni	Hindistan	1620
6	Yeni	İtalya	1940
10	Kullanımının sonunda	İtalya	2150
12	Kullanımının ortasında	İtalya	1690
13	Yeni	İtalya	1650
Halat No	Halat ekleme şartları	Kökeni	Çekme kuvveti (kg)
3	Yeni ekleme	Hindistan	210
4	Yeni ekleme	Hindistan	260
5	Neredeyse yeni ekleme	Hindistan	400
7	Demir ekleme ömrünün sonu	İtalya	1130
8	Yeni ekleme	İtalya	1020
9	Bakır ekleme ömrünün sonunda	İtalya	1270
11	Bakır ekleme ömrünün ortasında	İtalya	1220
14	Yeni ekleme	İtalya	900

Kullanılan elmas tellerin performansları karşılaştırıldığında; İtalya'da (Carrara) kullanılan elmas telin çekme mukavemetinin Hindistan'dakinden (Ambaji) önemli ölçüde yüksek olduğu Çizelge 1'de görülmektedir. Bununla birlikte, Hindistan'da kullanılan kaplin, hem boyut (ortalama 2,3 cm uzunluğunda, İtalya'da 3 cm'ye kadar) hem de presleme türü açısından İtalya'dan farklı olmaktadır. Hint ocağında hidrolik presler kullanılırken, İtalya'da en yaygın olarak kullanılan manuel preslerdir. Yapılan testler, eklemi merkezi konumda olan elmas tel durumunda en yaygın kırılmanın, eklem kendisinde veya doğrudan çevresindeki tellerin kopması yoluyla veya çekme nedeniyle meydana geldiğini göstermektedir. Hint telleri durumunda, kırılma her zaman çekme nedeniyle olmuştur, bu da bağlantı tipinin yüksek çekme yüklerine dayanmaya uygun olmadığını göstermiştir. Aslında, ortalama olarak, 1160'a karşı 290 kg'lık yük değerleri için elmas tel kopma elde edilmiştir. Bu durum sadece kesilecek malzemenin türünden değil, aynı zamanda özellikle birleştirilmiş tellerde kabloların yapısal özelliklerinden de kaynaklanmıştır (Cardu et al., 2014).

RİSKLERİ ÖNLEMEDE KULLANILAN ÖNLEMLER

Elmas telli kesme makineleriyle mermer üretimi, yüksek hız ve güç kullanımı nedeniyle dikkatli bir risk yönetimi gerektirir. İlk olarak, telin her kullanım öncesi kontrol edilmesi ve belirli bir kullanımdan sonra düzenli olarak yenilenmesi gerekir. Bu, tel kopmalarını ve bunların yol açabileceği tehlikeli durumları önlemeye yardımcı olur. Elmas tellere su da kritik bir faktördür; suyun uygun şekilde ve yeterli miktarda verilmesi, kesilen parçaların uzaklaştırılmasını, soğumanın sağlanmasını ve tozun önlenmesini sağlar. Ancak, telin suyun içinde olması boncukların kesim kuvvetini azaltarak yükün halata binmesine ve telin kopma riskinin artmasına neden olabilir.

Elmaslı boncukların kesim yönleri her zaman aynı olmalıdır ve elmas teller kısaltıldığında veya eklendiğinde mümkünse aynı tele ait parçalar birlikte kullanılmalıdır. Elmas telin iki ucu birleştirilirken ekler iki uca eşit olarak verilmeli, ekler sıkılırken fazla sıkılması durumunda teli keseceği, az sıkıldığında ise teli tutmayacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Çamur nedeniyle yayların esnekliği kaybolabileceğinden, çamurlu teller kullanımdan önce temizlenmelidir (Resim 3).



Resim 3. Mermer Ocağında Çalışma Ortamı ve Güvenlik Riskleri

Kesim işlemi, elmas boncukların kayacı aşındırması ve elmas telin mermer içinde ilerlemesi ile gerçekleşir. Kesim işlemi sırasında tel kesme makinasının geriye gitme hızı (öteleme) ile elmaslı telin mermer içinde ilerleme hızı aynı olmalıdır. Öteleme hızı düşük olduğunda kesme verimi düşerken, fazla olduğunda telde aşırı gerilme ve kopmaya yol açabilecek kuvvetli salınımlar (rezonans) meydana gelebilir. Bu durumda makinenin öteleme hareketi durdurulmalı ve salınım sona erdiğinde hız yeniden ayarlanmalıdır. Yatay kesimlerde telin giriş ve çıkış delikleri önüne yardımcı ekipmanlar (makaralar) konulması, telin ağırlığından dolayı oluşabilecek dalgalanmaları en aza indirir (Resim 4). Kesme işleminin bitimine doğru telin dönüş açısı küçülür, özgül basıncı ve boncuklara binen yük artar; bu durumda tel gerginliği düşük tutulmalıdır.



Resim 4. Mermer bloklarının hassas kesiminde modern tel ve makara sistemleri

Dikey kesimlerde tel kesme makinası durdurulmadan önce birkaç dakika boyunca gerdirilmeden çalıştırılıp elmas telin mermer içindeki yuvasının genişletilmesi sağlanmalı ve bol su verilmelidir. Yatay kesimlerde de benzer şekilde işlem yapılmalıdır (Resim 5).



Resim 5. Tel yolunun açılması

Kesilecek yüzeyin büyüklüğü uygun kesim şekli kullanılarak kontrol edilmelidir. Her kesim işleminden önce telin durumu kontrol edilmelidir. Kesim süresince tel kopmaları, çelik telde aşınma yoksa bağlantı elemanlarının kopmasından kaynaklanır. Kopan telden çıkan elmas boncuklar ocak içinde tabancadan çıkan kurşunlar gibi hareket edebilir. Bu nedenle, dikey kesimlerde elmas tel hizasında kimse bulunmamalı ve operatör kumanda tablosunu güvenli bir mesafede konumlandırmalıdır. Yatay kesimlerde ise elmaslı telin yüksekliğinde kimse bulunmamalı ve operatör kumanda panosu daha yüksek bir seviyede yerleştirilmelidir. Makineler çalışırken arkasından veya yakınından geçilmemelidir. Koruyucu panolar düzenli ve doğru şekilde kullanılmalıdır (Resim 6). Bu önlemler, iş güvenliğini artırarak kazaların önlenmesine yardımcı olur.



Resim 6. Elmas boncuğun koruyucu panoya saplandığı görüntü (sol), makine arkası koruyucu pano yerleşimi (sağ)

SONUÇLAR

Elmas tel kesme yöntemi, sağladığı verimlilikle doğaltaş işlemede vazgeçilmez bir teknoloji olmaya devam etmektedir. Ancak, bu çalışmada detaylandırılan tel kopması, fırlayan parçacıklar, toz maruziyeti ve operasyonel hatalardan kaynaklanan riskler göz ardı edilemez. Bu risklerin minimize edilmesi; doğru malzeme seçimi (tel kalitesi, birleştirme elemanları), operasyonel parametrelerin hassas kontrolü, etkin koruyucu önlemlerin (fiziksel bariyerler, KKD) eksiksiz uygulanması, sürekli ve kapsamlı operatör eğitimi, teknolojik izleme sistemlerinin entegrasyonu gibi çok yönlü bir yaklaşımı gerektirmektedir.

Elmas tel kesme, verimlilik ve malzeme israfının azaltılması açısından sektörde yaygın olarak tercih edilen bir yöntem olmakla birlikte; güvenlik, ekipman ömrü ve çevresel etkiler bakımından dikkatli yönetilmesi gereken önemli riskler barındırmaktadır. İşletmelerin, operasyonel verimlilik hedeflerinin yanı sıra iş sağlığı ve güvenliğini en üst düzeyde tutacak önlemleri alması hem yasal bir zorunluluk hem de sürdürülebilir bir üretim anlayışının temelidir. Bu alanda yapılacak sürekli iyileştirmeler ve teknolojik yatırımlar, elmas tel kesme operasyonlarının daha güvenli ve verimli hale gelmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Cardu, M., Giraudi, A., Murthy, V. M. S. R., Choudhary, B. S., Shukla, A. K. (2014). Rock Characterization and Wire Performances for Dimension Stone Cutting by Diamond Wire Saw. MT Bilimsel, 3(5), 25–37.

Costa, E., Xavier, F., Knoblauch, R., Binder, C., Weingaertner, W. (2020). Effect of cutting parameters on surface integrity of monocrystalline silicon sawn with an endless diamond wire saw. Solar Energy, 207, 640–650. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.018>

Denkena, B., Bergmann, B., Rahner, B. (2021). A novel tool monitoring approach for diamond wire sawing. Production Engineering, 16(4), 561–568. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01087-7>

Gomes, D., Araújo, A., Marquês, R., Patrício, J., Lopez, V., Santos, R. (2021). Damage and failure evaluation of diamond wire for multi-wire sawing of hard stone blocks through modelling and numerical simulation. *Matec Web of Conferences*, 349, 04001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134904001>

Huang, G., Xu, X. (2006). Analysis of the breakage of diamond wire saws in sawing of stone. *Key Engineering Materials*, 304–305, 123–126. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.304-305.123>

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š. (2023). Energy consumption and wear rate of diamond beads during operation of a diamond wire saw. *E-Zbornik*, 13(SI), 36–47. <https://doi.org/10.47960/2232-9080.2023.si.13.36>

Kumar, A., Kaminski, S., Melkote, S., Arcona, C. (2016). Effect of wear of diamond wire on surface morphology, roughness and subsurface damage of silicon wafers. *Wear*, 364–365, 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.07.009>

Li, Y., Huang, H., Xu, X. (2011). Development evaluation of mechanical properties of brazed diamond wire. *Solid State Phenomena*, 175, 294–299. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.175.294>

Meng, J., Li, J., Ge, P., Zhou, R. (2006). Research on endless wire saw cutting of Al₂O₃/TiC ceramics. *Key Engineering Materials*, 315–316, 571–574. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.315-316.571>

Rasti, A., Adarmanabadi, H., Sahlabadi, M. (2021). Effects of controllable and uncontrollable parameters on diamond wire cutting performance using statistical analysis: a case study. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 36(4), 21–32. <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.4.3>

Shetty, K., Kaushal, Y., Chikkan, N., Murthy, D., Kumar, C. (2020). Challenges in processing diamond wire cut and black silicon wafers in large-scale manufacturing of high efficiency solar cells. *Journal of Power and Energy Engineering*, 08(02), 65–77. <https://doi.org/10.4236/jpee.2020.82003>

Tantussi, G., Lanzetta, M., Gentile, S., Depperu, G. (2008). Diamond wire cutting: failure modes, risks for safety and workers' protection. *Proceedings of the second International Congress on Dimension Stones-ICDS*.

Xiao, B., Li, S., Zhang, F., Wang, B., Li, S. (2012). Experimental investigation on cutting aluminum alloy thick plate with brazed diamond wire saw. *Advanced Materials Research*, 426, 218–222. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.426.218>

Zhang, L., Wang, J., Yang, Y., Wang, C. (2011). Research on the counterweight in the process of diamond wire saw cutting polysilicon. *Advanced Materials Research*, 418–420, 1048–1055. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.418-420.1048>

DOĞALTAŞ MADENCİLİĞİNDE İŞ KAZALARI VE İŞ GÜVENLİĞİNE BİR BAKIŞ

AN OVERVIEW OF WORK ACCIDENTS AND OCCUPATIONAL SAFETY IN NATURAL STONE MINING

M. Çebi ^{1*}, M. Geniş ²

¹ Maden Mühendisi, A Sınıfı İş Güvenliği Uzmanı, Zonguldak

(*Sorumlu yazar: mehmetcebi@gmail.com)

² Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZET

Bu çalışmada, açık işletme yöntemiyle faaliyet gösteren mermer ocakları ile mermer kesim işleminin gerçekleştirildiği fabrika ve atölyelerde karşılaşılan iş kazaları ve iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamaları incelenmiştir. Türkiye’de doğaltaş sektöründe binlerce işletmenin faaliyet gösterdiği ve bu alanda yaklaşık 300.000 kişinin istihdam edildiği göz önüne alındığında, iş kazalarının önlenmesine yönelik tedbirlerin hayati öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Bildiri kapsamında, mermer bloklarının üretimi sırasında kullanılan elmas tel kesme makineleri, sayalama makineleri, yıkım ve taşıma işlemlerinde kullanılan ekipmanlar (riper, pamter, hava yastığı, hidrolik krika) gibi iş ekipmanlarının kullanımında ortaya çıkan riskler detaylandırılmış ve bu süreçlerde meydana gelen ölümlü ve yaralanmalı iş kazalarına değinilmiştir. Özellikle elmas telin kopması sonucu oluşan tehlikeler üzerinde durulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Mermer, iş güvenliği, elmas tel kesme makinası

ABSTRACT

This study examines occupational accidents and occupational health and safety (OHS) practices in marble quarries operated by open-pit mining methods, as well as in factories and workshops where marble cutting processes are carried out. Considering that thousands of enterprises operate in Türkiye’s natural stone sector and approximately 300,000 people are employed, the importance of taking preventive safety measures is emphasized. The paper details the risks associated with the use of equipment such as diamond wire saw machines, counting machines, and machinery used for block demolition and handling (e.g., rippers, pamters, air cushions, and hydraulic jack). It highlights fatal and non-fatal occupational accidents, particularly those resulting from the breakage of diamond wires.

Keywords: Marble, occupational safety, diamond wire saw machines

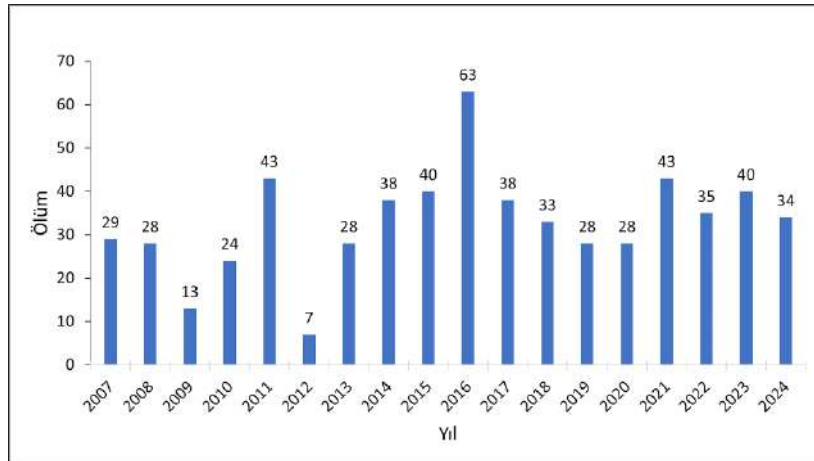
1. GİRİŞ

Açık işletme yöntemiyle çalışılan mermer ocaklarındaki blok mermer üretimi ve sonrasındaki mermer kesme işleminin yapıldığı fabrika ve atölyelerde yapılan çalışmalar hem insan gücüne dayalı hem de elektrikli ya da mekanik ekipman ve teçhizatların kullanıldığı ağır işçilik koşullarında gerçekleştirilmektedir. Sektörde yaklaşık 1500 adet doğaltaş ocağı, fabrika ölçeğinde faaliyet gösteren 2000 kadar tesis, orta ve küçük ölçekli 9000 atölye faaliyet göstermektedir. İstihdam edilen kişi sayısı 300 000 civarındadır. Türkiye’nin birçok bölgesinde doğaltaş yatakları bulunmaktadır. Üretimin en fazla olduğu iller; Balıkesir, Afyon, Bilecik, Denizli ve Muğla’dır. Bu bölgelerdeki üretim, tüm üretimin %65’ini oluşturmaktadır. Ekonomik mermer yataklarının bulunduğu diğer iller ise; Bursa, Kırşehir, Çankırı, Çorum, Kastamonu, Niğde, Kayseri, Artvin, Bitlis, Erzincan, Bayburt, Sivas, Tokat, Denizli,

Kütahya, Eskişehir, Diyarbakır, Elazığ, Çanakkale, Konya, Burdur, Antalya, Isparta, Mersin, İstanbul ve Manisa'dır. Üretimin tamamına yakın kısmı özel sektör tarafından yapılmaktadır. Türkiye'de yıllık doğaltaş üretimi 11,5 milyon ton civarında olup işleme tesislerinin toplam plaka üretim kapasitesi 6.5 milyon m2 civarındadır (TCTB, 2021).

Maden Yönetmeliğinin 5. maddesindeki mermer madenleri, madencilik gruplamasında (2) II. Grup madenler sınıfına girmekte olup Yönetmeliğin "b" maddesinde; Mermer, traverten, oniks mermeri, granit, andezit, bazalt, diyabaz gibi blok olarak üretilen taşların, boyutlandırılarak geometrik şekil verilen taşlar ile kayraktaşı, arduvaz, tuf, ignimbirit ve benzeri dekoratif amaçla kullanılan doğaltaşlar" olduğu belirtilmektedir.

Blok mermer üretiminin büyük bir kısmı elmas telli blok kesme makineleri ile yapılmakta olup blokların ana kütleden yatay ve dikey kesilmesi ve devrilen blokların daha küçük bloklar haline getirilmesinde iş güvenliği önlemlerinin dikkate alınmadığı durumlarda birçok yaralanmalı ve ölümlü iş kazaları meydana geldiği görülmektedir. Sosyal Sigortalar Kurumu tarafından her yıl yayımlanan "Diğer Madencilik ve Taşocakçılığı" sınıfında iş kazası ve meslek hastalığı sonucu ölen işçi sayıları 2007-2024 yılları için Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde sektörde her yıl ortalama 30-40 arasında ölüm olduğu ve yıllar içerisinde azalış görülmediği anlaşılmaktadır. Bu sebeple işletmelerde yapılan üretim çalışmalarının daha güvenli hale getirilmesi ve iş kazalarının meydana gelmesinin önlenmesi için tehlikeli durum ve davranışlardan kaçınılması ve işverenlerin de yasa ve yönetmeliklere uygun talimatlar vermeleri ve tüm süreçlerin hassasiyetle kontrolü büyük önem taşımaktadır.



Şekil 1. Diğer Madencilik ve Taşocakçılığı sınıfında iş kazası ve meslek hastalığı sonucu ölen işçi sayısı (2007-2024) (SGK, 2025)

Açık işletmelerde sayalama işlemi sırasında da birçok kaza olayı meydana gelmektedir. Bu çalışmalarda, telin dönme yönünde koparak elmas boncukların ya da soketlerin bir ok gibi hareket ederek çalışanlara isabet ederek saplanması ya da vücutlarını delip geçerek ölümlü sonuçlanması sıkça olmaktadır. Tehlikeli durum ve davranışların önlenmesi için işveren tarafından mermer işletmelerinde potansiyel tehlike kaynaklarının tespit edilerek detaylı bir risk analizinin yapılması, çalışma talimatlarının hazırlanması, bu talimatların çalışan işçilere net bir şekilde öğretilerek benimsetilmesi yapılan işlerin yakından takip edilmesi ve uygulamada bu hususların dikkate alınması gerekmektedir. Bu bildiride mermer ocaklarında ve mermer kesim işleminin gerçekleştirildiği fabrika ve atölyelerde yapılan üretim çalışmalarda meydana gelen iş kazaları ve alınması gereken önlemlerden bahsedilecektir. Bununla birlikte, kollu zincirli mermer kesme makinalarına, üretimde ve iş kazalarındaki payında etkisinin az olması nedeniyle (Çelik vd., 2017) bu bildiride yer verilmemiştir.

2. İŞYERİ ORGANİZASYONU

Maden Kanunu çerçevesinde mermer madenciliği iş organizasyonunda sahada tecrübeli bir İşletme Müdürü, Daimi Nezaretçi ve İSG Uzmanı ve yardımcı personel bulunmalıdır. İşletme müdürünün bir maden mühendisi olması ve sahada yetmiş yeterli iş tecrübesine sahip olması gerekmektedir. Buna rağmen bazı işletmelerin teknik eleman vasfına sahip olmayan kişileri (usta, ustabaşı, ocak çavuşu, muhasebe müdürü vb.) işletme müdürü olarak görevlendirdikleri, madencilik eğitimi olmayan bu kişilerin iş güvenliği kurallarını hafife aldıkları, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (RG, 2012) ile Maden Kanunu ve yönetmeliklerinin gereklerini yerine getirmedikleri, bu durumun ise iş kazalarının artmasına sebep olduğu görülmektedir. Maden İşletmelerinde uyulması gereken Kanun ve Yönetmeliklere bakıldığında;

3213 sayılı Maden Kanunu (RG, 1985)'nda maden işletmelerinde daimi nezaretçinin istihdamı gerektiği belirtilmektedir:

“MADDE 123 – (1) Kaynak tuzlaları hariç olmak üzere maden ruhsat sahalarındaki işletme 3213 sayılı Maden Kanunu (RG, 1985)'nda maden işletmelerinde daimi nezaretçinin istihdamı gerektiği belirtilmektedir:

“**MADDE 123** – (1) Kaynak tuzlaları hariç olmak üzere maden ruhsat sahalarındaki işletme faaliyetleri, maden mühendisi nezaretinde yapılır. Daimi nezaretçisi olmayan maden işletme ruhsat ve hammadde üretim izin sahalarında, maden işletme faaliyeti yapılamaz.” denilmekte olup 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (RG, 2012)'nun 6. Maddesinde ise çok tehlikeli iş yerlerinde İSG Uzmanı ataması yapılması gerektiği belirtilmektedir:

“**MADDE 6** – (1) Mesleki risklerin önlenmesi ve bu risklerden korunulmasına yönelik çalışmaları da kapsayacak, iş sağlığı ve güvenliği hizmetlerinin sunulması için işveren;

a) Çalışanları arasından iş güvenliği uzmanı, işyeri hekimi ve diğer sağlık personeli görevlendirir. Çalışanları arasında belirlenen niteliklere sahip personel bulunmaması hâlinde, bu hizmetin tamamını veya bir kısmını ortak sağlık ve güvenlik birimlerinden hizmet alarak yerine getirebilir. Ancak belirlenen niteliklere ve gerekli belgeye sahip olması hâlinde, tehlike sınıfı ve çalışan sayısı dikkate alınarak bu hizmetin yerine getirilmesini kendisi üstlenebilir.”

Ayrıca çalışanların yükümlülükleri olarak Madde 19 da:

“**MADDE 19** – (1) Çalışanlar, iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili aldıkları eğitim ve işverenin bu konudaki talimatları doğrultusunda, kendilerinin ve hareketlerinden veya yaptıkları işten etkilenen diğer çalışanların sağlık ve güvenliklerini tehlikeye düşürmemekle yükümlüdür.

(2) Çalışanların, işveren tarafından verilen eğitim ve talimatlar doğrultusunda yükümlülükleri şunlardır:

a) İşyerindeki makine, cihaz, araç, gereç, tehlikeli madde, taşıma ekipmanı ve diğer üretim araçlarını kurallara uygun şekilde kullanmak, bunların güvenlik donanımlarını doğru olarak kullanmak, keyfi olarak çıkarmamak ve değiştirmemek.

b) Kendilerine sağlanan kişisel koruyucu donanımı doğru kullanmak ve korumak.” şeklinde belirtilmiştir.

Maden Yönetmeliğinde (RG, 2017) ise çalışanların eğitimi ile ilgili olarak da:

“**MADDE 17** – (1) İşveren, çalışanların iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerini almasını sağlar. Bu eğitim özellikle; işe başlamadan önce, çalışma yeri veya iş değişikliğinde, iş ekipmanının değişmesi hâlinde veya yeni teknoloji uygulanması hâlinde verilir. Eğitimler, değişen ve ortaya çıkan yeni risklere uygun olarak yenilenir, gerektiğinde ve düzenli aralıklarla tekrarlanır.” denilmektedir.

3. MERMER KESİMİ HAZIRLIK ÇALIŞMALARI VE DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

Açık işletme yönteminin uygulandığı mermer madenciliğinin büyük bir kısmında blok kesimi, elmas telli blok kesme makinesiyle yapılmaktadır. Bu makineler çok tehlikeli bir iş ekipmanı olup bu

makineyi kullanan personelin bu iş ekipmanının kullanımında çok deneyimli ve eğitilmiş olması, tel kesme işlemi esnasında oluşan riskleri ve tehlikeleri çok iyi bilmesi ve makinenin çalışması esnasında tehlikeli durum ve davranışlarda bulunmaması gerekmektedir. İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği (RG, 2013a)'nde:

Özel risk taşıyan iş ekipmanı için: “**MADDE 8 – (1) Çalışanların sağlık ve güvenliği yönünden, özel risk taşıyan iş ekipmanlarının kullanılmasında aşağıdaki önlemler alınır.**

a) İş ekipmanı, sadece o ekipmanı kullanmak üzere görevlendirilen kişilerce kullanılır.

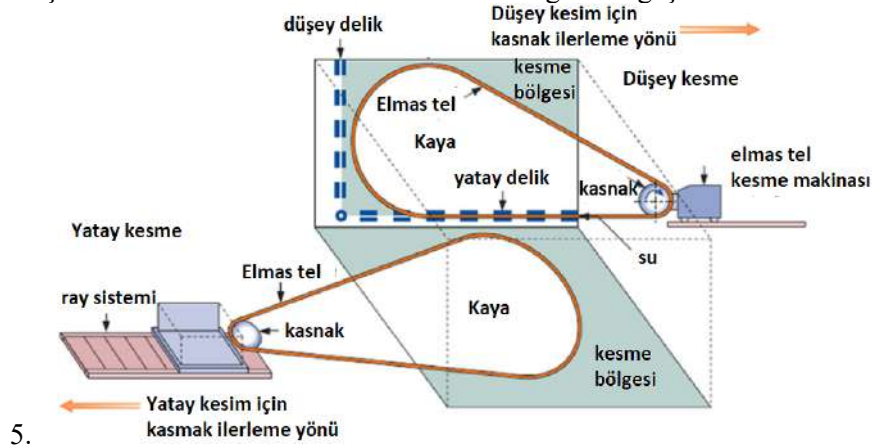
b) Bu ekipmanların tamiri, tadili, kontrolü, bakımı ve hizmete alınması bu işleri yapmakla özel olarak görevlendirilen kişilerce yapılır.”

Çalışanların eğitimi için: “**MADDE 11 – (1) İşverence iş ekipmanını kullanmakla görevli çalışanlara, bunların kullanımından kaynaklanabilecek riskler ve bunlardan kaçınma yollarına ilişkin eğitim almaları sağlanır.**” denilmektedir.

Üç vardiya çalışmanın uygulandığı açık işletme üretim yöntemlerinde kaya kütlesi koşullarına bağlı olarak genelde yükseklikleri 6-10 m arasında değişen basamaklar oluşturulmaktadır. Kesme işleminin yapıldığı üretim aşamasından önceki hazırlık aşamasında elmas telin geçebileceği deliklerin delinmesi de gerekmektedir.

3.1 Elmas Tel Kesme Makinesi ile Blok Kesme İşlemi

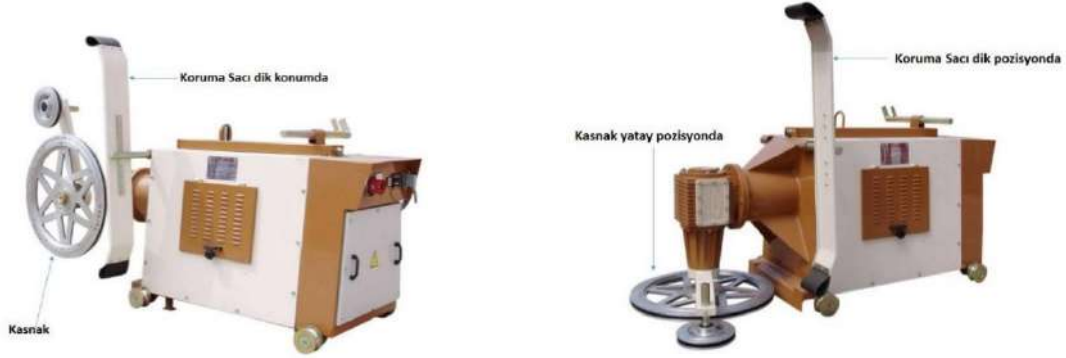
1. Elmas tel kesme makinesi ile yapılan kesme işlemlerinde dikkat edilmesi gereken başlıca hususlar aşağıda verilmiştir:
2. Blok kesmede kullanılan elmas tel kesme makinesi ray üzerinde hareket ettiğinden, tel kesme makinesinin üzerine oturtulacak rayların kesim istikametinde yere döşenmesi ve kesme makinesinin iş makinesi ile taşınarak rayın üzerine düzgün bir şekilde yerleştirilmesi, zeminde boşluk bırakılmaması, kesim esnasında herhangi bir titreşimin meydana gelmemesi, tabana tam olarak oturmasının sağlanması gerekmektedir.
3. Sahada yapılan mermer kesme işlemlerinde deliklerin delinip telin deliklerden geçirilerek tel kesme makinesine bağlandıktan sonra telin çevresinde hiçbir personelin olmaması, önce alt tabanın daha sonra yan yüzeyler kesilmesi gerekmektedir (Şekil 2).
4. Her kesim işleminden önce kullanılacak telin durumu gözden geçirilmelidir.



Şekil 2. Tel kesme makinesi ile düşey ve yatay kesim krokisi (Özçelik, 1999; Ataei vd. 2011; Khademian vd. 2015)

6. Makine rayın üstüne konulduktan sonra enerji girişi takılmalıdır. Sonra dizili elmas telin kasnağa takılarak emniyet istikametine koruma mafsallı konulması ve güvenlik önlemleri alındıktan sonra makinenin çalıştırılması gerekmektedir.

7. Kesim sırasında makina emniyet kolu boşa çıkarılmamalı, dönen kasnak herhangi bir el aleti ile durdurulmamalıdır.
8. Makine çalıştırılırken tele verilen gerilmeye dikkat edilmesi, kesim esnasında tele uygulanacak germe kuvveti ve dönme hızının, kesilen kayacın dayanım ve sertliğine göre ayarlanması gerekmektedir.
9. Telde oluşacak aşırı gerilme telin kopmasına ve elmas boncukların telin dönme istikametine göre bir kurşun gibi ileriye fırlamasına sebep olabilmektedir.



Şekil 3. Tel kesme makinası dikey ve yatay kesim pozisyonları (URL1, 2025)

10. Yatay kesim esnasında tel kesme makinasının koruma sacı makinenin dik konumunda kaldığından iş güvenliği için ilave güvenlik önlemleri alınmalıdır (Şekil 3).
11. Kesim sırasında makine kesinlikle susuz çalıştırılmamalıdır.
12. Kesim yapılacak tel hiçbir şekilde ters döndürülmemelidir.
13. Tel kesme makinesi çalışırken mermer kütlesi üzerinde elmaslı tel hattı boyunca külünkler yardımı ile yiv (tel yolu) açılmalıdır. Elmas tel elle çekilerek bu yola alıştırılmalıdır. Ancak makine çalıştırdıktan sonra elmas tele kesinlikle demir, metal ya da herhangi bir çubukla temas edilmemesi gerekmektedir.
14. Bazı durumlarda işçiler bu işi hızlandırmak için demir bir manivela ile tele dayanarak işi hızlandırmaya zeminde yuva açmaya çalıştıkları görülmektedir. Bu durumda elmas tel metale sürterek kopmakta ve elmas telin işçinin bacağına sarılarak işçinin bacağına koparttığı ve ölümüne neden olduğu iş kazalarının meydana geldiği de görülmektedir. Bu sebeple işverenin sahaya sorumlu müdür atarken mesleğinde deneyimli bir maden mühendisi ataması, daimi nezaretçi ve İSG uzmanı ataması yapmadan ve detaylı bir risk analizi hazırlamadan kesinlikle çalışma yapmaması, sahada çalışan tüm işçilerin gerekli eğitimlerden geçirilmesini sağlaması gereklidir.
15. Tel hızının yeterli olup olmadığı, telde kayma ve titreşim olup olmadığı, telin kendi ekseninde dönüp dönmediği gibi makinenin çalışması sırasında periyodik kontrollerin yapılması gerekmektedir.
16. Kesim esnasında, kesinlikle makinenin arkasından geçilmemeli, raylar ayarlanmaya çalışılmamalıdır.
17. Kesme işlemi süresince tel kesme makinesi rayların sonuna geldikçe tel boyu 5- 10 m kısaltılmalı ve makine tekrar öne alınmalıdır.
18. Düşey kesimlerde elmas tel hizasında hiçbir çalışan bulunmamalı ve operatör kumanda panosunu tel hizasında olmayacak şekilde yerleştirmelidir.
19. İş güvenliği açısından yatay kesimlerde elmas telin yüksekliğinde hiçbir kimse bulunmamalı ve operatör kumanda panosunu elmaslı tel seviyesinden daha yüksek, bir tümseğin üzerine yerleştirmelidir.

Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği (RG, 2013b)'nde "İşverenin Genel Yükümlülükleri":

“MADDE 5 – (1) İşveren aşağıdaki hususları yerine getirmekle yükümlüdür: a) İşçilerin sağlık ve güvenliklerini sağlamak amacıyla; 1) İşyerleri, çalışanların sağlık ve güvenliklerini tehlikeye atmayacak şekilde tasarlanır, inşa edilir, teçhiz edilir, hizmete alınır, işletilir ve bakımı yapılır. 2) İşyerinde yapılacak her türlü çalışma, yetkili kişinin nezaretinde ve sorumluluğu altında yapılır. 3) Özel riski bulunan işler yalnızca bu işle ilgili özel eğitim alan ehil kişiler tarafından ve talimatlara uygun olarak yapılır. 4) Tüm güvenlik talimatları çalışanların anlayacağı şekilde hazırlanır.” şeklindedir.

Aynı Yönetmeliğin EK 1 Sondajla Maden Çıkarılan İşlerin Yapıldığı İşyerleri ile Yeraltı ve Yerüstü Maden İşlerinin Yapıldığı İşyerlerinde Uygulanacak Asgari Genel Hükümler’de Gözetim ve Denetim:

“MADDE 1.3. – “Yapılan tüm çalışmalarda, çalışanların sağlık ve güvenliğinin korunmasının sağlanması için işverence atanan, yeterli beceri ve uzmanlığa sahip kişiler tarafından gerekli gözetim ve denetim yapılır. Sağlık ve güvenlik dokümanında, gerekli görülmesi halinde çalışılan yerler gözetim yapan kişi tarafından her vardiyada en az bir defa kontrol edilir. Yeterli beceri ve uzmanlığa sahip olmak şartıyla yukarıda belirtilen gözetim görevini işverenin kendisi üstlenebilir.” şeklindedir.

“MADDE 1.3.2 – “Tek vardiyayla çalışan işyerlerinde veya tatil gibi güvenliği riske sokacak kadar ara verilmesinden sonra, çalışanlar ocağa girmeden ve herhangi bir faaliyete başlanmadan önce, sorumlu kişiler tarafından ocağın her yeri sağlık ve güvenlik yönünden denetlenir; Çalışmaya uygun şartların varlığı tespit edilmeden ocağa girilmesine izin verilmez.” şeklindedir.

T.C. Yargıtay Onuncu Hukuk Dairesi 31/10/1978 Tarih ve 1978/2077 E.,1978/7689K. Sayılı Kararında; *“Her işveren, işyerinde işçilerin sağlığını ve güvenliğini sağlamak için gerekli olanı yapmak ve bu husustaki şartları sağlamak ve araçları noksansız bulundurmakla yükümlüdür. Bu yükümlülüğün sadece tedbir almakla yetinilebileceği anlamı taşımadığı, alınan tedbirlere uyulup uyulmadığını denetleme ve giderek tedbirlere uyulmasını temin anlamında bulunduğu da kuşkusuzdur. Başka bir deyişle işveren işyerinde, geniş anlamda, doğmuş ve doğabilecek tüm tehlikeleri önlemek zorundadır. Bu zorunluluk sonucu olarak işyerinde işveren tarafından tam anlamı ile geniş bir kontrol mekanizması kurulmalıdır.”* şeklinde işverenin geniş anlamda denetim, kontrol ve gözetim mekanizması oluşturması, alınan tedbirlere uyulup uyulmadığını denetlenmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliğinde (RG, 2013a):

“MADDE 5 – “İşveren; İşyerinde kullanılacak iş ekipmanının yapılacak işe uygun olması ve bu ekipmanın çalışanlara sağlık ve güvenlik yönünden zarar vermemesi için gerekli tüm tedbirleri alır. İş ekipmanını seçerken işyerindeki özel çalışma şartlarını, sağlık ve güvenlik yönünden tehlikeleri göz önünde bulundurularak bu ekipmanın kullanımının ek bir tehlike oluşturmamasına dikkat eder. İş ekipmanının, çalışanların sağlık ve güvenliği yönünden tamamen tehlikesiz olmasını sağlayamıyorsa, kabul edilebilir risk seviyesine indirecek uygun önlemleri alır.” şeklindedir.

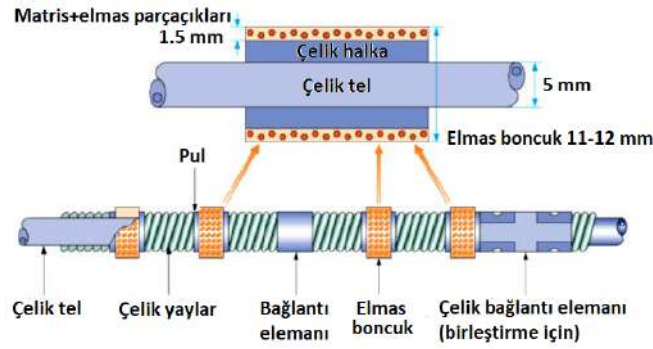
İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği EK-1’de ise;

“MADDE 2.5 – “Parça fırlaması veya deşmesi riski taşıyan iş ekipmanları, bu riskleri ortadan kaldırmaya uygun güvenlik tertibatı ile donatılır.”

“MADDE 2.8 – “Makine, tezgah ve tesislerde sağlık ve güvenlik şartları tesis edilirken, teknolojik gelişmelerin sağladığı imkanlar oranında gerekli tedbir alınarak iş güvenliği çalışanın inisiyatifine terk edilmemesi prensibi göz önünde bulundurulmalıdır.” şeklindedir.

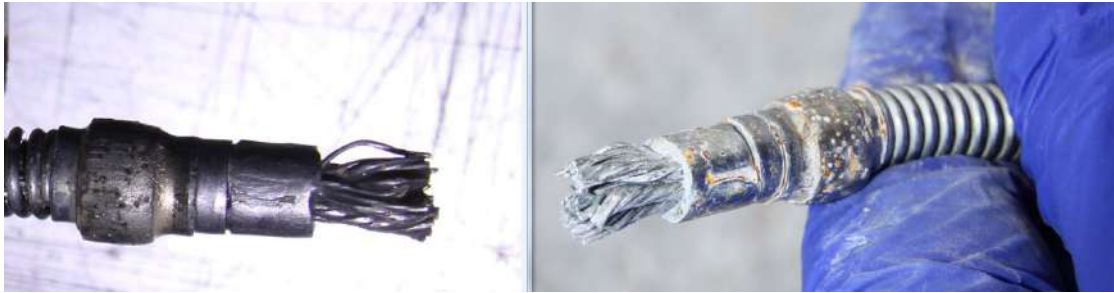
3.2 Sayalama Makinesi Kullanımı Sırasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Sayalama, ocakta elmas tel kesme makinesi ile kesilen mermer blokların katrak ve ST kesimine uygun bloklar haline getirilmesi için elmas tel ile kesim yapılması işlemidir. Sayalama işlemlerinde şu hususlar iş güvenliği açısından dikkate alınmalıdır.



Şekil 4. Çelik tele dizilen elmas boncuk ve diğer parçalar (Özçelik, 1999; Ataei vd. 2011; Khademian vd. 2015)

1. Sayalama makinesi çalışırken makinenin arkasında tahta siperlik/korkuluk bulunmalı, makineyi kumanda eden işçiler makine çalıştığı sürece bu korkuluğun arkasından çıkmamalıdır. Bu işlem sırasında işçiler çok büyük bir risk altında bulunmaktadır. Çünkü sayalama makinesi çalışırken tel kopma ihtimali çok yüksek olup kopma anında Şekil 4'te gösterildiği gibi dizilen tele bağlı parçalar bir anda etrafa saçılmaktadır.
2. Sayalama makinesinde elmas telin iki ucu sıkma makinesi ile birleştirildiğinde bağlantı elemanının (soketin) kesinlikle kopmayacak bir şekilde profesyonelce sıkılması, telin kullanım süresinin takip edilmesi ve yenisinin kullanılması gerekiyorsa değiştirilmesi gerekmektedir.
3. Kesim işi yapan telin kopmaması için de telin çok doğru bir biçimde dizilmesi, bağlanması ve bağlantı elemanlarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Sayalama sırasında telin kopması, soketin fırlayarak işçiye isabet etmesi işçinin ölümüne neden olabilmektedir. Bir işçinin ölümü ile sonuçlanan kopan telin uçlarına ilişkin görsel Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Sayalama makinesinin çalışması esnasında kopan elmas telin uçları.

4. Sayalama makineleri ile yapılan kesim çalışmalarında kesim istikametinde makine çalışırken makine arkasına mutlaka ahşap korkuluk yerleştirilmesi gerekmektedir. Çünkü kesim işi yapan işçiler tel kesme makinesinin dönme istikametine göre telin önünde bulunmakta ve makineyi siperliğin arka tarafından çalıştırmaktadır (Çalimli, 2022).

5. Korkulukların sağlam ve güvenilir olduğundan emin olunmalı, çalışanların mutlaka korkulukların arkasında bulunması sağlanmalıdır.



Şekil 6. Sayalama makinası ve korkuluk

6. Makine çalıştırılırken kesinlikle telden uzak durularak dönen telin üzerinden geçilmemelidir.
7. Tel koptuğu anda gerilmeden dolayı yüksek kinetik enerjiye sahip olmaktadır. Bu nedenle telin kopma anında telin karşısında korkuluk arkasında bulunulsa bile, telin sekerek savrulması sonucu çevrede bulunan çalışanlara çarpma ihtimali de bulunmaktadır.
8. Kesime başlayacak tellerin soketlerinin aynı boyda olması, halatının sağlam ve yeni değiştirilmiş olması, eklerinin sağlam olması gerekmektedir.

Sayalama makinesinde elmas telle mermer kesimi tek blok için güvenli olmakla birlikte bazı işletmelerde meydana gelen kazalar incelendiğinde, birden fazla mermer bloğunun aynı anda kesilmeye çalışıldığı durumda kazalar oluşmuştur. Bu tür kesimler çok tehlikeli olup yüksek risk taşımaktadır. Çünkü bu tür kesimlerde mermeri kesen telde çok yüksek gerilmeler meydana gelmekte ve telde rezonans oluşturmaktadır. Mermerden mermere sıçrayan tel, kesme makinesine bağlı teldeki soketler bu sıçrama esnasında parçalanabilmekte ve çelik halatın dağılmasıyla etrafa saçılan elmas boncuklar yaralanmalara ve ölümlere sebep olabilmektedir. Elmas telin bağlanması işlemlerinde aşağıda verilen hususlar iş güvenliği açısından dikkate alınmalıdır:

1. Elmas tel eldivensiz tutulmamalı, teli tutmak için herhangi bir el aleti kesinlikle kullanılmalıdır.
2. Her kesimde aynı tel kullanılmalı, mermer kesimde kullanılan telin aynı olması, takımın teli olduğundan emin olunmalıdır. Teldeki soket çapları aynı olmalı, zorunlu olması halinde küçük çaplı soketin bulunduğu sağlam tel kullanılmalıdır.
3. Her kesimin başlangıç ve bitiminde soket çapları ölçülmeli ve tel kesme işlemi yapılacak bölgenin temizlenmiş olduğundan emin olunmalıdır.
4. Tel taşıma ve ek değiştirmede, tel sıkımda mutlaka eldiven kullanılmalıdır.
5. Tel dizme, halat değiştirme işlemi haftalık düzenli olarak yapılmalı, tellerin sağlamlığından emin olunmalı ve sağlam olmayan teller kesinlikle kesime alınmamalıdır.
6. Kasnakta dönen tel durmadan tele kesinlikle yaklaşılmamalı, tel çalışırken kesinlikle tutulmamalıdır.
7. Tel dönerken tele su verme işlemi yapılmamalı, tel suyunu ayarlamak için taşın üstüne çıkılması gerekiyorsa makina durdurulmalı ve taşın üzerine kaydırmaz çizme ile çıkılmalıdır.
8. Tel kesimi biten makine işin bitiminde yıkanarak temizlenmelidir.
9. Teller yıkanıp temizledikten sonra düzenli bir şekilde kaldırılmalı, yıkama esnasında elektrik panosu sudan korunmalıdır.

4. MERMER BLOKLARIN YIKIMINDA DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

Çeşitli yöntemlerle kesilmiş mermer bloklarının ana gövdeden ayrılma ve kırılma işlemlerinde birçok yöntem ve iş ekipmanları kullanılmaktadır. Yıkıma başlamadan önce kütlenin yıkılacağı yer, moloz ve hafriyat ile beslenmelidir (TCMEB, 2011). Yıkım işleminde ripper, pamter, hava yastığı ve hidrolik krika gibi ekipmanlar kullanılmaktadır.

Ocaklardaki kazaların bazıları da mermer blokların kesildikten sonra öne doğru devrilmesi/yıkımı esnasında meydana gelebilmektedir. Özellikle soğuk hava şartlarında yapılan çalışmalarda mermer kütlenin yüzeyinin buzlanması sebebiyle iş makinesinin paletlerinin ya da işçilerin ayaklarının buzda kayarak kademelerin üzerinden aşağıya düşmesiyle sonuçlanan iş kazaları meydana gelebilmektedir. Mermer blokların yıkımı sırasında dikkat edilecek hususlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Yıkım işinde çalışanlar krikoları halat ile sabit bir noktaya sıkıca bağlamalı, emniyet kemeri, eldiven takmalıdır.
2. Kriko tek başına tutulmamalı, yıkım arasına girilmemelidir.
3. Yıkım sırasında kesinlikle yıkılacak kütlenin üzerine çıkılmamalıdır.
4. Yıkımdan önce askıdaki parçalar ekskavatör ile düşürülmeli, yıkım bittikten sonra yıkım bölgesine girmeden askıda herhangi bir parça olup olmadığı kontrol edilmelidir.
5. Yıkım sonrası yıkımdan sorumlu ustabaşı ya da yetkili eleman bölgeyi kontrol etmelidir.
6. Yıkılmış bloğun boyutlandırılması için tel geçirme işleminde kesinlikle kütle altına girilmemelidir.

4.1 Riper ile Yıkım İşlemi

Bu yöntemde ekskavatörden sağlanan hidrolik basınçla çalışan riperler oluşturulan yarığa yerleştirilerek mermer blok öne doğru yıkılmaktadır. Riperler, hızlı bağlantı aparatı ile sorunsuz şekilde kısa sürede sökülüp takılabilmekte, sisteme makine cinsine göre 350-420 bar arasında hidrolik basınç verilebilmektedir. Aparat ucu açılma mesafesi 1000 mm'ye kadar çıkmaktadır (URL 2, 2025) (Şekil 7).

4.2 Pamter ile Yıkım İşlemi

Ekskavatörden sağlanan hidrolik basınçla çalışan Pamter ise yine aynı şekilde çeşitli yöntemlerle kesilmiş mermer blokların arasında oluşturulan yarığa yerleştirilerek ekskavatörden sağlanan hidrolik basınç sayesinde aparatın gagalarına hareket vererek mermer blok öne doğru devrilmektedir. Pamterler 360° mekanik dönen tablası sayesinde mermer yarığına uygun açıda yerleştirilmekte, yüksek verimlilik ile çalışmakta, hızlı bağlantı aparatı ile sorunsuz şekilde kısa sürede sökülüp takılabilmektedir. Aparat ucu açılma mesafesi 500 mm'ye kadar çıkmaktadır (URL 2, 2025) (Şekil 8).



Şekil 7. Riper (URL2, 2025)



Şekil 8. Pamter (URL2, 2025)

4.3 Hava Yastığı ile Ayırma İşlemi

Mermer işletmelerinde kesilen mermer bloklarının ana kütleden ayırmak için hava yastıkları kullanılmaktadır. Hava yastığı ile yıkımlarda iş güvenliği açısından aşağıda belirtilen hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

1. Hava yastığının sağlamlığından emin olunmalıdır.

2. Kumanda panosuna hava hattı çekilerek gerekli bağlantılar yapıldıktan sonra hava yastıkları 30 ile 35 cm arasında şişirilerek gerekli besleme yapılarak krikolar kayanın arasına yerleştirilir ve krikolar yerleştirildikten sonra hava yastıkları indirilerek/söndürülerek yukarıya çekilmelidir.
3. Yıkım işlemi başlamadan önce yıkım işleminin yapılacağı bölgeden, yıkım işi ile görevlendirilmiş işçiler hariç herkesin uzaklaştırılması gerekmekte olup iş güvenliği tedbirleri alınmadan, güvenlik kuralları uygulanmadan yıkım işlemine başlanmamalıdır.
4. Hava yastığı ile yapılan yıkım esnasında hava yastığının sağlamlığından emin olunmalı ve çalışan yastıkların üzerine kesinlikle eğilmemek gerekmektedir. Olası bir hava yastığı patlaması çok tehlikeli olabilmektedir.

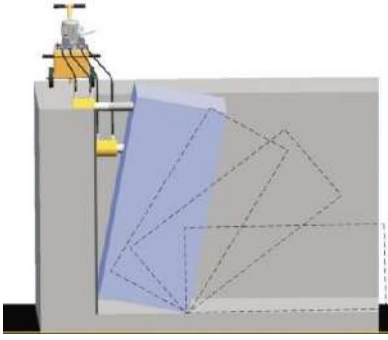


Şekil 9. Hava yastığı uygulaması (URL3, 2025)

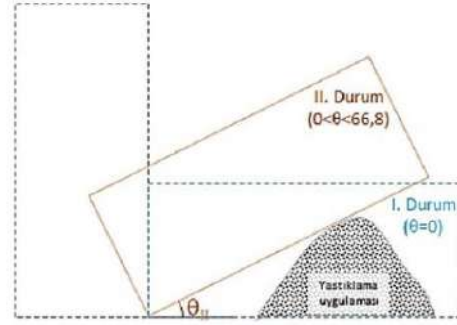
4.4 Hidrolik Kriko ile Yıkım İşlemi

Kesim sonrası mermer blok ana gövdeden ayrıldıktan sonra hava yastıkları yukarıya çekilir. Daha sonra yıkım işlemi hidrolik kriko ile gerçekleştirilir (Şekil 10-11). Bu yöntem ile yapılacak çalışmalarda iş güvenliği açısından dikkat edilecek hususlar şu şekilde özetlenmiştir:

1. Yıkım işlemi kriko yardımı ile yapılacaksa krikolar halat yardımı ile delinmiş olan ana kayaya sabitlenmelidir.
2. Çalışmakta olan krikoların üzerine kesinlikle eğilmemeli ve krikoları kullanmaya başlamadan önce yağ kaçağı olmadığından, elektrik ve mekanik aksamının sağlamlığından emin olunmalıdır.
3. Öteleme esnasında ana kayadan ayrılan kütle ile ana kaya arasına kesinlikle ayak uzatılmamalı ve araya girilmemelidir.
4. Ötelenmekte olan kütlenin üzerine kesinlikle çıkılmamalıdır.
5. Yıkım esnasında meydana gelecek kütle kaymaları ve olası taş düşmelerine karşı tehlike bölgesinden güvenli bir mesafede uzak durulmalıdır.
6. Yıkım yapıldıktan sonra öncelikle iş makineleri ile düşme ve kayma tehlikesi olan kütleler düşürülmelidir.
7. Blok düşürülmesine geçilmeden önce baret, kaydırmaz çizme, emniyet kemeri ve eldiven kullanmadan kütle üzerine çıkılmamalıdır.
8. Yıkım işlemi bittikten sonra yıkımda tüm alet ve makineler düzenli bir şekilde kaldırılmalıdır.



Şekil 10. Hidrolik krika ile yıkım (URL4, 2025)



Şekil 11. Hidrolik krika ile blok düşürülmesi (Şengün ve Bilgin, 2022)

5. MERMER DİLİMLEME İŞLEMLERİNDE DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

Mermer bloklar, kesim ve yıkım sonrasında fabrikalara, atölyelere taşındıktan sonra katrak makineleri ile plakalar haline getirilmektedir. Bu işlem sonrasında yapılan kaldırma, yükleme ve nakliye esnasında da iş güvenliği önlemlerine dikkat edilmediğinde birçok yaralanmalı ve ölümlü iş kazaları meydana gelebilmektedir. Katrak makinası tehlikeli bir iş ekipmanı olup bu makine ve çevresindeki ekipmanlarda çalışan işçilerin, vinç ile güvenli bir kaldırma ve taşıma işi yapılırken yükün düşme ihtimalini göz önüne alarak kaldırılan yükten güvenli mesafede uzakta durmaları ve yükü kontrol etmek için alet-edevat kullanarak çalışmaları gerekmektedir. Platform üzerindeki mermer plakaların ayrılması ve vinç ile taşınması esnasında plakaların arasına girilmesini önleyen tedbirler alınmalıdır.

İşçilere iş ekipmanı çevresindeki tehlikeler ve riskler konusunda gerekli eğitimler verilmiş olsa dahi işçilerin yük kaldırma ve taşıma esnasında oluşabilecek tehlikeli durumları öngörmeleri ve gerek platformla gerekse köprü vinçle yapacakları taşıma işini kendilerine verilen eğitimler çerçevesinde yapmaları gerekmektedir. Bazı durumlarda işçilerin almış olduğu eğitim ve deneyimlerine rağmen iş yerinde işin gerektirdiği dikkat ve özeni göstermedikleri, vinç kullanma ehliyeti ve yetkisi olmadığı halde talimatlara aykırı şekilde vinç kullanırken kaza geçirdikleri görülmektedir.



Şekil 12. Katrak makinası (URL 5, 2025)

6. SONUÇLAR

İşverenler, iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve iş kazalarının oluşumunun önlenmesi hususunda aşağıda belirtilen hususlarda yükümlülüklerini yerine getirmemeleri durumunda kazanın meydana gelmesinde kusurlu olabilmektedir:

1. İşverenlerin işyerinden sorumlu bir İşletme Müdürü ataması yapmaması,
2. Yapılan işleri koordine edecek yetkili bir teknik eleman bulundurmaması,

3. İşyerinde kullanılan iş makinalarının çalışma talimatlarının hazırlanmaması ve bu talimatların işçilere öğretilmemesi,
4. İş Güvenliği Uzmanı ve İşyeri Hekimi görevlendirilmemesi,
5. İşyerindeki iş ekipmanları için risk analizlerinin yapılmaması,
6. İşçilere iş güvenliği eğitimi verilmemesi,
7. Yapılan işlerin denetiminin sağlanmaması ve
8. Genel olarak çalışanlarda güvenlik kültürü oluşturulmaması.

Mermer ve doğaltaş madenciliğinde yapılan üretim çalışmalarında, gerek elmas telle blok kesme işlemi gerekse mermer bloklarının yıkım, taşıma ve sayalama işlemleri sırasında birçok iş kazası meydana gelmektedir. Bu kazaların büyük bir çoğunluğunun elmas telle yapılan mermer kesme işlemi esnasında meydana geldiği ve telin kopması sonucu kopan parçaların mermi hızıyla hareket ederek telin dönme yönünde çalışan işçilerin yaralanmasına ve ölümlerine sebep olmaktadır. Bu iş kazaları incelendiğinde;

1. Blok kesme, yıkım ve taşıma, sayalama/ebatlama esnasında yapılan çalışmalarda işveren tarafından yer yer alınması gereken önlemlerin alınmadığı, işçiler tarafından da çalışma talimatlarına uyulmadığı,
2. Kesim öncesi işçilerin ve nezaretçilerin makine çevresinde yeterli koruma seti çekilmemesi ve tüm güvenlik önlemlerini almadan blok kesme çalışması yapmaları,
3. Tel kopması halinde makine çevresinde çalışanların zarar görmemesi için yeterli önlemlerin alınmaması,
4. Elmas telle taban kesimini yapmak için blok kesme makinesi kurulurken, mermer bloğunun işçilerin hayatını tehlikeye atmayacak şekilde tasarlanıp işletilmemesi,
5. Yatay kesimde telin sıkışmaması için yeteri kadar takozlama yapılmadığı,
6. Çelik tel kesme makinesinin çalıştırılmadan önce yeterince kontrol edilmemesi ve makinenin tekniğine uygun çalıştırılmaması,
7. Kesim sırasında elmas telin titreşim yapması durumunda telin kopmasını önlemek için makinenin durdurulup telin kısaltılmasının yapılmaması,
8. Makinanın kumanda panosunun, kasnak kısmının ve kumanda kablosunun bulunduğu kısımların güvenli bir bölgede olmaması,
9. Çalışma sırasında işçiler tarafından yapılan tehlikeli hareketler, gibi nedenler ölümlü ve yaralanmalı kazalarla sonuçlanmıştır.

Blok kesme makinesinin kasnağına tel fırlatmasına karşı koruyucu takılması, tel fırlamasını önlemek için blokların aralık bırakılmayacak şekilde dizilmesi ve işyeri çalışanların sağlık ve güvenliklerini tehlikeye atmayacak şekilde planlanıp işletilmesi gerekmektedir. İşverenin blok kesim işinde geniş anlamda sıkı denetim, kontrol ve gözetim mekanizması oluşturması yanısıra tel kesme işinin işçilerin kendi inisiyatifine bırakmaması gerekmektedir. Kaza olaylarının meydana gelmemesi için, blok kesme ve sayalama işleminin mevzuata uygun olarak yapılması ve gerekli güvenlik önlemlerinin alınması halinde bu tür kazaların önlenilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca işveren açısından iş güvenliği prosedürlerini geliştirmesi ve çalışanlarda iş güvenliği kültürünün oluşturulması için kurumsal çabaların artırılması da büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

Ataei, M., Mikael, R., Sereshki, F., Ghaysari, N. (2011). Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(6), 1289–1295.

Çalıklı, T. (2022). Mermer Ocak-Fabrika ve Oyma Taş İşlerinde İş Güvenliği. Kimlik Yayınları.

Çelik, M. Y., Ersoy, M., Yeşilkaya, L., Kayı, Z. (2017). Mermer ocaklarında elmas tel kesme ve zincirli kollu kesme makinelerinin birlikte kullanımının incelenmesi. Politeknik Dergisi, 20(2), 459–473.

Kaptanlar Hidrolik. (2025). Kaptanlar Hidrolik Ürün Kataloğu. <http://kaptanlar.com.tr/>

Khademian, A., Bagherpour, R., Almasi, S. N., Aalaei, M. (2015). Optimum distance between cutting machine and working face in travertine exploitation with diamond wire cutting method. 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET'15, Antalya, Turkey.

Milli Eğitim Bakanlığı [TCMEB]. (2011). Makine Teknolojisi-Blok Ayırma ve Ebatlama. Milli Eğitim Bakanlığı.

https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Blok%20Ay%C4%B1rma%20Ve%20Ebatlama.pdf

Özçelik, Y. (1999). Mermercilikte kullanılan elmas tel kesme makinalarının çalışma koşullarının incelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı.

Resmi Gazete [RG]. (1985). 3213 Sayılı Maden Kanunu (RG sayı: 18785).

Resmi Gazete [RG]. (2012). 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (RG sayı: 28339).

Resmi Gazete [RG]. (2013a). İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği (RG sayı: 28628).

Resmi Gazete [RG]. (2013b). Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği (RG sayı: 28770).

Resmi Gazete [RG]. (2017). Maden Yönetmeliği (RG sayı: 30187).

SGK. (2025). Sosyal Güvenlik Kurumu İstatistik Bilgileri. <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/>

Şengün, N., Bilgin, İ. (2022). Mermer ocak işletmeciliğinde yastıklama uygulamasının üretim verimine etkisinin araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26(1), 132–140.

Ticaret Bakanlığı İhracat Genel Müdürlüğü Maden, Metal ve Orman Ürünleri Dairesi [TCTB]. (2021). Doğaltaşlar Sektör Raporu.

Toksel. (2025). Toksel Ürün Kataloğu. <https://www.toksel.com.tr/urunler/katrak-makinesi>

URL2 (Ertaş Makine). (2025). Ertaş Makine Ürün Kataloğu. https://www.ertasmakine.net/ekskavator_grubu.asp?id=4

URL3 (Güvenal Elastomer). (2025). Güvenal Elastomer Ürün Kataloğu. <https://guvenallastik.com/urun-detay/blok-ayirma-hava-yastigi/blok-ayirma-hava-yastigi>

URL4 (Hidro-Mekanik). (2025). Hidro-Mekanik Ürün Kataloğu. <https://www.hidromekanik.com/mermer-blok-ayirma-devirme/>

URL5 (2025). Toksel Ürün Kataloğu, <https://www.toksel.com.tr/urunler/katrak-makinesi>

YERALTI MERMER MADENCİLİĞİNDE ÜRETİMİN İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ YAKLAŞIMLARI İLE MODELLENMESİ

MODELING OF PRODUCTION IN UNDERGROUND MARBLE MINING WITH OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY APPROACHES

M. K. Özfiat*, E. Özkan, M. E. Yetkin, Ü. Sayın, A. K. Eyüboğlu

* Sorumlu yazar: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Müh. Böl. Buca-İzmir,
kemal.ozfiat@deu.edu.tr

ÖZET

Yeraltı mermer madenciliği, artan derinlik ve yüzey rezervlerinin tükenmesiyle birlikte hem mühendislik zorlukları hem de önemli İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) çözümleri gerektiren bir üretim alanı haline gelmiştir. Bu çalışma, yeraltı mermer üretiminde yaygın olarak kullanılan oda-topuk yöntemini, İSG perspektifinden ele alarak; tasarım geometrisinin (düzenli ve düzensiz oda topuk) stabilite, iş güvenliği ve risk yönetimi üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Metodoloji, literatürdeki temel saha çalışmaları, jeolojik özellikler ve kaya mekaniği ilkeleri ve Afyonkarahisar bölgesindeki bir ocak kesitine dayanan sayısal modelleme analizlerinin incelemesine dayanmaktadır. Literatür bulguları, düzenli topuk geometrisinin öngörülebilir yük dağılımı ve daha yüksek güvenlik faktörleri sunarak üretim verimliliği ve iş güvenliği açısından faydalar sağladığını göstermektedir. Dört aşamalı olarak gerçekleştirilen sayısal modelleme sonuçları, planlı bir oda-topuk tasarımının son kazı adımı dahi minimum dayanım faktörünü 1,58 gibi güvenli bir seviyede tutabildiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, derinleşen açık ocaklara bir alternatif olarak, bilimsel ve sistematik bir yaklaşımla planlanan yeraltı mermer madenciliğinin hem uygulanabilir hem de İSG açısından daha güvenli bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Yeraltı, Mermer madenciliği, Oda topuk, İş sağlığı ve güvenliği, Güvenlik faktörü.

1. GİRİŞ

Küresel inşaat, kentsel yenileme ve iç mekân tasarımlarındaki yükselen ivme, doğaltaş talebini artırarak sektörün pazar büyüklüğünü 2024 itibarıyla 40,4 milyar dolara taşımıştır. IMARC Grup (2024), konut ve altyapı projelerinde doğal malzeme kullanımına yönelik artan eğilimin etkisiyle pazarın yıllık %3,5 bileşik büyüme göstererek 2033'te 54,9 milyar dolara ulaşacağını öngörmektedir. Ancak yüzeye yakın mermer rezervlerinin tükenmesi, işletmeleri daha derin madencilik sahalarına zorlamaktadır. Bu durum; blok bütünlüğü, renk homojenliği ve verimlilik dengesini, kaynağın kolay erişilebilirliğinden çok, gelişmiş mühendislik uygulamalarına bağımlı kılmaktadır.

Derin madencilığe yönelik bu zorunlu geçiş, beraberinde artan jeomekanik zorluklar ve iş sağlığı-güvenliği (İSG) önlemlerinin önemini artırmaktadır. Bununla birlikte, Alentejo'daki bir yeraltı mermer ocağında gerçekleştirilen sayısal modellemeler, tek eksenli basınç dayanımı 100 MPa olan masif mermerde dahi, 25 metreyi aşan açıklıklarda stabilite için koruyucu topuk ve geri dolgulu pano tasarımlarının gerekliliğini göstermiştir (Franqueira and Paneiro, 2021). Benzer şekilde, kaya mekaniği araştırmaları, derinlik arttıkça yükselen yer kabuğu gerilmelerinin ani tavan göçmeleri ve sismik aktivite riskini artırdığını doğrulamaktadır (Fairhurst, 2017). Bu riskler, havalandırma sistemlerinin yeniden tasarlanmasını ve uzaktan kumandalı ekipman kullanımını bir İSG zorunluluğu haline getirirken, doğaltaş pazarındaki talebi karşılayan ileri teknolojiye dayalı ve iş güvenliği odaklı yeraltı üretim planlamalarına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Yeraltı mermer ocaklarındaki en önemli İSG risklerinden biri, yüksek gerilme birikimlerinin neden olduğu tavan ve yan duvar göçükleridir. Nitekim NIOSH (2019) verileri, bu tür işletmelerdeki yaralanmaların yaklaşık üçte birinin, gevşek kaya kütlelerinin insan gücü ile temizliği sırasında yaşandığına işaret etmektedir. Maden işletmelerinde iş sağlığı ve güvenliği yönetmeliği (2013), yeraltı göçüklerinin önlenmesi için tahkimat, tavan, kavlak ve yan duvar kontrollerinin yapılmasını zorunlu tutmuştur.

Jeomekanik risklerin yanı sıra, insan faktörleri de kritik bir rol oynamaktadır. HFACS (İnsan Faktörleri Analiz ve Sınıflandırma Sistemi) yöntemine dayalı güncel bir araştırma; yetersiz denetim, eksik eğitim ve kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanımındaki ihmallerin, ergonomik zorluklarla birleştiğinde kümülatif kaza riskini artırdığını saptamıştır. Aynı çalışma, bu bireysel hataların kökeninde genellikle yönetimsel ve sistemsel eksikliklerin yattığını vurgulamaktadır (Sherin et al., 2024). Bu bulgular ışığında, jeoteknik tasarım, etkin saha denetimi ve davranışsal güvenlik programlarının bütünsel bir yaklaşımla uygulanması, hem yapısal stabiliteyi güvence altına almak hem de insan kaynaklı riskleri yönetmek için zorunludur.

Oda-topuk üretim metodu, özellikle masif mermer yataklarında tavan kontrolü ve üretim verimliliği için etkin bir çözüm sunmaktadır. Yöntemin temel prensibi, tavan yüklerini karşılamak üzere düzenli aralıklarla bırakılan mühendislik tasarımı topuklar aracılığıyla duraylılığın sağlanmasıdır. Esterhuizen vd. (2011) yaptıkları çalışmada, topukların tasarımında, NIOSH kılavuzunun önerdiği kritik faktörleri incelemiştir. Buna göre; topuk güvenlik katsayısının en az 1,8 olması ve üretim boşluğu açıklığının topuk yüksekliğinin 1,5 katını geçmemesi gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmada, bu tasarımların uygulanması, maksimum gerilmelerin azaltılarak topukların yenilmesiyle oluşacak bir göçme olayının önleneyeceği belirtilmiştir. Franqueira ve Paneiro (2021) tarafından Alentejo (Portekiz) sahası için yapılan sayısal analizlerle oda ve topuk boyutlarının doğru NIOSH kılavuzuna göre seçilmesi gerektiği sayısal analizlerle doğrulanmıştır. Analizler, önerilen geometri sayesinde tavan deformasyonlarının %30'a kadar azaldığını ve güvenlik katsayısının kritik bir seviye olan 0,9'dan daha güvenli bölge kabul edilen 1,4–1,6 aralığına yükseldiğini ortaya koymuştur. Bu sayede, hem mermer kaybı en aza indirgenmekte hem de ek tahkimat maliyetleri düşürülerek çalışma verimliliği artırılmaktadır.

Oda-topuk yönteminde pano duraylılığı, doğrudan sistematik bir tasarıma dayanır. Bu tasarımda topuklar; düzenli bir geometride, belirli bir genişlik/yükseklik (G/Y) oranını sağlayacak şekilde ve %65'i aşmayan bir nihai üretim oranıyla planlanır. Yaklaşımın temel amacı, gerilmeleri tüm topuklara dengeli ve öngörülebilir bir şekilde dağıtmaktır (Esterhuizen et al., 2011). Amerika'da 40 taş ocağında yapılan analizler, 500 metre derinlikte dahi güvenlik faktörünün 1,8'in üzerinde kaldığını göstermiştir. Tasarım disiplininin uzaklaşıldığında ise riskler belirginleşir. Selektif kazı gibi nedenlerle oluşturulan düzensiz topuk dizilimleri, bazı topukları standart dışı (daha dayanımsız veya dar) bırakır. Bu durum, söz konusu topuklar üzerinde aşırı gerilme yığılmalarına neden olur. Sayısal modellemeler, bu kritik topuklardaki gerilmelerin normalin iki ile üç katına çıkabildiğini doğrulamaktadır. Aşırı yüklenen bir topukta başlayan plastik deformasyon, komşu topuklara yayılarak ilerleyici bir yenilme sürecini başlatır (Aksoy and Onargan, 2006; Alejano et al., 2017; Vlachogiannis and Benardos, 2024). Sonuç olarak, tek bir topuktaki yerel bir yenilme, tüm panonun toptan göçmesini tetikleme potansiyeli taşır.

Standart dışı bırakılan topukların geometri ve tasarım hataları, göçük tehlikelerini oluşturabilir. Örneğin, ABD'nin Georgia eyaletindeki bir mermer ocağında, hatalı tasarlanmış topukların yenilerek göçmesi olayı yaşanmıştır. Bu olay sonucunda 90.000 m²'lik bir alanın tavanı göçmüş ocaktaki üretim belli bir süre durmuştur (Phillipson, 2012). Bu büyük göçük riskinin yanı sıra, düzensiz maden geometrisi günlük çalışma güvenliğini de pek çok yönden olumsuz etkiler. İlk olarak, planlı olmayan oda ve galeri şekilleri, temiz hava akışını engeller. İkinci olarak, dar ve düzensiz yollar, iş makinelerinin güvenli hareketini zorlaştırır. Bu da hem operatörler için çarpışma ve sıkışma riskini artırır hem de zorlayıcı manevralar nedeniyle bel ve eklem rahatsızlıklarına neden olur. Bu tehlikeleri önlemek için

günümüz madencilik kuralları hem doğru tasarım yapılmasını hem de mevcut hataların düzeltilmesini şart koşar. Önleyici tedbirler arasında, yapay zeka ve programlar ile çalışan hassas delik delme ve kesme makineleri ile tavan ve tabandaki en küçük yer değiştirmeleri bile tespit eden lazer takip sistemleri bulunur. Bu teknolojiler, madenin en başından plana uygun ve güvenli şekilde ilerlemesini sağlar. Hatalı veya zayıf olduğu tespit edilen mevcut topuklar ise çelik halat tipi ankrajlar ile sarılarak veya püskürtme beton ile kaplanarak güçlendirilir. Araştırmalar ve İSG standartları, bu tür mühendislik çözümlerinin hem iş güvenliği seviyesini tehlikeli sınırının üzerine çıkardığını hem de bu sırada maden kaybını önlediğini göstermektedir (Esterhuizen et al., 2011; sÖzfırat vd, 2011; Alejano et al., 2017; ISO 45001).

Bu çalışma, yeraltı mermer madenciliğindeki oda-topuk sistemlerini, tasarım geometrilerinin İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) üzerindeki doğrudan etkilerine odaklanarak incelemektedir. Bu kapsamda, düzenli (sistematik) ve düzensiz (sistematik olmayan) topuk yerleşim planları; tavan duraylılığı, havalandırma verimliliği, operatör güvenliği ve önlemler gibi kritik İSG parametreleri üzerinden karşılaştırılmaktadır. Çalışmanın temel amacı ve özgün katkısı, topuk geometrisi konusunu yalnızca üretim verimliliği veya kaya mekaniği ekseninden çıkarıp, İSG'yi merkeze alan bütüncül bir bakış açısıyla ele almaktır. Böylelikle, hem literatürdeki bu boşluğu dolduracak kuramsal bir çerçeve sunulması hem de sahadaki madencilik faaliyetleri için daha güvenli üretim politikaları geliştirilmesine bilimsel bir temel sağlanması hedeflenmektedir.

2. YÖNTEM

2.1 Genel Yaklaşım

Çalışmada, düzenli ve düzensiz oda-topuk sistemlerinin İSG odaklı karşılaştırması araştırılmıştır. Çalışmada İncehisar'da çalışılan bir ocakta yeraltı üretiminin belli oda-topuk geometrilerinde gerilme analizlerinin güvenli üretime izin verip vermediği modellenmiş ve araştırılmıştır. Akkoç'un (2003) uluslararası sahalardan verdiği örnekler, Aksoy ve Onargan'ın (2006)'da yaptığı çeşitli mermer ocaklarında kaya kütle sınıflamaları yapılarak topuk geometrilerinin tasarımı, Kun ve Mallı'nın (2014) Türkiye'deki ocaklara yönelik parametrik analizleri, Ersoy ile Yeşilkaya'nın (2020) ile Vlachogiannis ve Benardos (2024)'ün mermer ocaklarında yeraltı üretim planlamaları, oda topuk boyutlamaları ve topuk gerilme tahminlemeleri üzerine yaptığı araştırmalar oldukça önemli bulgulara sahiptir.

Düzenli oda-topuk sistemlerinde tasarım kriterleri (oda-topuk oranları, öngörülen yük dağılımı, stabilite mekanizmaları) ele alınırken; diğer yanda düzensiz sistemlerin doğasından kaynaklanan risk faktörleri (plansız topuk geometrileri, gerilme yığılmaları, beklenmedik yenilmeler) analiz edilmiştir. Bu karşılaştırmalı analiz, farklı tasarımların yalnızca yapısal duraylılığa değil, aynı zamanda çalışma risklerine olan etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın analitik çerçevesi, mühendislik tasarımını ve insan odaklı İSG risklerini birleştiren bütüncül bir yaklaşıma dayanmaktadır. Bu doğrultuda, üretim geometrisi ve topuk boyutlandırması gibi temel mühendislik kararlarının; tavan göçmesi, havalandırma yetersizliği, ekipman manevra kısıtları ve solunabilir toz konsantrasyonları gibi doğrudan İSG sonuçları üzerindeki etkileri bütüncül bir şekilde incelenmiştir.

Analizler, yapılan modeller ile gerçekleştirilmiş; literatürde sunulan saha verileri ve gözlemler, yerleşik teknik normlar ve ilkelerle karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Değerlendirmelerin teorik zeminini; ampirik duraylılık formülleri, eş yüklü alan (tributary area) teorisi ve kaya mekaniğinin temel gerilme-denge prensipleri oluşturmuştur (Hoek ve Brown, 1980; Bieniawski, 1984). Böylece çalışılan bir üretim ocağı kesitinde iki boyutta oda-topuk üretimlerinde gerilme durumlarının güvenli üretimlere etkileri incelenmiştir.

2.2 Düzenli ve Düzensiz Oda-Topuk Yapılarının Tanımı

Yeraltı mermer işletmelerinde yaygın olarak kullanılan oda-topuk yöntemi, ekonomik değeri olan mermer rezervinin çıkarıldığı boşluklar (odalar) ile bu boşlukların arasında tavan yüklerini taşımak ve genel duraylılığı sağlamak amacıyla bırakılan mermer kütleleri (topuklar) arasında bir denge kurma esasına dayanır. Yöntemin sahadaki uygulaması ise üretim koşullarına göre ideal tasarımdan farklılıklar gösterebilir. Jeolojik koşullar (damar geometrisi, süreksizlikler vb.) ve üretim gereklilikleri, topuk yerleşiminin sistematik ve planlı oda topuk olmasını veya plansız ve düzensiz oda topuk sistemine dönüşmesini belirler (Akkoç, 2003; Kun ve Mallı, 2014).

2.2.1 Düzenli Oda-Topuk Sistemi

Düzenli oda-topuk sistemi, bir mühendislik tasarımı yaklaşımını temsil eder. Bu sistemde üretim galerileri (odalar) ve taşıyıcı topuklar, genellikle düzenli ve öngörülebilir bir geometrik tasarıma göre planlanır. Bu sistematik yapı, iki temel fayda sağlar;

1. Yapısal fayda: Tavan yüklerinin topuklar arasında dengeli ve homojen bir şekilde dağılmasını sağlayarak aşırı gerilme yığılmalarını ve tekil topuk yenilmelerini önler.
2. Üretimsel fayda: Planlı ve düzgün galeri ağı, havalandırma devrelerinin etkin bir şekilde tasarlanmasına olanak tanıyarak hem iş makinelerinin egzoz gazlarının hem de solunabilir tozun ortamdan uzaklaştırılmasını kolaylaştırır. Şekil 1’de uygulanan düzenli oda topuk sistemine sahip yeraltı mermer ocaklarından üretim görüntüleri verilmiştir.

Düzenli sistemlerin öngörülebilir yapısı, duraylılık analizlerinin mühendislik yaklaşımlarıyla yapılmasına imkân tanır. Bu analizlerde en temel ve yaygın kullanılan faktör, topuk güvenlik katsayısıdır. Güvenlik faktörü, basitçe bir yapının taşıdığı yüke kıyasla ne kadar daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu, yani ne kadar güvenli olduğunu gösteren bir orandır.

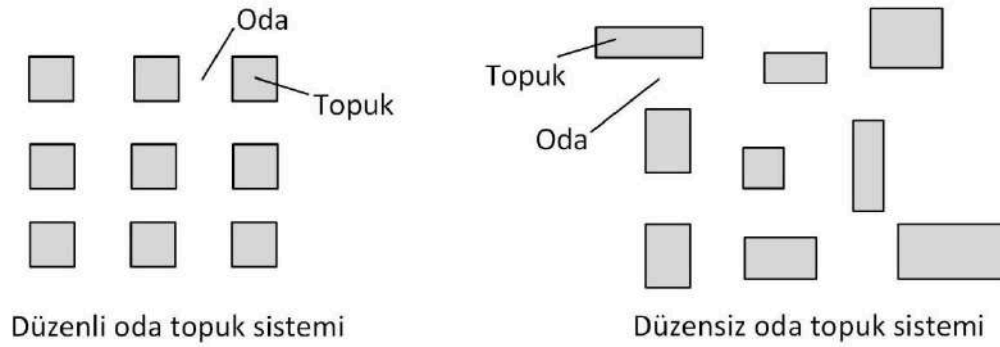


Şekil 1. Düzenli Oda-Topuk Üretim Geometrisine Sahip Ocak Görüntüleri

2.2.2 Düzensiz Oda-Topuk Sistemi

Düzenli sistemin aksine, düzensiz oda-topuk sistemi proaktif iş güvenliğini dikkate alan tasarıma göre jeolojik koşullara uyum sağlamayı hedefleyen reaktif bir yaklaşımı yansıtır. Bu yöntemde temel amaç, en iyi mermer kalitesini (selektif üretim) ve üretim verimini en üst düzeye çıkarmaktır. Bu nedenle kazı yönü ve topuk konumları; damar geometrisini, çatlak ağlarını ve diğer süreksizlikleri takip ederek belirlenir (Akkoç, 2003; Ersoy ve Yeşilkaya, 2009; Özfirat vd., 2011; Phillipson, 2012).

Ancak, rezervi artırmaya yönelik bu esneklik, beraberinde önemli jeomekanik ve çalışma zorlukları getirir. Sistematik olmayan yerleşim, topuklar arasındaki yük dağılımının homojenliğini bozarak bazı taşıyıcı elemanlar üzerinde aşırı gerilme yığılmalarına neden olur. Örneğin, Alejano vd., (2017) tarafından yapılan sayısal analizler, bu tür sistemlerde gerilme kaynaklı plastik deformasyon riskinin düzenli sistemlere göre %40'a varan oranlarda artabildiğini göstermektedir. Aynı çalışmalar, özellikle ani lokal yenilmelerin, daha büyük bir göçme sürecini tetikleme potansiyelini vurgulamaktadır. Sahadaki bu plansız ve karmaşık yapı, Şekil 2'de düzensiz oda topuk sistemi olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Düzenli ve Düzensiz Oda-Topuk Sistemleri

Şekil 2'de yeraltı mermer madenciliğinde kullanılan düzenli ve düzensiz oda-topuk sistemlerinin şematik karşılaştırması gösterilmiştir. Soldaki düzenli sistem, topukların periyodik ve simetrik bir düzende yerleştirildiği, mühendislik hesaplamalarına ve öngörülebilir yük dağılımına dayanan proaktif bir tasarımı temsil etmektedir. Sağdaki düzensiz sistem ise, jeolojik yapıya (damar geometrisi, süreksizlikler) uyum sağlayarak rezerv verimini artırmayı hedefleyen, ancak bu nedenle plansız geometrilere ve homojen olmayan gerilme dağılımlarına sahip reaktif bir yaklaşımı göstermektedir. Bu iki sistemin mühendislik ve İSG parametreleri açısından detaylı analizi Tablo 1'de verilmiştir.

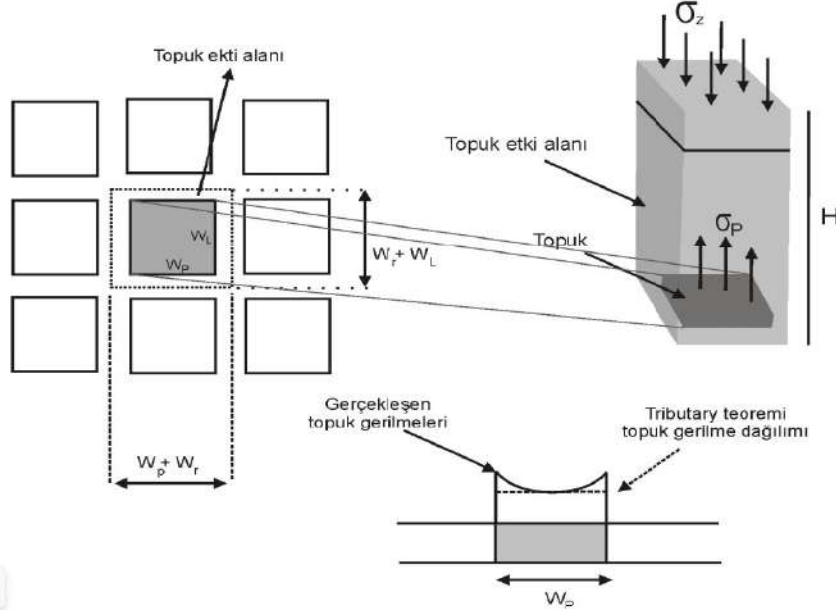
Tablo 1. Düzenli ve Düzensiz Sistemlerin Karşılaştırmalı Özellikleri (Akkoç, 2003; Aksoy ve Onargan, 2006; Ersoy ve Yeşilkaya, 2009; Vlachogiannis ve Benardos, 2024).

Kriter	Düzenli Sistem	Düzensiz Sistem
Oda ve Topuk Boyutları	Eşit, standart, planlı düzen	Farklı boyutlar, çatlak ağına göre değişken
Güvenlik Faktörü (FS)	Genellikle 1,5–1,8 ve daha fazla	Değişken, 1,2'nin altına düşme riski olabilir
Gerilme Dağılımı	Homojen	Lokal gerilme birikimi
Havalandırma Devresi	Simetrik, dengeli	Ölü hava cepleri, yönlendirme zor
Manevra Alanı	Geniş ve açık görüş	Sınırlı, ergonomik kısıtlamalar
Stabilite Yönetimi	Öngörülebilir	Saha-bazlı, sürekli izleme gerektirir

2.3. Topuk Güvenlik Katsayısı ve Üretim Oranı

Düzenli ve düzensiz oda-topuk sistemlerinin karşılaştırmalı analizi, tasarımların yalnızca geometrik yapısına değil, aynı zamanda jeomekanik, kaya kütlesi özellikleri ve üretim yöntemi çalışma şekline bağlıdır. Üretimde kullanılan oda topuk yöntemi sahada açık ocak olarak başlanan ve derinleşen sahalarda yapılan üretim sonrası doğal gerilme koşullarından uzaklaşmış bölgenin, ikincil gerilme koşullarını, belirli geometrik şekil ve ebatlarda bırakılan topuklarla dengeleyerek güvenli üretim yapmaya çalışmaktır.

Eş yüklü alanlar yaklaşımı, statik yükler altında yüklenen destek topukları için geçerli bir yöntemdir. Üretim oranı, sahanın ekonomik ve üretim faktörlerine bağlı olarak ortaya konan geometrik faktörlerin etkisi sonucu ortaya çıkan, bir hat boyunca bırakılan topuk alanları ve üretim açıklıkları arasındaki ifade olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3). Dik arakesitli topuklar için kazı oranı Eşitlik (1)'deki formülle bulunmaktadır.



Şekil 3. Topuk Etki Alanı ve Eş Yüklü Alanlar Yaklaşımı (Kun ve Mallı, 2014)

$$e = \frac{[(w_p + w_r)(w_L + w_r)(w_p \times w_L)]}{(w_p + w_r)(w_L + w_r)} \quad (1)$$

Burada;

e: Üretim oranı,

Wp: topuk genişliği,

Wr: oda açıklığı, ve

WL: Topuk boyu olarak tanımlanmaktadır.

Oda ve topuk boyutları arasındaki oran, güvenlik ile verimlilik arasında kurulması gereken bir dengeyi ifade eder. Eğer odalar çok geniş açılırsa (oran büyürse), topukların taşınması gereken yük artar ve göçük, kavlak riskleri artar (Esterhuizen et al., 2011). Eğer topuklar çok geniş tutulursa (oran küçülürse), maden daha güvenli olur ancak ekonomik değeri yüksek olan mermer yerin altında kaldığı için üretim verimi düşer. Üretimin ilerlemesiyle madenin ilerleyen yıllarında ocağın durumuna bağlı olarak yeraltı mermer ocağı çok fazla topuğa sahip olabilir. Topukların ilk andaki şeklini koruyabilmesi ancak uygun boyutlandırılmaları durumunda sağlanabilir. Topuk dizaynı, gerilme analizleri, değişen gerilme düzeyleri, jeolojik şartlar ve olası deformasyonlar mutlaka araştırılmalıdır. Topuklar içindeki gerilme düzeyi, eş yüklü alan teorisine göre Eşitlik (2)'deki formülle çözümlenebilir.

$$\sigma_p = \sigma_z \frac{(w_r + w_p)(w_r + w_L)}{w_p \times w_L} \quad (2)$$

Burada;

σ_p : Topuğa etki eden düşey gerilme,

σ_z : Topuğa etki eden yerçekimsel gerilme olarak tanımlanmıştır.

Burada topuk stabilitesinin korunabilmesi için, topuk malzemesinin tek eksenli basınç dayanım değerinin, topuğa etki eden eksenel basınçtan büyük olması gerekmektedir. Bu değer pratikte topuk güvenlik katsayısı olarak isimlendirilmektedir. Bieniawski (1984), topuk dayanımlarının üç parametreye bağlı olduğunu öngörmektedir. Bunlar; boyut veya hacim etkisi, topuk geometrisi, topuk malzemesinin özellikleridir. Topuk dayanımı ve arasında belirgin bir ilişki olduğu; topuk genişliğinin (wp) yüksekliğine (wh) oranı 1'den küçük ise topuk dayanımı hızla düşmektedir. Bu oranın çok yüksek olması durumunda ise topuk dayanımı küçük oranlarda artış göstermektedir.

Yeraltı mermer ocaklarında topuk güvenlik katsayısı $(\sigma_p/\sigma_v) > 1,5$ koşulunu sağlayan mermer topukları, derin olmayan işletmeler için hemen hemen çok dayanıklı, bozunumu zor bir karakter göstermektedir (Akkoç, 2003). Ayrıca oda topuk yönteminde yeraltı açıklığının çevresinde oluşan ikincil gerilme alanının neden olabileceği aşırı gerilme ya da yenilme bölgesi; birincil gerilme alanına, açıklık geometrisine ve çevre kayacın mekanik özelliklerine bağlıdır. Hoek ve Brown, 1980'de bir yeraltı açıklığının şeklinin (eksenler oranının) seçiminde birincil gerilmelerin oranının göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamıştır.

İkinci önemli gösterge, güvenlik faktörüdür (GF). Topuk duraylılığı için güvenlik faktörü, topuğu oluşturan kaya kütesinin dayanımının (σ_c), topuğa gelen ortalama düşey gerilmeye (σ_a) bölünmesiyle hesaplanır. Bu matematiksel ilişki, Eşitlik (3) ile ifade edilmektedir;

$$GF = \sigma_c / \sigma_a \quad (3)$$

Burada;

σ_c : Topuk kayaçlarının tek eksenli basınç dayanımı (MPa),

σ_a : Topuğa etki eden eksenel gerilme (MPa)

GF: Güvenlik faktörü

Üçüncü kriter ise şekil değiştirme (deformasyon) riskidir. Bu, yük altındaki tavan ve topukların ne kadar esnediği, eğildiği veya kalıcı hasar aldığı anlamına gelir. Bu risk, sayısal modelleme programı kullanılarak Bölüm 3'te incelenmiştir.

Geometrik analizlerden biri, kazı genişliğinin (W_o : oda açıklığı) bırakılan topuk genişliğine (W_t) oranıdır. Bu oranın matematiksel ifadesi, Eşitlik (4) ile aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$R = W_o / W_t \quad (4)$$

Bu bağlamda, göçük riskini azaltmak, doğrudan güvenlik faktörüne (GF) ve topuk oranlarına bağlı tasarımlar yapmak İSG kalitesini artırır. Ayrıca, manevra alanı ve aydınlatma yeterliliğini sağlamak ocak içi nakliyat kazalarını azaltır. Kazı kesitinin geometrisini kontrol etmek havalandırma kalitesini artırır. Özellikle düzensiz oda topuk sistemlerinde plansız galeri tasarımları hava akımının etkin bir şekilde yönlendirilmesini zorlaştırır. Bu durum, dizel partikül madde (DPM) ve solunabilir toz gibi zararlı maddelerin belirli bölgelerde birikmesine yol açarak çalışanların maruziyet riskini önemli ölçüde artırır. Jeomekanik ve operasyonel faktörler temel alınarak iki sistemin kapsamlı bir karşılaştırması Tablo 2'de özetlenmektedir.

Tablo 2. Oda-topuk sistemlerinin mühendislik ve İSG açısından değerlendirilmesinde kullanılan başlıca kriterler

Kriter	Tanım	Sisteme Etkisi
Topuk Oranı (R)	Oda genişliği / topuk genişliği oranı	Stabilite ve üretim verimi arasında denge sağlar
Emniyet Katsayısı (GF)	Dayanım / zorlanma oranı	Göçük riskini belirler, $GF < 1,5$ tehlikeli kabul edilir

Deformasyon Riski	Plastik bölge gelişimi ve yer değiştirme potansiyeli	Düzensiz sistemde lokal zayıf bölgeler oluşur
Üretim Boşluğu Geometrisi	Galeri yüksekliği, genişliği, açıklık-topuk oranı	Tahkimat ihtiyacı ve blok çıkarılabilirliği etkilenir
Manevra Alanı	Operatör hareket ve ekipman dönüş imkânı	Ergonomi ve acil durum güvenliği açısından önemlidir
Aydınlatma ve Havalandırma	Galeri şekline bağlı hava sirkülasyonu ve ışık dağılımı	Toz ve dizel egzoz dağılımını etkiler

2.4. Topuk Gerilme Tahmini

Sayısal yöntemlerin kullanımıyla yapılan topuk gerilme tahmini, giderek daha fazla araştırmacının çeşitli araştırma modelleri üzerinde analizler gerçekleştirmesiyle giderek daha fazla çalışılmaktadır. Bu analizler, belirli saha çalışmalarının incelenmesini; topuğun şekli ve bunların madencilik sonrası topuk gerilme dağılımı üzerindeki etkisi gibi temel geometrik unsurların araştırılmasını, sayısal analizlerin ve yapay sinir ağlarının birleştirilmesini sağlamıştır. Hatta üretim sonrası yeraltında kalan topukların geri kazanılmasını içermektedir. Topuk gerilme tahmini sorununu bu aşamada modellemek topukların güvenli üretimle kazanılması açısından önemlidir (Şekil 4) (Singh et al., 2011; Zhang and Goh, 2015; Monsalve et al., 2022; Agioutantis and Wedding, 2023; Dzmunya et al., 2023; Maritz and Malan, 2023; Vlachogiannis and Benardos, 2024).



Şekil 4. Topuk Gerilme Tahmin Yaklaşımları

Literatürdeki saha deneyimleri ve mühendislik araştırmaları, düzenli sistemlerde topuklar için hedeflenmesi gereken güvenlik faktörünün (GF) en kötü koşullarda 1,5'tan büyük olmasını önermektedir (Esterhuizen et al., 2011; Kun ve Mallı, 2014; Yetkin, 2022). Bu oran için yeraltı süreksizlik aralıklarının mesafesi ve sayısı, süreksizlik yönleri, oda-topuk boyutları, üretimin derinliği belirleyici olmaktadır. Bu aralık, topukların hem bölgesel yenilmelere karşı yeterli bir güvenlik aralığına sahip olmasını hem de topuğun korunmasıyla üretimi etkileyen bir göçüğe dönüşmesini önleyerek güvenli üretim sağlar. Sistematik bir mühendislik yaklaşımını yansıtan bu düzenli yapının temel prensipleri, simetrik galeri ve topuk yerleşimi ile topuk üzerine gelen normal gerilme hesapları Şekil 4'te verilmiştir.

Özetle, bu çalışmanın yöntemi, farklı nitelikteki bu veri kaynaklarının bir sentezine dayanmaktadır. Saha gözlemlerinden elde edilen pratik veriler, sayısal modelleme sonuçları, dayanım faktörü (SF) ve yerleşik mühendislik ilkeleri bir arada kullanılarak teorik zemin güçlendirilmiş ve analizlerin pratik geçerliliği artırılmıştır. Bu bütüncül yaklaşım sayesinde, oda-topuk sistemleri yalnızca yapısal birer

unsur olarak değil, aynı zamanda mühendislik kararlarının iş sağlığı ve güvenliği üzerindeki doğrudan etkilerini yansıtan karmaşık sistemler olarak ele alınmıştır.

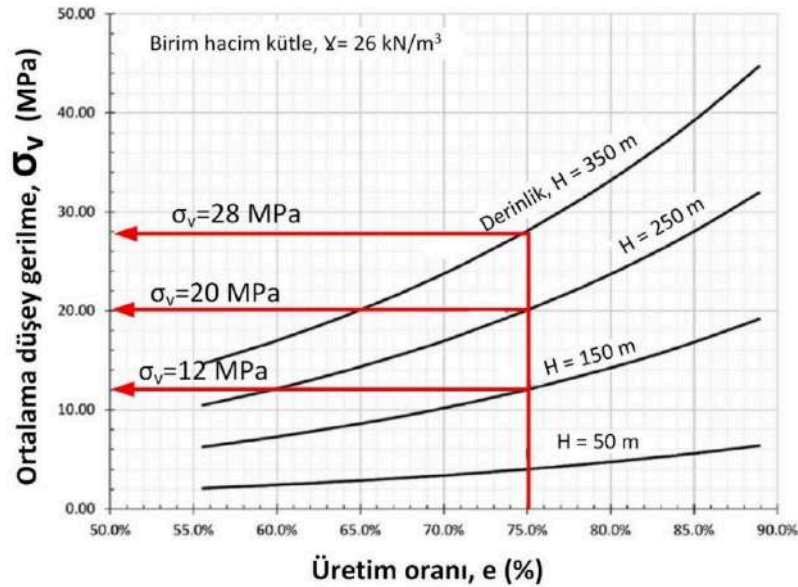
Yapılan deneyler sonucunda sahadan alınan kayaç örneklerine ait ortalama tek eksenli basınç dayanımı değeri 81-128 MPa olarak hesaplanmıştır. Çalışılan sahada mermerin birim hacim kütle değeri ortalama 2,65 t/m³ olarak belirlenmiştir (Tablo 3).

Vlachogiannis ve Benardos, 2024'te yaptıkları çalışmada 26 kN/m³ birim hacim kütle değerine sahip mermer topuklarında derinliğe ve üretim oranına bağlı olarak hesaplanan ortalama düşey gerilme değerleri için bir grafik elde etmiştir. Elde edilen bu grafik sahadaki verilere uyarlanarak kullanılmıştır. Bu grafiğe göre %75 üretim oranında 150, 250 ve 350 m derinliklerde sırasıyla düşey gerilme değerleri 12 MPa, 20 ve 28 MPa olarak belirlenmiştir. Sahada yapılan tek eksenli dayanım değerleri 81-128 MPa arasında hesaplanmıştır. Bu değerler dikkate alındığında topuk malzemesi tek eksenli basma dayanım değeri topuklarda oluşan düşey gerilme değerlerinden oldukça yüksektir ve bu üretim oranları ile bu derinliklerde üretim yapmak oldukça güvenli olarak belirlenmiştir (Şekil 5). Ancak, yeraltı koşullarına bağlı olarak oluşan diğer faktörlerin (süreksizlikler, kırık-çatlak takımları, fay vs.) incelenerek önlemlerinin alınması ihmal edilmemelidir.

Tablo 3. Çalışılan saha mermerlerinin Tek Eksenli Basma Dayanım Değerleri

Deney no	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5	Deney 6
Numune Boyutu (mm)	52,1×50,4	50,7×52,82	50,1×53,2	50,48×51,2	50,72×50,82	50,21×50,3
Birim hacim kütle (kN/m ³)	26,1	25,9	26,02	26,3	25,9	26,2
Kırılma yükü (kN)	232,45	300,93	224,75	370,31	340,01	236,04
TEBD* (MPa)	86	111	83	137	126	87
Ortalama değer (MPa)	105 ± 23,11 (81,89 – 128,11 MPa)					

* TEBD: Tek eksenli basma dayanımı

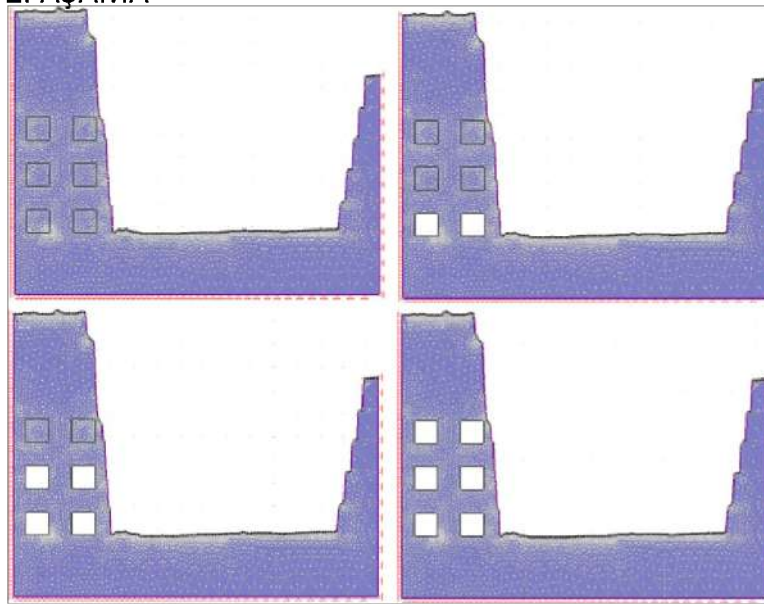


Şekil 5. Vlachogiannis ve Benardos, 2024'e göre mermer topuklarında derinliğe ve üretim oranına bağlı olarak hesaplanan ortalama düşey gerilme değerleri

3. SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI

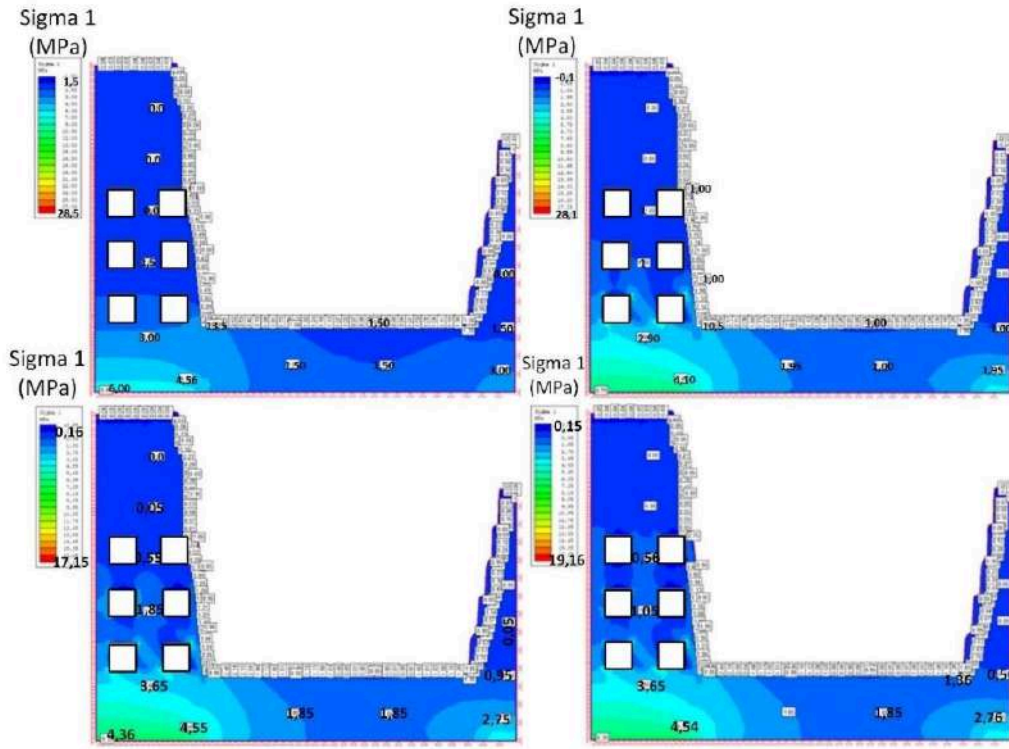
Bu çalışma kapsamında, yeraltı mermer ocağını temsil eden bir sayısal model oluşturulmuş ve kazı süreci dört temel aşamada simüle edilmiştir. Bu kazı adımlarının ilerleyişi Şekil 6'da şematik olarak gösterilmektedir. Modelde, düzenli bir yerleşim planı esas alınarak oda ve topuk kesit boyutları 5 m × 5 m olarak tasarlanmıştır. İkinci aşamadan itibaren, aşağıdan yukarıya doğru ilerleyen bir kazı modeli uygulanmış ve her bir aşamanın sonunda topuklar üzerindeki gerilme dağılımları ve büyüklükleri detaylı olarak incelenmiştir.

Sayısal modelin geometrisi, Afyonkarahisar-İscehisar bölgesinde faaliyet gösteren mevcut bir mermer ocağının gerçek kesit verilerine dayandırılarak oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, modelin saha koşullarını daha gerçekçi bir şekilde temsil etmesini sağlamaktadır. Modelleme çalışmasının temel amacı, açık işletmelerin ekonomik ömürlerinin sonuna yaklaşp derinleştiği günümüz koşullarında, yeraltı üretim yöntemlerine geçişin İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) açısından sağlayacağı potansiyel avantajları araştırmaktır.



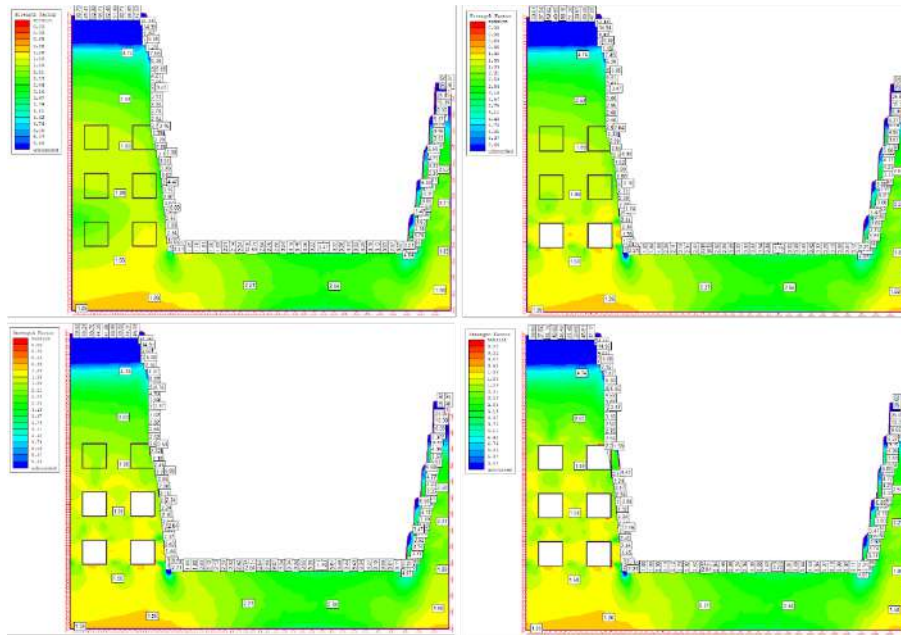
Şekil 6. Dört aşamada kurulan modellerin görüntüsü

Sayısal modelleme sonuçları, kazının her aşamasında gerilme dağılımının nasıl değiştiğini göstermektedir (Şekil 7). Analizin başlangıcı olan 1. aşamada, kazı öncesi durumda, modelin sol tarafındaki şev yüzeyinde 0,5 ila 5,0 MPa aralığında gerilme değerleri belirlenmiştir. Yeraltı kazılarının ilerlemesiyle birlikte bu gerilme değerlerinde değişimler gözlenmiştir. İkinci aşamada (birinci sıra oda-topukların açılması) gerilme aralığı 0,56-4,50 MPa; üçüncü aşamada (ikinci sıra oda-topukların açılması) 0,61-4,32 MPa ve son aşamada (üçüncü sıra oda-topukların açılması) 0,55-4,20 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Farklı aşamalarda meydana gelen maksimum normal gerilme değerleri

Gerilme değerlerinin tek başına bir stabilite göstergesi olmaması nedeniyle, oda-topuk sistemlerinin duraylılığını daha anlamlı bir şekilde değerlendirmek amacıyla her bir kazı aşaması için dayanım faktörü (Strength Factor) analizleri de yapılmıştır. Dayanım faktörü (Strength Factor), kaya kütlesi veya zemin ortamının mevcut dayanımının, stabiliteyi sağlamak için gereken dayanıma oranını ifade eder. Yani bu değer, bir bölgede veya modelde güvenlik faktörü (Safety Factor) gibi çalışır. Bu analizler sonucunda elde edilen dayanım faktörü dağılımları Şekil 8’de sunulmaktadır.



Şekil 8. Dört farklı aşamada hesaplanan dayanım faktörleri

Dayanım faktörü analizleri (Şekil 8), kazı aşamaları ilerledikçe sistemin duraylılık aralığındaki değişimleri kantitatif olarak ortaya koymaktadır. Başlangıç durumu olan 1. aşamada, şev bölgesindeki dayanım faktörü aralığı 3,16-4,15 olarak belirlenmiştir. Yeraltı kazılarının başlamasıyla bu aralık; 2. aşamada 2,84-4,56'ya, 3. aşamada 2,53-4,68'e ve son kazı adımı olan 4. aşamada ise 1,58-4,77'ye dönmüştür.

Analizlerdeki en kritik bulgu, en üst kottaki son oda-topuk sırasının açıldığı 4. aşamada gözlemlenmiştir. Bu aşamada, modeldeki minimum dayanım faktörü değerinin, başlangıçtaki 3,16 seviyesinden 1,58'e düştüğü hesaplanmıştır. Bu değer, literatürde güvenli kabul edilen kritik eşiklerin (örneğin 1,5) üzerinde kalması, tasarlanan sistemin son kazı adımında dahi stabiliteyi koruduğunu göstermektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, yeraltı mermer işletmelerinde uygulanan düzenli ve düzensiz oda-topuk sistemleri, mühendislik tasarımı ve İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) temelinde kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Yapılan literatür sentezi ve analizler, aşağıdaki temel sonuçları ortaya koymuştur:

Düzenli oda-topuk sistemleri, simetrik ve periyodik bir geometriye sahip olmaları sayesinde yükleri topuklar arasında homojen bir şekilde dağıtmaktadır. Bu durum, öngörülebilir bir stabilite yönetimi sağlarken havalandırma ve manevra alanı gibi operasyonel koşulları da iyileştirir. Buna karşın düzensiz oda-topuk sistemleri, jeolojik yapıya uyum sağlayarak rezerv verimini artırmayı hedefler ancak, plansız geometrileri nedeniyle lokal gerilme yığılmaları, havalandırma verimsizliği ve ergonomik zorluklar gibi önemli İSG riskleri içerir.

Afyonkarahisar-İscehisar bölgesindeki gerçek bir ocak kesitine dayandırılarak yapılan dört aşamalı sayısal modelleme, planlı bir yeraltı üretiminin duraylılığını sayısal olarak doğrulamıştır. Kazı ilerledikçe, modeldeki en düşük dayanım faktörü değerinin 1,58 olarak hesaplandığı ve bu değer, literatürde güvenli kabul edilen 1,5 değerinin üzerinde kaldığı görülmüştür. Bu bulgu, doğru mühendislik parametreleri ile tasarlanan bir oda-topuk sisteminin, derinleşen ocaklarda dahi stabiliteyi koruyabildiğini göstermektedir.

Ülkemizde ve dünyada mermer ocaklarının giderek derinleşmesi, açık ocak işletmeciliğinin getirdiği taş ve blok yuvarlanması gibi tehlikeleri artırmaktadır. Bu çalışma, bu derinleşen sahalarda yeraltı üretimine geçişin, yalnızca bir zorunluluk değil, aynı zamanda İSG şartlarını iyileştirmek için önemli bir fırsat olduğunu ortaya koymaktadır. Bilimsel ve sistematik bir yaklaşımla tasarlanan düzenli oda-topuk yönteminin hem üretim verimliliğini koruduğu hem de çalışanlar için daha güvenli bir ortam yarattığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, rezerv kaybını en aza indiren ve güvenliği en üst düzeye çıkaran mühendislik tasarımlarının, sektörün sürdürülebilir geleceği için benimsenmesi tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

Agioutantis, Z. G., Wedding, Z. E. (2023). Stress distribution in pillars as a function of opening and pillar geometry and material properties. 42nd International Conference on Ground Control in Mining.

Akkoç, T. (2003). Derin mermer yataklarının yeraltı üretim yöntemleriyle işletilebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aksoy, C. O., Onargan, T. (2006). Sizing Room and Pillar by Numerical Modeling For Underground Marble Quarries in Turkey. Journal of Mining Science, 42(5).

Alejano, L. R., Arzúa, J., Castro-Filgueira, U., Malan, F. (2017). Strapping of pillars with cables to enhance pillar stability. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(6), 527–540.

Bieniawski, Z. T. (1984). *Rock mechanics design in mining and tunneling*.

Brown, E. T., Hoek, E. (1980). *Underground excavations in rock*. CRC Press.

Cecala, A. B., Chekan, G. J., Colinet, J. F., Organiscak, J. A., Wolfe, A. L. (2010). Best practices for dust control in metal/nonmetal mining. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention.

Dzimunya, N., Fujii, Y., & Kawamura, Y. (2023). Integrating the effect of abutments in estimating the average vertical stress of elastic hard rock pillars by combining numerical modelling and artificial neural networks. *Underground Space (China)*, 13, 121–135.

<https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.03.008>

Ersoy, M., Yeşilkaya, L. (2009). Mermer blok üretiminde yeraltı ve açık ocak işletme şekillerinin karşılaştırılması. *Natura-Sektör*, 5, 90–93.

Esterhuizen, G. S., Dolinar, D. R., Ellenberger, J. L. (2011). Pillar strength in underground stone mines in the United States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(1), 42–50.

Esterhuizen, G. S., Dolinar, D. R., Ellenberger, J. L., Prosser, L. J. (2011). Pillar and roof span design guidelines for underground stone mines.

Fairhurst, C. (2017). Some challenges of deep mining. *Engineering*, 3(4), 527–537.

Franqueira, M. F., Paneiro, G. A. (2021). Contribution to the geomechanical stability of marble underground openings using backfill. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 833, No. 1, p. 012131). IOP Publishing.

IMARC Group. (2024). Natural stone market report by type, construction type, distribution channel, application and region, 2025–2033. <https://www.imarcgroup.com/natural-stone-market>

ISO. (2018). Occupational health and safety management systems-Requirements with guidance for use (ISO Standard No. 45001:2018).

Kun, M., Mallı, T. (2014). Yeraltı mermer işletmelerinde oda topuk yöntemi parametrelerinin belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 16(47), 41–50.

Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği. (2013). Resmi Gazete (28770 Sayılı).

Mallı, T., Yetkin, M. E., Özfirat, M. K., Kahraman, B. (2017). Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 365–372.

Maritz, J. A., Malan, D. F. (2023). A study of the effect of pillar shape on pillar strength. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 123(5), 235–244. <https://doi.org/10.17159/2411>

Monsalve, J. J., Soni, A., Karfakis, M., Hazzard, J., Ripepi, N. (2022). Stochastic continuous modeling for pillar stress estimation and comparison with 2D numerical, and analytical solutions in an underground stone mine. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 39(5), 1917–1937. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00676-z>

National Institute for Occupational Safety and Health. (2019). Mining topic: Ground control overview. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention.

NIOSH. (2019). NIOSH Mining Program: Evidence package for 2008–2018. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health.

Özfırat, M. K., Şengün, B., Yetkin, M. E. (2011). Mermer İşletmelerinde Risk Değerlendirmesi ve Yönetimi. Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu'2011 Bildiriler Kitabı (ss. 24–25). Zonguldak.

Phillipson, S. (2012). Massive pillar collapse: A room-and-pillar marble mine case study. In T. Barczak (Ed.), *Proceedings: 31st International Conference on Ground Control in Mining* (pp. 1–9). West Virginia University.

Sherin, S., Raza, S., Hussain, S., Rehman, Z. U. (2024). Human factors and risk analysis in conventional system of marble mining: Using HFACS framework and structural equation modeling technique. *International Journal of Innovations in Science & Technology*, 6(3), 1505–1523.

Singh, A. K., Singh, R., Maiti, J., Kumar, R., Mandal, P. K. (2011). Assessment of mining induced stress development over coal pillars during depillaring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(5), 805–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.04.004>

Vlachogiannis, I., Benardos, A. (2024). Proposed formulas for pillar stress estimation in a regular room-and-pillar pattern. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 180, 105826.

Yetkin, M. E. (2022). Metalik Madenlerde Topuk Boyutlarındaki Değişimin Gerilme Dağılımına Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 1459–1468. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1148884>

Zhang, W., Goh, A. T. C. (2015). Numerical study of pillar stresses and interaction effects for twin rock caverns. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(2), 193–206. <https://doi.org/10.1002/nag.2306>

BİLDİRİLER / PAPERS

5.Bölüm

TÜRKİYE DOĞALTAŞ SEKTÖRÜNÜN KÜRESEL REKABETÇİLİĞİ: 2024 YILI PERSPEKTİFİNDE FIRSATLAR, ZORLUKLAR VE STRATEJİLER

*GLOBAL COMPETITIVENESS OF THE TURKISH NATURAL STONE INDUSTRY:
OPPORTUNITIES, CHALLENGES AND STRATEGIES IN 2024 PERSPECTIVE*

B. Akyüz*, M. Uslu

İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birlikleri, Ekonomik Araştırmalar Şubesi

**Sorumlu yazar: bahri.akyuz@immib.org.tr*

ÖZET

Bu çalışma, 1995–2023 döneminde Türkiye’nin doğaltaş sektöründeki küresel rekabet gücünü ve pazar çeşitliliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Altı haneli GTİP kodlarına göre BACI veritabanından derlenen blok ve işlenmiş taş ihracat verileri kullanılarak; Karşılaştırmalı Üstünlük Oranı (RCA), dört yıllık periyodik Bileşik Yıllık Büyüme Oranı (BYBO) ve hem ürün hem de coğrafi düzeyde Herfindahl–Hirschman Endeksleri (HHI) hesaplanmıştır. Bulgular, blok taş segmentinde RCA’nın yaklaşık 2010’da zirve yapıp ardından dalgalı bir gerileme sürecine girdiğini; özellikle 2014 sonrası dört yıllık BYBO’nun –%6,9’a kadar düştüğünü göstermektedir. Ürün bazlı HHI değerleri blok taşta yüksek yoğunlaşma işaret ederek 0,63–0,82 aralığında seyretmiş, coğrafi HHI ise Çin odaklı bağımlılığı 0,42–0,67 arasında yoğunlaştırmıştır. Buna karşılık işlenmiş taşta RCA 2023’te 7,12 düzeyinde istikrarını korumuş ve dört yıllık BYBO %7 ile belirgin bir toparlanma sinyali vermiştir. İşlenmiş taş ürün HHI’si 0,38–0,60 aralığında orta–yüksek çeşitlilik, coğrafi HHI ise 0,07–0,31 aralığında görece dengeli bir ihracat dağılımı ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: doğaltaş, ihracat, tedarik zinciri, rekabetçilik, Turkish Stone

ABSTRACT

This study aims to reveal Turkey’s global competitiveness and market diversification in the natural stone sector over the period 1995–2023. Using block and processed stone export data at six-digit HS codes from the BACI database, we calculate the Revealed Comparative Advantage (RCA), four-year rolling Compound Annual Growth Rate (CAGR), and Herfindahl–Hirschman Indices (HHI) at both the product and geographic levels. The findings show that in the block-stone segment, RCA peaked around 2010 and subsequently entered a fluctuating decline; notably, the four-year rolling CAGR fell to –6,9% after 2014. Product-level HHI values for block stone indicate high concentration, ranging from 0.63 to 0.82, while geographic HHI reflects a China-focused dependency between 0.42 and 0.67. Conversely, in the processed-stone segment, RCA remained stable at 7.12 in 2023, and the four-year rolling CAGR recovered to 7%. The product HHI for processed stone ranged from 0.38 to 0.60, indicating moderate-to-high diversity, and the geographic HHI ranged from 0.07 to 0.31, demonstrating a relatively balanced export distribution.

Keywords: natural stone, export, supply chain, competitiveness, Turkish Stone

GİRİŞ

Türkiye, 5,1 milyar m³ civarında mermer rezervine sahip olup bu miktar dünya toplamının yaklaşık %33'ünü oluşturmaktadır (İhracat Genel Müdürlüğü, 2021). 1985'te revize edilen Maden Kanunu'yla özel sektör yatırımları hız kazanmış, 1990'larda blok mermer üretimi birkaç yüz milyon dolarlık düzeydeyken; 2000'lerin ortalarına gelindiğinde yıllık ihracat değeri 1 milyar USD'yi aşarak küresel liderliğe yükselmiştir (CEPII, 2025). Bu süreçte ocaklardan işleme tesislerine kadar tüm değerde entegrasyonu artıran teknolojik yenilikler ve rekabetçi maliyet yapısı önemli rol oynamıştır. 2008–2013 arası, özellikle Çin pazarındaki %264'e varan artışla sektörün altın çağı olarak kayıtlara geçmiştir. 2013'te ihracat 2,3 milyar USD'ye ulaşarak dünya pazar payını yaklaşık %40'a taşımış; ardından Çin'deki inşaat yavaşlaması ve bazı Orta Doğu pazarlarındaki talep daralması büyüme hızını sınırlamıştır (StoneNews, 2019; Global Trade Magazine, 2021). Yine de 2010'ların sonlarına dek blok mermerde lider konum korunmuş, 2021'de 2,09 milyar USD ile yeni bir zirve yapılmıştır. Çin halen blok mermerin, ABD ise en fazla işlenmiş doğaltaş ürünlerin ana alıcısı konumundadır. Gelecek dönemde, Türkiye'nin en büyük avantajı zengin rezervleri ve entegre üretim altyapısı olacaktır; ancak katma değeri yüksek işlenmiş ürün gamına kayarak pazar çeşitliliğini artırmak kritik bir stratejik öncelik olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmadaki analiz, Türkiye'nin doğaltaş sektöründe, özellikle işlenmiş ve blok mermer ihracatındaki performansını değerlendirmek ve sektörün rekabet potansiyelinin gerçekleşenden daha yüksek olduğunu ortaya koymak için tasarlanmıştır. Bu amaçla, Karşılaştırmalı Üstünlük Oranı (RCA), Bileşik Yıllık Büyüme Oranı (BYBO, CAGR), Değer ve Miktar Endeksleri, Herfindahl-Hirschman Ürün Yoğunlaşma Endeksi (HHI) ve Pazar Yoğunlaşması (Coğrafi HHI) metrikleri kullanılmıştır. Çalışmanın metodoloji kısmında metrik hesaplama yöntemleri tanıtılmış olup her birinin blok doğaltaş ve işlenmiş doğaltaş için ayrı ayrı hesabı ve güncel ve geçmiş olaylara dayandırılarak yorumlanması bulgular ve tartışma kısmında paylaşılmaktadır. Bulguların bütüncül değerlendirmesi ile de oluşturulan politika önerileri sonuç kısmında yer almaktadır.

METODOLOJİ VE VERİ

Analizde ilk olarak, Karşılaştırmalı Üstünlük Oranı (RCA) ile Türkiye'nin belirli bir ürün grubunda, örneğin işlenmiş veya blok mermerde, dünya piyasalarındaki rekabet gücü ölçülmüştür. RCA, bir ülkenin belirli bir ürünündeki ihracat payının, o ülkenin toplam ihracatının dünya ihracatındaki payına oranlanmasıyla hesaplanmaktadır (Balassa, 1965). Formül şu şekildedir:

$$RCA = \frac{X_{ij}/X_i}{X_{wk}/X_w} \quad (1)$$

i: İhracatçı ülke, j: İthalatçı ülke, X_{ij}: Türkiye'nin belirli bir ürün grubundaki (örneğin GTİP listesinde "işlenmiş mermer" veya "blok mermer" olarak tanımlanan doğaltaş) ihracatı, X_i: Türkiye'nin toplam ihracatı (tüm ürün ve GTİP'ler), X_{wk}: Dünyanın aynı ürün grubundaki (işlenmiş veya blok mermer) toplam ihracatı, X_w: Dünyanın toplam ihracatını (tüm ürünler, tüm GTİP'ler) temsil etmektedir. Bu metrik, Türkiye'nin işlenmiş ve blok mermer ihracatındaki küresel konumunu ve diğer önde gelen ülkelerle kıyaslamasını değerlendirmek için temel bir gösterge olarak kullanılmıştır.

İkinci olarak, Bileşik Yıllık Büyüme Oranı (BYBO, CAGR, Compound Annual Growth Rate), Türkiye'nin işlenmiş ve blok mermer ihracatının zaman içindeki büyüme performansını analiz etmek için hesaplanmıştır. BYBO, ihracatın belirli bir dönemde yıllık bileşik büyüme oranını gösterir ve şu formülle hesaplanır:

$$BYBO = \left[\left(\frac{X_{ij,t2}}{X_{ij,t1}} \right)^{\frac{1}{t2-t1}} \right] \times 100 \quad (2)$$

Burada, $X_{ij,t1}$ baz yıl itibarıyla Türkiye'nin ilgili GTİP kalemindeki ihracatı, $X_{ij,t2}$ son yıl itibarıyla aynı kalemindeki ihracatı ve $t2 - t1$ yıllar arasındaki süredir. (Damodaran, 2002; UNCTAD, 2024) Bu metrik, Türkiye'nin ihracat büyüme hızını diğer pazar liderleriyle karşılaştırmak ve sektörün potansiyelini zaman boyutunda incelemek için kullanılmıştır.

Çalışmada, "BYBO" (Bileşik Yıllık Büyüme Oranı) terimi kullanılmış ve periyodik olarak hesaplanan kaymalı büyüme hızı "Periyodik BYBO" olarak adlandırılmıştır. Periyodik BYBO, her bir yıl için son n yıllık bileşik büyüme oranını ölçer ve aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$Periyodik BYBO_t^{(n)} = \left(\frac{X_{ij,t}}{X_{ij,t-n}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (3)$$

i: İhracatçı ülke, j: İthalatçı ülke, t: Son yıl, $X_{ij,t}$: Türkiye'nin j ülkesine, GTİP kalemindeki ihracat değeri yılı (t) itibarıyla, $X_{ij,t-n}$: Aynı ülke ve GTİP kalemi için, n yıl önceki (t-n) ihracat değeri, n: Periyodik (Rolling) dönem uzunluğu; her hesaplamada son n yıl dikkate alınır (Tsay, 2010). Bu çalışmada periyod 4 yıl olarak alınmıştır.

Üçüncü olarak, Herfindahl-Hirschman Ürün Yoğunlaşma Endeksi (HHI), Türkiye'nin doğaltış ihracatının ürün bazında ne kadar yoğunlaştığını veya çeşitlendiğini ölçmek için kullanılmıştır. HHI, her bir GTİP kaleminin ihracat payının karesinin toplamı olarak hesaplanır ve şu formülle ifade edilir:

$$HHI_i = \sum_k \left(\frac{X_{ik}}{X_i} \right)^2 \quad (4)$$

i: İhracatçı ülke, k: 6'lı GTİP bazlı ürün grubu/ürün, x_{ik} Türkiye'nin doğaltış sektöründeki her bir GTİP kalemindeki ihracatı, X_i Türkiye'nin toplam doğaltış ihracatını temsil etmektedir. Endeks 0 ile 1 arasında bir değer alır; 0'a yakın bir HHI yüksek ürün çeşitliliğini, 1'e yakın bir HHI ise ihracatın birkaç ana üründe yoğunlaştığını gösterir (Herfindahl, 1950; Hirschman, 1964; Yüksel ve Zengin, 2020). Bu metrik, Türkiye'nin ürün portföyünü diğer ülkelerle karşılaştırarak rekabet gücünü değerlendirmede kullanılmıştır.

Son olarak, Pazar Yoğunlaşması (Coğrafi HHI), Türkiye'nin doğaltış ihracatının coğrafi dağılımını ölçmek için kullanılmıştır (Feenstra and Weinstein, 2017). Bu metrik, HHI formülünün ihracatın ülke bazındaki dağılımına uygulanmasıyla hesaplanmıştır. Ülkeler için ağırlık merkezleri en büyük üç şehrin nüfus ağırlıklı merkezi alınarak hesaplanmıştır.

$$HHI_i^{(coğrafi)} = \sum_k \left(\frac{X_{ij}}{X_i} \right)^2 \quad (5)$$

i: İhracatçı ülke, j: İthalatçı ülke, x_{ij} : i'nin, hedef pazar j üzerinden gerçekleştirdiği ihracat değeri, X_i : Birim i'nin toplam ihracat değeri (tüm j pazarlarının toplamı). Yüksek bir coğrafi HHI, ihracatın birkaç pazarda yoğunlaştığını, düşük bir HHI ise ihracatın farklı coğrafyalara dengeli şekilde dağıldığını gösterir. Bu analiz, Türkiye'nin ihracat pazarlarındaki risk ve fırsatlarını diğer önde gelen ülkelerle karşılaştırmak için önemli bir araç olarak değerlendirilmiştir.

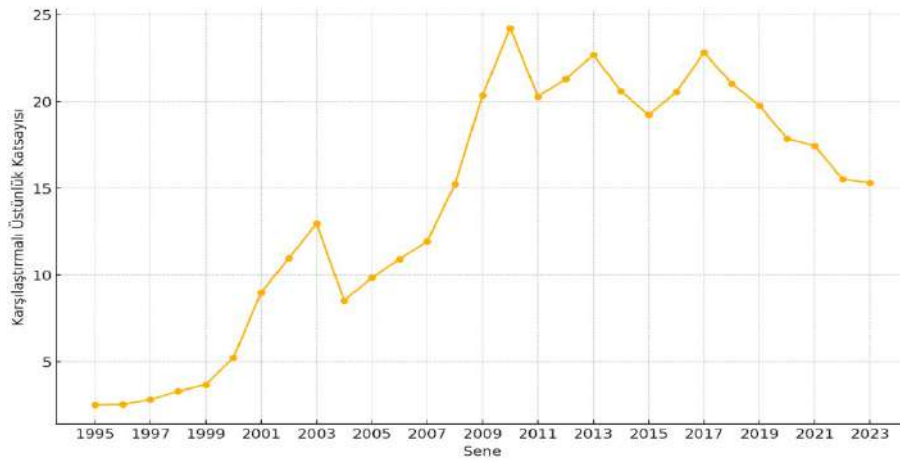
Bu çalışmada, Birleşmiş Milletler Uluslararası Ticaret İstatistikleri Veritabanı (UN Comtrade) bazlı düzenlenmiş bir veritabanı olan BACI'dan elde edilen GTİP (Gümrük Tarife İstatistik Pozisyonu, HS Code, Harmonised System Code) bazında ikili ticaret verileri kullanılmıştır. Bu veritabanları, 1995-2023 yılları arasında kapsayan geniş bir veri seti sunmakta olup her bir GTİP kalemi için ihracat miktarı ve değerini içermektedir (CEPII, 2025). Verisi sunulan yılların tamamı analize dahil edilmiştir. İkili ticaret verilerinde ticaretin gerçekleşmediği durumlar veritabanında yer almamaktadır. Ayrıca ticaret

miktarının azlığı nedeniyle miktar ya da değer olarak “0” yer alan satırlar veri temizle işlemi esnasında silinmiştir.

Veri analizi, csv uzantılı kaynak dosyalar üzerinde istatistiksel yazılımlar (Python 3.11.6; pandas, numpy, matplotlib kütüphaneleri) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, Türkiye’nin doğaltaş sektöründeki rekabet potansiyelinin gerçekleşenden daha yüksek olduğunu destekleyen argümanı güçlendirmek amacıyla tablolar ve grafikler aracılığıyla sunulmuştur. Bu metodoloji, sektörün güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koyarak Türkiye’nin küresel pazardaki konumunu diğer lider ülkelerle kıyaslamayı ve rekabet avantajını artırmaya yönelik stratejiler geliştirmeyi hedeflemektedir. Araştırma kapsamında ürünler, 6 haneli GTİP’lere (6 digit HS Code) göre iki ana grupta sınıflandırılmıştır: işlenmiş doğaltaş ve blok doğaltaş. Analizde kullanılan 6 haneli HS kodları, İstanbul Maden İhracatçıları Birliği işteğal listesinden yola çıkılarak şu şekilde ele alınmıştır: İşlenmiş doğaltaş için 680100, 680210, 680221, 680223, 680229, 680291, 680292, 680293, 680299, 680300; Blok doğaltaş için ise 251400, 251511, 251512, 251520, 251611, 251612, 251620, 251690. Bu kodlar, ilgili ürün kategorilerinin kapsamlı bir şekilde temsil edilmesini sağlamak ve sınıflandırmada tutarlılığı korumak amacıyla seçilmiştir. Tüm ticaret akışı hesaplamaları ve analizler, bu ürün grupları temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, küresel ticaret bağlamında işlenmiş doğaltaş ve blok doğaltaşın yapılandırılmış bir şekilde karşılaştırılmasını mümkün kılmıştır. BACI veritabanı, güvenilirliği ve ayrıntılı veri sunma kapasitesi nedeniyle tercih edilmiş olup ülkeler arası ve zaman içindeki ticaret hacmi ve değerlerinin hassas bir şekilde izlenmesini sağlamıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Blok Doğaltaş İhracatında RCA Analizi



Şekil 1. Yıllara Göre Blok Doğaltaş Karşılaştırmalı Üstünlük Katsayıları

Türkiye’nin blok doğaltaş ihracatındaki karşılaştırmalı üstünlük (RCA, Revealed Comparative Advantage) değerleri, 1995–2023 döneminde inişli çıkışlı bir seyir izleyerek sektörün hem iç dinamiklerini hem de küresel piyasalardaki dalgalanmaları çarpıcı biçimde yansıtmaktadır. İlk yıllarda, 1995 itibarıyla 2,50’la başlayan RCA, Türkiye’nin blok doğaltaşlarda daha az rekabetçi olduğu dönemi temsil ederken, küresel pazarlarda yeni pazar payı arayışlarının ilk adımları olarak okunabilir. Ardından gelen beş yılda RCA’nın kademeli olarak 3,68’e yükselmesi, sektördeki kapasite artırımını, işletme ölçeğinin genişlemesi ve özellikle İtalya, İspanya gibi geleneksel taş üreticilerine alternatif arayan alıcı ülkelerdeki pazarlama faaliyetlerinin artmasıyla ilişkilendirilebilir.

Cizelge 1. Yıllara Göre Blok Doğaltaş Karşılaştırmalı Üstünlük Katsayıları

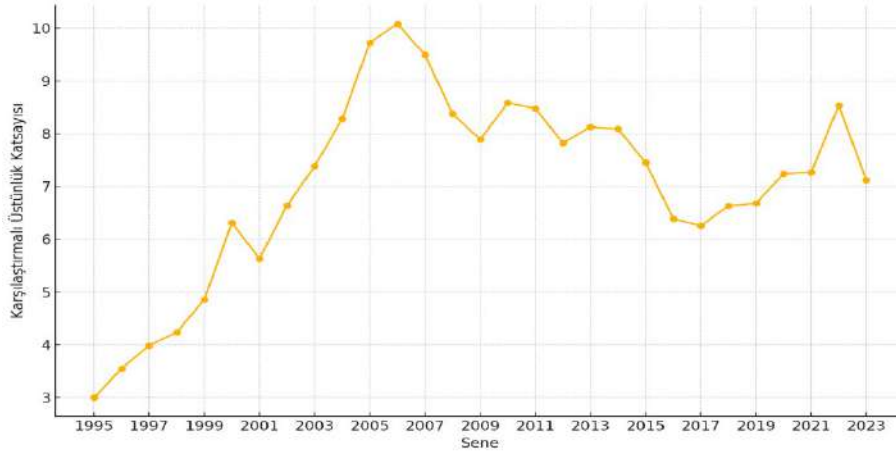
1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
2,50	2,54	2,82	3,31	3,68	5,25	8,99	10,97	12,96	8,52	9,84	10,92	11,93	15,23	20,34
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
24,22	20,27	21,28	22,68	20,58	19,22	20,54	22,81	21,03	19,75	17,86	17,44	15,53	15,30	

2000 yılına gelindiğinde RCA'nın 5'in üzerine tırmanması, Türkiye'de o dönemde artan yatırımların ve sektörel kümelenmenin dışa açılmasını hızlandıran bir eşik görevi gördü. Blok doğaltaş işletmelerinin makine parklarını yenilemesi, çoğunlukla mermer ve traverten gibi ürünlerin kalite standardını yakalaması hem fiyat rekabeti hem de teslimat sürelerinde iyileştirmeler sağlamış, bu da dünya pazarındaki payı hızlıca yukarı taşımıştır (Tosun ve Tatar, 2007). Özellikle 2001'de 8,99'a ulaşan RCA, 2002–2003 dönemindeki 10,97 ve 12,96 değerleriyle sektörün bir anlamda olgunlaşma evresine geçtiğini, altyapı ve lojistik yatırımlarının karşılığını aldığını gösterir. Bu yıllarda Antalya ve Afyon civarındaki üreticilerin limanlara yakınlıktan faydalanarak ihracat maliyetlerini düşürmeleri, Türkiye'nin blok doğaltaş dengesini küresel ölçekte güçlendirmiştir. 2004'te 12'ler civarındaki bu yükselişin yaklaşık dört puan gerileyerek 8,52'ye düşmesi, o yıl dünya genelinde inşaat sektöründe yaşanan yavaşlamanın ve özellikle Orta Doğu'da talep kaymasının bir yansımasıdır. Aynı yıl Türkiye iç talebinde de döviz kurlarındaki dalgalanmalar ve kreditor bankaların inşaat sektörüne verdiği kredilerdeki sıkılaşma nedeniyle gerileme görülmüştür. 2005–2007 arasındaki tekrar yükseliş trendi, hem küresel piyasalarda Akdeniz taşlarına yönelik artan talepten hem de Suudi Arabistan gibi yeni pazarlarla kurulan ticari ilişkilerden kaynaklanmıştır. 2007'de 11,93'e kadar çıkan RCA, Türkiye'nin blok doğaltaş sektöründe ihracat çeşitliliğini artırmayı başardığına işaret eder.

2008'de kırılgan finansal piyasalara rağmen sektörün 15,23 ile tüm dönemlerin ikinci en yüksek değerine erişmesi, Türkiye'nin kriz öncesi enerji maliyetlerinin göreceli düşüklüğü ve inşaat malzemelerine yönelik stok takviyelerinin yoğunlaşmasıyla izah edilebilir. 2009 ve 2010'da sırasıyla 20,34 ve 24,22'ye çıkan RCA, finansal krizin yarattığı stok tercihleri ve tedarik güvenliği arayışının, alıcı ülkeleri Türkiye'ye yönelttiğini gösterir. Aynı zamanda Türkiye içindeki teşvik paketlerinin de ihracatçı firmalara likidite desteği sunması, sektörü küresel konjonktürde bir nevi sığınak haline getirmiştir. 2011'den itibaren ise 20,27'ye gerileyen RCA, Ortadoğu'daki siyasi istikrarsızlıkların, Rusya kaynaklı doğalgaz krizinin ve Avrupa'da başlayan emlak balonunun etkilerini taşımıştır. 2012–2013 döneminde yakalanan 21–22 aralığı, sektörün gücünü korumaya çalıştığı ancak 2010 zirvesine ulaşmadığı bir denge noktasını temsil eder. 2014 ve 2015 yıllarında görülen 20,58 ve 19,22 seviyesindeki düşüşler, ABD ve Avrupa'daki inşaat piyasalarında talep azalışının yanı sıra Çin'in yedek kapasiteyi devreye alarak global fiyat baskısı yaratmasıyla ilişkilendirilebilir. 2016–2017'de 20,54'ten 22,81'e yükselen RCA, hem Trump dönemi ticaret politikalarındaki belirsizlikler hem de AB'nin inşaat malzemelerinde tedarik çeşitlendirmesine gitmesiyle Türkiye'nin blok doğaltaşçılarına yeni fırsatlar sunmuştur. Ancak 2018–2019'da düşüş trendinin tekrar başlaması, küresel ticaret savaşlarının lojistik maliyetleri yükseltmesi ve Brexit belirsizliğinin Avrupa'daki talepleri yavaşlatmasıyla açıklanabilir (Yıldırım ve Özkan, 2023). 2020'de 17,86'ya kadar gerileyen RCA, COVID-19'un hem tedarik zincirinde hem de inşaat sektöründeki duraksamaların blok doğaltaş ihracatına olumsuz yansımasını netleştirir. 2021–2023 döneminde 17,44, 15,53 ve 15,30 civarında seyreden RCA değerleri, pandemi etkilerinin kalıcı izlerini ve enerji-lojistik maliyetlerindeki artışla birlikte tedarik pazarlarının yeniden yapılanma sürecini göstermektedir. Sonuç olarak, Türkiye blok doğaltaş sektörü, 1995'ten bu yana çok yüksek dalgalanmalar yaşasa da uzun soluklu olarak karşılaştırmalı üstünlüğünü korumuş; ancak 2010 zirvesinden bu yana giderek daha hassas bir pozisyona oturmuştur. Ortadoğu, Kuzey Amerika ve Uzak Doğu'da yeni lojistik koridorların devreye alınması, ürün kalitesi ve katma değerın yükseltilmesi, yeşil üretim sertifikasyonları ve dijital pazarlama kanallarıyla hedef pazar derinliğinin artırılması, sektörün önümüzdeki dönemde RCA değerini tekrar yükseltebilmesi için kritik önem taşımaktadır. 2005-2024 yılları arasında küresel blok mermer ihracatındaki ülke payları, önemli değişimler göstermiştir. Türkiye,

2005'te %7,1 olan payını 2017'de %25,9'a yükselterek lider konuma ulaşmış, ancak 2024'te %19,5'e gerilemiştir. Hindistan, genellikle %15-25 bandında seyreden payıyla güçlü bir oyuncu olmuş, 2020'de %25,5 ile zirve yaptıktan sonra 2024'te %16,7'ye düşmüştür. İtalya, %9,9-%12,8 aralığında istikrarlı bir paya sahipken, İspanya %15,3'ten %3,4'e keskin bir düşüş yaşamıştır. Brezilya, Yunanistan ve Portekiz gibi ülkeler %2-6 civarında düşük ancak istikrarlı paylar korumuştur. Genel olarak, küresel pazarda Türkiye ve Hindistan öne çıkarken, İspanya ve İtalya'nın payları azalmış, diğer ülkeler ise küçük ama sabit roller üstlenmiştir.

İşlenmiş Doğaltaş İhracatında RCA Değerlendirmesi



Şekil 2. Yıllara Göre İşlenmiş Doğaltaş Karşılaştırmalı Üstünlük Katsayıları

Türkiye'nin işlenmiş doğaltaş ihracatında da 1995–2023 dönemine dair RCA değerleri, küresel talep dinamikleri ve iç kapasite gelişimini net bir biçimde yansıtmaktadır. 1995'te 3,00 civarında başlayan RCA, özellikle 1995–2000 arasında kademeli bir artış göstererek 6,31'e yükselmiştir. Bu dönemde Türkiye'de işleme tesislerinin sayısının artması, mermer ve traverten gibi yüksek katma değerli ürünlere yönelik kalite standartlarının yakalanması ve ana pazar konumundaki Avrupa ülkelerinde artan talep rol oynamıştır. 2001–2003'teki küçük dalgalanmalar daha çok hammadde tedarik koşullarındaki değişimlerden kaynaklanmıştır.

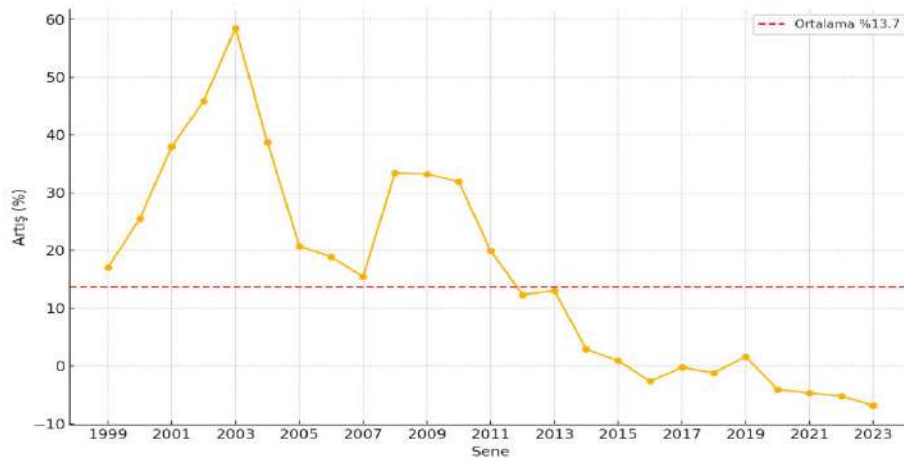
Çizelge 2. İşlenmiş Doğaltaş Karşılaştırmalı Üstünlük Katsayıları

1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
3,00	3,55	3,99	4,23	4,86	6,31	5,63	6,64	7,38	8,28	9,73	10,08	9,49	8,37	7,89
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
8,58	8,48	7,82	8,12	8,09	7,45	6,39	6,26	6,63	6,68	7,24	7,27	8,53	7,12	

2004–2006 döneminde 8,28'den 10,08'e kadar çıkan RCA, hem Orta Doğu'daki altyapı projelerinin hem de Kuzey Amerika'daki yeniden yapılanma taleplerinin sonucu olarak yükseldi. 2007–2009'da hafif gerilemeler görülse de 2010'da 8,58'e dönüş, finansal krizin ardından stok yenileme hareketliliğinin ihracatı desteklediğini göstermiştir. 2011–2013 dönemindeki 8,48–8,12 aralığı hem Avrupa'daki inşaat sektörünün yavaşlaması hem de Çin ve Hindistan gibi düşük maliyetli rakiplerin kapasite artışından etkilenmiştir. 2014–2015'te 8,09'dan 7,45'e gerileme, özellikle enerji maliyetleri ve lojistik sıkıntılarının işlenen mamul taş ihracatını olumsuz etkilemesiyle açıklanabilir. 2016'da 6,39'a düşen RCA, önceki döneme göre tedarik çeşitlendirme çabalarının yeterince hızlı karşılık bulamamasından kaynaklandı. Ancak 2017–2019'da 6,26–6,68 bandında küçük toparlanma, AB'deki tedarik güvenliği arayışının Türkiye'ye yönelmesinin göstergesiydi. 2020'de 7,24'e sıçrama, COVID-19'un yarattığı stok ve güvenlik kaygılarıyla doğaltaş talebinin geçici olarak canlanmasıyla izah

edilebilir. 2021–2023'te dalgalanan RCA değerleri, pandemi sonrası lojistik maliyetlerin yükselmesi ve enerji fiyatlarındaki belirsizliklerin işlenmiş doğaltaş ihracatını karmaşıktırdığını göstermektedir. Son değer olan 7,12, Türkiye'nin hala pandemi öncesi zirve seviyesinin altında kaldığını gösterir. 2005-2024 yılları arasında işlenmiş doğaltaş ihracatında ülke payları, belirgin değişimler göstermiştir. Çin, 2005'te %24,4 olan payını 2015'te %47,5'e çıkararak dominant bir konum kazanmış, ancak 2024'te %32,1'e gerilemiştir. İtalya, %21,8'lik 2024'te %14,8'e düşmüştür. Türkiye, %7,3'ten başlayarak istikrarlı bir yükselişle 2024'te %10,5'e ulaşmış, önemli bir oyuncu haline gelmiştir. Hindistan, %5,6-%9,5 aralığında kalarak istikrarlı bir pay sürdürmüştür, 2024'te %9,4 ile dikkat çekmiştir. Brezilya, %5,4-%8 bandında yer alırken, İspanya %8,9'dan %5,6'ya düşüş göstermiştir. Portekiz ise %1,7-%2,9 ile küçük ama sabit bir pay korumuştur. Genel olarak, Çin liderliğini korusa da payı azalırken, Türkiye ve Hindistan yükseliş trendinde, İtalya ve İspanya ise dalgalı bir seyir izlemiştir.

Blok Mermer İhracatında 4 Yıllık Periyodik BYBO Analizi



Şekil 3. Blok Mermer İhracatında 4 Yıllık Periyodik BYBO Analizi

1999-2023 yılları arasında Türkiye'nin blok mermer ihracatının 4 yıllık periyodik BYBO (Bileşik Yıllık Büyüme Oranı, Rolling CAGR) değerleri, tabloya göre önemli dalgalanmalar göstermiştir. 1999'da %17 olan 4 yıllık BYBO, 2003'te %58,5 ile zirveye ulaşmış, bu dönemde ihracatın hızla büyüdüğünü işaret etmiştir. Ancak 2005'te %20,7'ye gerileyen oran, 2008'de %33,4 ile tekrar yükselmiş, 2009-2010 yıllarında ise %33,2 ve %31,9 ile yüksek kalmıştır. 2014'ten itibaren değer dramatik bir şekilde düşerek %2,9'a inmiş, 2016'dan itibaren ise negatif değerler almıştır; 2020'de %-4,1, 2023'te ise %-6,9 ile ihracatta daralma gözlenmiştir. BBO (1995-2023 toplam BYBO) %13,7 olarak belirtilmiştir, bu da Türkiye'nin blok mermer ihracatının uzun vadede yıllık ortalama %13,7 büyüdüğünü gösterir. Ancak, 4 yıllık periyodik BYBO değerleri, bu büyümenin düzensiz olduğunu ortaya koyar. Özellikle 2000'li yılların başında güçlü büyüme dönemleri yaşanırken, 2010'lu yılların ortasından itibaren büyüme yavaşlamış ve son yıllarda negatife dönmüştür. Bu, küresel talep, rekabet veya piyasa koşullarında yaşanan değişimlere işaret edebilir. Özetle, Türkiye'nin blok mermer ihracatı uzun vadede büyüme de kısa vadeli dönemlerde dalgalı bir performans sergilemiştir.

Çizelge 3. Blok Mermer İhracatında 4 Yıllık Periyodik BYBO Analizi

Yıl	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
%	17	25,5	38	45,9	58,5	38,7	20,7	18,9	15,4	33,4	33,2	31,9	19,9
Yıl	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	BYBO
%	12,3	13	2,9	0,9	-2,7	-0,3	-1,2	1,6	-4,1	-4,7	-5,2	-6,9	13,7

İşlenmiş Doğaltaş İhracatında 4 Yıllık Periyodik BYBO Analizi



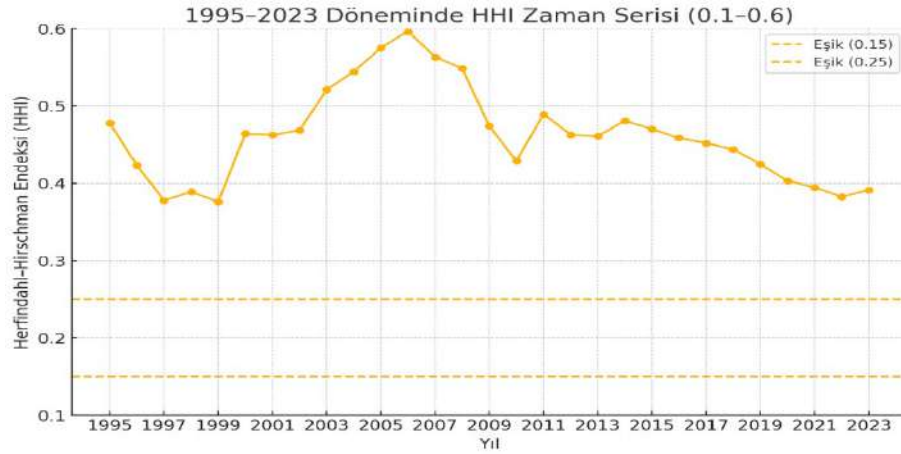
Şekil 4. İşlenmiş Doğaltaş İhracatında 4 Yıllık Periyodik BYBO Analizi

1999-2023 yılları arasında Türkiye'nin işlenmiş doğaltaş ihracatının 4 yıllık periyodik BYBO değerleri, Şekil 4'te görülmektedir. 1999'da %18,6 olan 4 yıllık BYBO, 2005'te %43,8 ile zirveye ulaşmış, bu dönemde ihracatın oldukça hızlı büyüdüğünü göstermiştir. Ancak 2008'den itibaren büyüme hızı yavaşlamış, 2009'da %2,2'ye, 2010'da ise %-0,5 ile negatife dönmüştür. 2013'te %8,5 ile toparlanma gözlenirse de 2017 ve 2018 yıllarında sırasıyla %-5,7 ve %-5,3 ile ihracatta daralma yaşanmıştır. 2020'den itibaren BYBO tekrar pozitifte dönmüş, 2022'de %11,2 ile güçlü bir büyüme kaydetmiş, 2023'te ise %7 olarak devam etmiştir. BYBO (1995-2023 toplam BYBO) %11,2 olarak belirtilmiştir, bu da Türkiye'nin işlenmiş doğaltaş ihracatının uzun vadede yıllık ortalama %11,2 büyüdüğünü gösterir. 4 yıllık yuvarlanan BYBO değerleri, bu büyümenin dönemsel olarak dalgalı olduğunu ortaya koyar. 2000'li yılların başında güçlü bir büyüme trendi izlenirken, 2010'lu yıllarda inişli çıkışlı bir performans sergilenmiş, son yıllarda ise toparlanma işaretleri görülmüştür. Bu dalgalanmalar, küresel pazar dinamikleri, rekabet veya ekonomik koşullardaki değişimlerden kaynaklanabilir. Özetle, Türkiye'nin işlenmiş doğaltaş ihracatı uzun vadede istikrarlı bir büyüme gösterse de kısa vadeli dönemlerde değişken bir seyir izlemiştir.

Çizelge 4. İşlenmiş Doğaltaş İhracatında 4 Yıllık Periyodik BYBO Analizi

Yıl	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
%	18,6	18,3	14,5	23	29,8	34,2	43,8	38,1	31,3	19	2,2	-0,5	-3,7
Yıl	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	BYBO
%	-1,6	8,5	6,9	3,6	-1,6	-5,7	-5,3	-2,8	2	8,2	11,2	7	11,2

İşlenmiş Doğaltaş İhracatında HHI Analizi

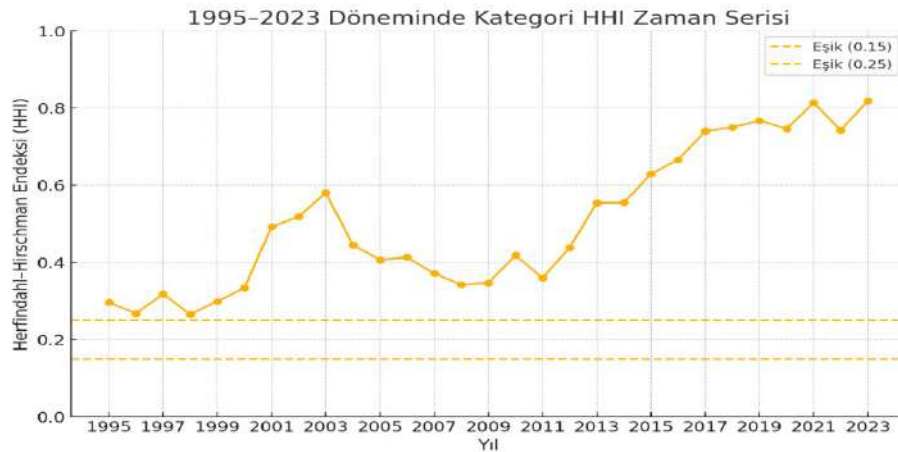


Şekil 5. İşlenmiş Doğaltaş İhracatında Ürün dağılımlı HHI Analizi

HHI, bir ürün portföyünün veya pazarın yoğunlaşma düzeyini nicelleştiren bir endekstir; değer in sıfıra yakın olması çeşitliliğin, bire yakın olması ise yoğunlaşmanın yüksekliğinin göstergesidir. Rekabet politikalarında $HHI < 0,15$ düşük yoğunluk, $0,15-0,25$ arası orta yoğunluk ve $HHI > 0,25$ yüksek yoğunluk bölgeleri olarak kabul edilir. Türkiye'nin işlenmiş doğaltaş ihracatı için 1995–2023 döneminde hesaplanan HHI değerleri $0,38-0,60$ arasında seyretmiş; bu aralık, söz konusu ihracatın halen yüksek yoğunluk bölgesinde kaldığını, birkaç ürün tipine bağımlılığın sürdüğünü göstermektedir. Özellikle 1995–2006 arasında HHI'nin $0,48$ 'den $0,60$ 'a yükselmesi, ihracat portföyünde belirli alt grupların baskın rol oynadığını; 2007'den 2022'ye kadar gözlenen $0,56$ 'dan $0,38$ 'e gerileme ise işleme teknolojileri, yüzey işlemleri ve pazar çeşitlendirme stratejileriyle portföyde görece bir genişleme sağlandığını ortaya koymaktadır.

2023'teki hafif artış ($0,38$ 'den $0,39$ 'a) ise yüksek yoğunluğun kısmen korunduğunu işaret eder. HHI'nin önce $0,25$ eşikinin altına inmesi, ardından ideal olarak $0,15$ 'in altına çekilmesi için yeni ürün tasarımları, niş uygulamalar ve farklı işleme tekniklerinin geliştirilmesi hem ihracat riskini dağıtıcı hem de rekabet gücünü güçlendirici bir yaklaşım olarak önerilmektedir.

Blok Doğaltaş İhracatında HHI Analizi

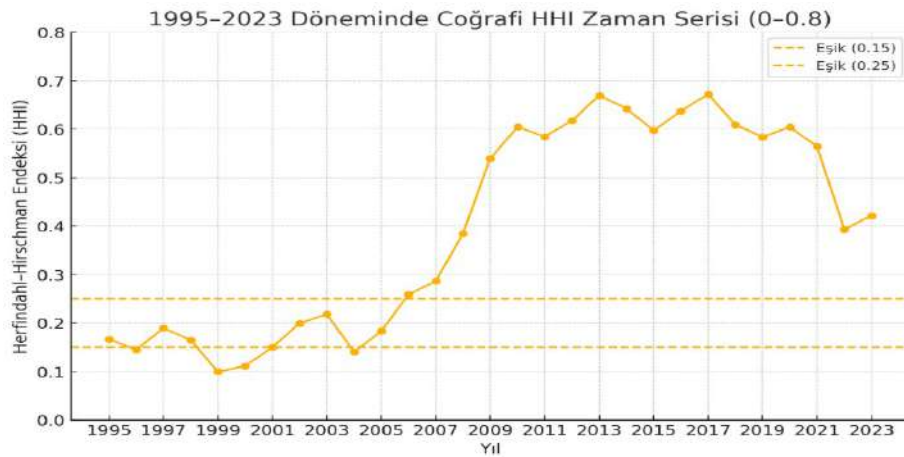


Şekil 6. Blok Doğaltaş İhracatında Ürün dağılımlı HHI Analizi

HHI, bir ürün grubunun yoğunlaşma düzeyini nicelleştiren bir endeks olarak, 0,15'in altını düşük yoğunluk, 0,15–0,25 aralığını orta yoğunluk, 0,25'in üzerini ise yüksek yoğunluk olarak sınıflandırır. Blok doğaltaş ihracatına ilişkin 1995–2023 HHI değerleri, 1995'te 0,30 civarında başlayıp 2000'e kadar hafif dalgalandıktan sonra 2001'den itibaren hızla yükselmiş ve 2003'te 0,58'e, 2006'da 0,41'e, 2013'te 0,55'e ulaşmıştır. Özellikle 2015–2023 döneminde HHI değerleri 0,63–0,82 bandında seyrederek blok ihracatının giderek birkaç kalem arasında yoğunlaştığını ve ürün portföyündeki çeşitliliğin büyük oranda azaldığını göstermektedir. 2001–2003 arasındaki ani artış, mermer blok ihracatının hem hacim hem de değer olarak granite kıyasla çok daha hızlı yükselmesinden kaynaklanmıştır. Mermer blok, Çin'in sektörde hızlı yükselişiyle talep patlaması yaşarken, granit blok ihracatı aynı hızda büyümemiştir. Bu dengesiz büyüme, toplam blok ihracatı içinde mermerin payını artırmış ve HHI'sı 0,50–0,60 bandına taşımıştır. 2013 sonrası dönemde, mermer blok ihracatının farklı coğrafi bölgelere yayılması ve yüksek değerli projelerde kullanımı, granit blokun daha yavaş büyümesiyle birleşince HHI 0,70–0,82 aralığına ulaşmıştır. Bu seviye, blok doğaltaş ihracatının “yüksek yoğunluk” kategorisinin çok ötesinde olduğunu ve portföyün büyük ölçüde mermer blok gibi birkaç alt kaleme bağımlı olduğunu ortaya koyar.

Bu yoğunlaşmayı azaltarak HHI'sı 0,15–0,25 aralığına indirmek için çeşitlendirme stratejileri mermer, granit ve traverten gibi alternatif taşların rezerv sınırlamaları dikkate alınarak şekillendirilmelidir. Bu taşların ihracatını artırmak, rezervler yetersizse mümkün olmayabilir. Bu noktada, endeksin düşürülmesi için en olası strateji blok olarak ihraç edilmekte olan mermer ürünlerin iç pazarda katma değerlendirilmesine odaklanılarak işlenmiş doğaltaşlar ve yenilikçi taş ürünleri için yaratılacak imkan ve pazarlar olacaktır.

Blok Doğaltaş İhracatında Coğrafi HHI Analizi



Şekil 7. Blok Doğaltaş İhracatında Coğrafi HHI Analizi

Coğrafi HHI, ihracatın hangi ülkelere veya bölgelere ne ölçüde yoğunlaştığını gösterir; değer 0,15'in altında olması coğrafi çeşitliliğin yüksek, 0,15–0,25 arasında orta düzeyde, 0,25'in üzerinde ise ihracatın belirli birkaç pazara yoğunlaştığı anlamına gelir. Söz konusu blok doğaltaş coğrafi HHI verileri şu eğilimi ortaya koyuyor:

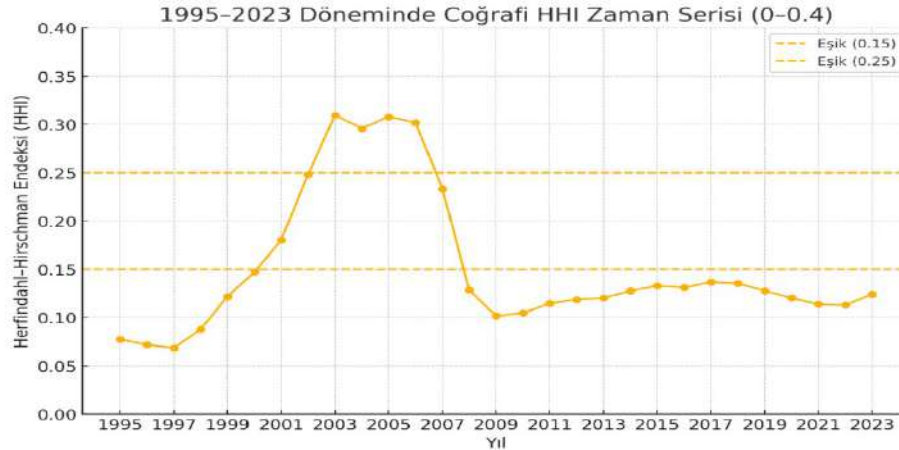
1995–2000 döneminde HHI 0,10–0,19 bandında dalgalanarak düşük ila orta yoğunluk aralığında seyretmiş; bu, blok doğaltaş ihracatının çok sayıda pazara göreceli olarak dengeli dağıldığını, hiçbir alıcının baskın olmadığını gösterir. 2001–2005 arasında ise HHI'nın 0,15–0,26 aralığına tırmanması, belli bazı pazarlara (örneğin yakın coğrafyadaki komşu ülkeler veya geleneksel alıcılar) yönelik satışların görece ağır bastığını işaret eder. 2006'dan itibaren HHI değerleri keskin biçimde yükselmeye başlamış ve 2013'te 0,67'ye, 2017'de 0,67'ye kadar çıkarak “yüksek yoğunluk” bölgesinde kalıcı bir

konum kazanmıştır. Bu hızlı artış, Çin'in işlenmiş doğaltaş sektöründeki olağanüstü büyümesi ve beraberindeki yüksek hammadde talebiyle yakından ilişkilidir. Örneğin, Başıyigit (2021), Türkiye'nin maden ihracatındaki Çin bağımlılığının "çoğunlukla tek taraflı" olduğunu; Çin'in alternatif tedarikçiler bulmasının ya da iç işleme kapasitesini artırmasının kolay olduğu, oysa Türkiye'nin katma değer elde etme fırsatını kaybetme riskiyle karşı karşıya olduğu uyarısında bulunur. Çin'deki yeni altyapı, inşaat ve mimari projelerde mermer ve granit gibi blok hammaddesinin işlenmesi yoğunlaştıkça, Türkiye'den yapılan blok doğaltaş sevkiyatlarının büyük bölümü doğrudan Çin pazarına yönelmiş; bu da coğrafi HHI'nın hızla yükselmesine neden olmuştur. 2018–2021 arasında HHI yaklaşık 0,58–0,60 bandında tutunurken, 2022'de değer 0,39'a gerileyerek coğrafi çeşitlilikte geçici bir artış olduğunu gösterdi; Çin'in hammadde tedarikinde yerel kaynak kullanımını çeşitlendirmesi ve ülkede inşaat sektörünün daralması ile ilgilidir. 2023'te HHI tekrar 0,42'ye yükselerek, Çin'in blok doğaltaş ithalatındaki ağırlığını kısmen koruduğunu ortaya koyuyor. Çin Halk Cumhuriyeti, Türkiye'nin blok doğaltaş üreticileri için önemli bir alıcı ülke konumundadır.

Ancak, pandemi sonrası dönemde Çin ekonomisi eski büyüme hızlarına ulaşmakta zorluk yaşamaktadır. Beklenen toparlanma henüz gerçekleşmemiş, konut sektöründeki kriz ve buna bağlı kredi sorunları inşaat malzemesi alımlarını azaltmıştır. Bunun yanı sıra, Çin'in farklı bölgelerde yeni ocaklar açarak kendi üretimini artırması, ithalata olan bağımlılığını azaltma yönünde bir eğilim yaratmıştır. Bu gelişmeler, Türkiye'nin doğaltaş sektörü ve üreticileri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

Sonuç olarak, coğrafi HHI'daki uzun süreli yüksek değerler, blok doğaltaş ihracatının giderek Çin gibi tek bir pazara bağımlı hale geldiğini; çeşitliliği artırmak için yeni pazar arayışları ve alternatif alıcı bölgelerine yönelik stratejik pazarlama çabalarının önemini vurgulamaktadır.

İşlenmiş Doğaltaş İhracatında Coğrafi HHI Analizi



Şekil 8. İşlenmiş Doğaltaş İhracatında Coğrafi HHI Analizi

1995–2000 arasında Türkiye'nin işlenmiş doğaltaş için HHI değeri 0,07–0,15 bandında seyrederek düşük yoğunluk bölgesine işaret etmiş; bu dönemde ABD, Suudi Arabistan ve Irak gibi büyük pazarlar hızla yükselirken bile diğer alıcıların payı toplam ihracata henüz baskınlık kurmamıştı. 2001–2004'te HHI'nın 0,18–0,31'e tırmanması, üç ana pazarın payının artışıyla orta-üst yoğunluk bölgesine geçildiğini gösterir. Ancak 2005'ten itibaren özellikle 2008–2012 döneminde küçük ve niş pazarlardaki pay artışı, coğrafi HHI'nın tekrar 0,10–0,13 aralığına düşmesine yol açmıştır. Bu düşüş, işlenmiş doğaltaş ihracatının ABD, Suudi Arabistan ve Irak'a bağımlılığının azaldığı; Avrupa, Uzak Doğu ve Afrika'daki daha geniş alıcı portföyünün devreye girdiği anlamına gelir. 2023'te HHI'nın 0,12'ye hafifçe yükselmesi, ana pazarlarda görülen dalgalanmaların yeni, orta ölçekli pazarlardaki çeşitlenmeyle dengelendiğini ve coğrafi çeşitliliğin halen yüksek seviyede korunduğunu ortaya koymaktadır.

SONUÇ

Türkiye, sahip olduğu zengin doğaltaş rezervleri ve entegre üretim altyapısıyla küresel doğaltaş sektöründe önemli bir aktör konumundadır. 1995-2023 dönemi analizleri, Türkiye'nin blok ve işlenmiş doğaltaş ihracatında karşılaştırmalı üstünlüğünü genel olarak koruduğunu, ancak bu üstünlüğün dönemsel dalgalanmalara ve küresel piyasa dinamiklerine bağlı olarak hassas bir dengede seyrettiğini ortaya koymaktadır. Blok mermer ihracatında 2009-2010 yıllarında ulaşılan yüksek RCA değerleri (20,34 ve 24,22), sektörün altın çağını yansıtırken, 2010 sonrası dönemde Çin'deki talep yavaşlaması, enerji ve lojistik maliyetlerindeki artışlar ile pandemi kaynaklı tedarik zinciri aksamaları, büyüme hızını sınırlamıştır (Adıgüzel ve Şengüler, 2019; Yalçın ve Bakan, 2021). İşlenmiş doğaltaş ihracatında ise RCA değerleri daha istikrarlı bir seyir izlemiş, ancak pandemi sonrası dönemde enerji maliyetleri ve küresel rekabet nedeniyle 2006 zirvesine (10,08) ulaşılammıştır. Çin Halk Cumhuriyeti kaynaklı talebin küçülmesi coğrafi yoğunluk ve ürün yoğunluğunun yüksek olmasının tehlikelerini daha ön plana çıkarmaktadır. Ürün sofistیکasyonunun yükseltilmesi ve yurtiçinde sektörün katma değer kazanımının artması hem safi ekonomik kaynak hem de coğrafi yoğunlaşma ile ürün yoğunlaşması açısından en pozitif yol olarak öne çıkmaktadır.

HHI analizleri, blok doğaltaş ihracatında ürün portföyünün giderek mermer bloklara bağımlı hale geldiğini ve çeşitliliğin azaldığını (HHI: 0,63-0,82) göstermektedir. İşlenmiş doğaltaşta ise portföy çeşitliliği relatif olarak daha yüksek olsa da (HHI: 0,38-0,60), yüksek yoğunluk bölgesi devam etmektedir. Coğrafi HHI sonuçları, blok doğaltaş ihracatının Çin pazarına aşırı bağımlı olduğunu (HHI: 0,42-0,67), işlenmiş doğaltaşta ise daha dengeli bir pazar dağılımı sağlandığını (HHI: 0,07-0,31) ortaya koymaktadır. Periyodik BYBO analizleri, blok mermer ihracatında 2010'lu yılların ortasından itibaren büyümenin yavaşladığını ve son yıllarda negatife döndüğünü (%-6,9), işlenmiş doğaltaşta ise son dönemde toparlanma işaretleri gözlemlendiğini (%7) göstermektedir.

2024 perspektifinde, Türkiye doğaltaş sektörü hem fırsatlar hem de zorluklarla karşı karşıyadır. Sektör, sürdürülebilirlik odaklı küresel talep artışı, Kuzey Amerika, Uzak Doğu ve Afrika gibi yeni pazarlara erişim potansiyeli ile dijital pazarlama ve lojistik koridorlarındaki yeniliklerden önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak, enerji ve lojistik maliyetlerindeki artış, Çin ve Hindistan gibi düşük maliyetli rakiplerin rekabet baskısı, yeşil üretim standartlarına uyum gerekliliği ve blok doğaltaşta pazar bağımlılığı gibi zorluklar sektörün önünde engel oluşturmaktadır. Uluslararası rekabet gücünü artırmak için işlenmiş ve niş ürünlere yönelik Ar-Ge yatırımlarıyla ürün portföyünü çeşitlendirmek, özellikle yüksek değerli yüzey işlemleri ve özel tasarımlara odaklanmak önem taşımaktadır. Başyigit (2021), "Çin'e pazar bağımlılığı"nın olumsuz etkiler doğuran bir durum olarak açıkça tanımlar ve Türkiye'nin bu riski hafifletmesi gerektiğini vurgular. Bunun için Hindistan gibi alternatif büyük pazarların geliştirilmesi; AB, Orta Doğu ve Kuzey Amerika gibi mevcut pazarlarla yeniden etkileşime girilmesi ve Türk doğaltaşlarının yeni ortaya çıkan bölge pazarlarında tanıtılması önerilir. Suudi Arabistan'daki toparlanma ve diğer Asya pazarlarındaki büyüme, diplomatik ve ticari çabaların talebi çeşitlendirilmiş lokasyonlarda canlandırabileceği fikrini destekler. Orijinal çalışmanın 2024 ve sonrasında pazar çeşitlendirme stratejilerinin yoğunlaştırılması yönündeki tavsiyesi de bu trendlerle güçlü biçimde doğrulanmaktadır. Aynı zamanda, Çin'e olan bağımlılığı azaltmak için ABD, Avrupa ve Afrika gibi yeni pazarlara yönelik hedefli pazarlama ve ticaret anlaşmaları geliştirilmelidir. Yeşil üretim süreçlerine yatırım yaparak uluslararası standartlara uyum sağlamak ve çevre dostu ürün sertifikasyonları edinmek, sektörün sürdürülebilirlik odaklı taleplere yanıt vermesini sağlayacaktır. Dijital pazarlama kanallarını güçlendirmek, e-ticaret platformlarını etkin kullanmak ve yeni lojistik koridorlarla teslimat sürelerini optimize etmek de rekabet avantajı yaratacaktır. Ayrıca, ürün çeşitliliğini güçlendirmek, sektörün uzun vadeli büyümesine katkı sağlayacaktır. Türkiye, doğaltaş sektöründe küresel avantajını sürdürebilmek için rezervlerini, teknolojik altyapısını ve stratejik pazarlama yaklaşımlarını entegre bir şekilde kullanmalıdır. Bu stratejiler, sektörün hem mevcut zorlukları aşmasını hem de 2024'ten sonrası için yeni fırsatları değerlendirmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Adıgüzel, M., & Şengüler, M. (2019). Türkiye mermer sektörünün ve rekabet gücünün incelenmesi. Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi, 54(3), 1530–1546.
- Balassa, B. (1965). Trade liberalisation and “revealed” comparative advantage. The Manchester School, 33(2), 99–123.
- Başıyigit, M. (2021). Contribution and/or dependency: Chinese hegemony on Turkey’s mineral export. Resources Policy.
- CEPII. (2025). BACI International Trade Database (HS92 1995–2023, Version 202501; updated January 30, 2025). Veri kümesi. https://www.cepii.fr/CEPII/en/bdd_model/presentation.asp?id=37
- Damodaran, A. (2002). Investment valuation: Tools and techniques for determining the value of any asset (2nd ed.). Wiley.
- Feenstra, R. C., Weinstein, D. E. (2017). Globalization, markups, and US welfare. Journal of Political Economy, 125(4), 1040–1074.
- Global Trade Magazine. (2021). Turkey’s marble and travertine exports slump as China and India reduce purchases. Global Trade Magazine. <https://www.globaltrademag.com/turkeys-marble-and-travertine-exports-slump-as-china-and-india-reduce-purchases/>
- Kokarcalı, U., Köksal, M. (2021). Türkiye’de doğaltaş sektörü ihracatını etkileyen makroekonomik faktörler. İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 4(2), 183–198.
- StoneNews.eu. (2019). Turkey’s marble blocks and slabs exports to China-2019 first half growth. <https://stonenews.eu/turkeys-marble-blocks-slabs-exports-china-2019-first-half-growth/>
- Tosun, A., Tatar, Ç. (2007). Investigation on the possibilities to increase marble export of Turkey. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 9(3), 13–20.
- Tsay, R. S. (2010). Analysis of financial time series (3rd ed.). Wiley.
- United Nations Conference on Trade and Development. (2024). Trade analysis and data manual (Methodological notes). UNCTAD.
- Yalçın, T., Bakan, S. (2021). Türkiye’nin rekabet gücünün açıklanmış karşılaştırmalı üstünlükler yöntemiyle analizi (2005-2018 dönemi). Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 6(2), 98–114.
- Yıldırım, S. C., Özkan, T. (2023). The effect of macro environmental elements on sales, marketing and export in the natural stone (marble) sector in Türkiye. Pressacademia Business and Economics Journal, 17(11), 73–77.
- Yılmaz, B. (2022, Mayıs). Trade relations between China and Turkey: A comparison with the European Union: Could China be an alternative to Turkey’s trade relations with the European Union? (SWP Working Paper No. 01, Research Division Asia). Stiftung Wissenschaft und Politik.
- Yüksel, S., Zengin, S. (2020). Türkiye’nin dış ticaretinde coğrafi yoğunlaşma: HHI yaklaşımı. Maliye Dergisi, 179(2), 45–62.

TÜRKİYE’NİN MİKRONİZE KALSİT MİNERALİ DIŞ TİCARETİ VE GELİŞİMİ

FOREIGN TRADE AND DEVELOPMENT OF MICRONIZED CALCITE MINERAL OF TURKEY

M.S. Delibalta ^{1*}

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Türkiye

*Sorumlu yazar: msdelibalta@ohu.edu.tr

ÖZ

Kalsit; yerkürede bulunan doğal minerallerin başında gelmekte, karbonatlı sedimanter kayaçların (kireçtaşları) ve metamorfik kayaçların (mermerlerin) ana bileşenini oluşturmaktadır. Kimyasal bileşimi kalsiyum karbonat (CaCO_3) olan kalsit; değirmenlerde granüle veya mikronize boyutlara getirildikten sonra tarım, gıda, sağlık ve kimya gibi birçok sanayi dalında kaplama ve dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Türkiye’nin Çanakkale-Biga, Balıkesir-Erdek, Bursa-Orhaneli, İzmir-Tire, Muğla-Kavaklıdere ve Niğde bölgeleri çok zengin kalsit rezervlerine sahiptir. Ülkemiz zengin kalsit rezervlerine sahip olmasına rağmen, dünya kalsit üretimindeki payı sadece %1,12’dir. Türkiye 2018 yılında 36 milyon \$ ihracat ve 9 milyon \$ ithalat (net 27 milyon \$) ile dünyanın 6’ncı kalsit ihracatçı ülkesi olmuştur. Türkiye kalsit üretimi 2000 yılı başlarında 500 bin ton seviyesinden, 2024 yılına gelindiğinde 13 milyon tona yükselmiş ve yıllık tüketim miktarı da her geçen gün artmaktadır. Ayrıca; Türkiye’nin kristal oluşumlu en zengin kalsit rezervleri, Niğde Masifi Gümüşler Formasyonunda yer almaktadır. Niğde İli ihracatında %20 pay alan madencilik sektörü, aktif 54 firma ile yıllık 5.533.480 \$ ihracat yaparak 1900 kişiye istihdam sağlamaktadır. Ancak, ülkemiz kalsit ihracatı satış fiyatları (80-100 \$/ton) dünya fiyatlarına (160-190 \$/ton) göre oldukça düşük seviyededir. Bu bildiride; kalsit ihracatının Türkiye ve Niğde ekonomisindeki pazar payı ve gelişimi istatistiksel olarak incelenerek yenilikçi çözüm önerileri sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Türkiye, Niğde, doğaltaş, kalsit, ihracat.

ABSTRACT

Calcite is the most abundant minerals on earth and is the main component of carbonated sedimentary rocks (limestones) and metamorphic rocks (marbles). Calcite, whose chemical composition is calcium carbonate (CaCO_3), is used as coating and filling raw materials in many industries such as agriculture, food, health and chemistry after being brought to granulated or micronized sizes in mills. Çanakkale-Biga, Balıkesir-Erdek, Bursa-Orhaneli, İzmir-Tire, Muğla-Kavaklıdere and Niğde regions of Turkey’s have very rich calcite reserves. Although our country has rich calcite reserves, its share in world calcite production is only 1.12%. Turkey has become the 6th calcite exporting country in the world with \$36 million export and \$9 million import (net \$27 million) in 2018. The production of calcite in Turkey has increased from 500 thousand tons at the beginning of 2000 to 13 million tons by 2024, and the amount of annual consumption is increasing every day. In addition, the richest calcite reserves with crystal formation in Turkey are located in the silver formation of the Niğde Massif. The mining sector, which takes a 20% share in the exports of Niğde province, provides employment to 1900 people by exporting \$ 5,533,480 annually with 54 active companies. However, the sales prices of calcite exports in our country (80-100 \$ /ton) are quite low compared to world prices (160-190 \$ /ton). In this statement; the market share and development of calcite exports in Turkey and Niğde economy are statistically analyzed and innovative solutions are proposed.

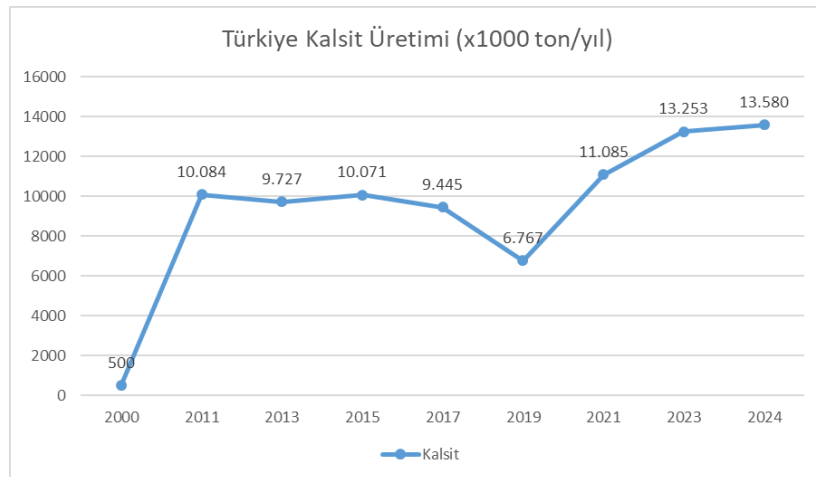
Keywords: Turkey, Niğde, natural stone, calcite, exports.

1. GİRİŞ

Kalsit; yerkabuğunda bulunan minerallerin başında gelmekte, karbonatlı sedimanter kayaçların (kireçtaşları) ve metamorfik kayaçların (mermerlerin) ana bileşenini oluşturmaktadır. Birçok cevherleşmenin gang minerali olan kalsit, hidrotermal kayaç ve karbonatitlerde görülmektedir. Ayrıca; granitlerdeki piroksen ve feldspatların alterasyonu ile oluşabilmekte, traverten, sarkıt ve dikitlerde de yer almaktadır (MTA, 2023).

Kalsit'in endüstriyel hammadde olarak kullanılabilmesi için; öncelikle kırma, öğütme, eleme-klassifikasyon, tüvenan malzemenin bileşimine bağlı olarak farklı cevher zenginleştirme (manyetik ayırma veya flotasyon) işlemlerine tabi tutulması gerekmektedir. Böylece, satışa sunulan kalsit mineralleri hem istenilen tane boyutuna hem de fiziko-kimyasal olarak homojen hale getirilmiş olmaktadır.

Kimyasal bileşimi kalsiyum karbonat (CaCO_3) olan kalsit; değirmenlerde mikron veya daha küçük boyutlara getirildikten sonra tarım, gıda, sağlık ve kimya gibi birçok sanayi dalında kaplama ve dolgu hammadde olarak kullanılmaktadır (Eroğlu vd., 2002; Şahin, 2008; Kılıç, 2015; Toraman, 2023). Türkiye kalsit minerali üretimi 2000 yılı başlarında 500 bin ton seviyesinden, 2024 yılına gelindiğinde 13 milyon tona yükselmiş (Şekil 1) ve yıllık tüketim miktarı da her geçen gün artmaktadır.



Şekil 1. Türkiye kalsit üretim miktarları ve yıllara göre değişimi (MAPEG, 2025)

Türkiye'nin Çanakkale-Biga, Balıkesir-Erdek, Bursa-Orhaneli, İzmir-Tire, Muğla-Kavaklıdere ve Niğde bölgeleri çok zengin kalsit rezervlerine sahiptir. Anadolu'nun birçok yerinde henüz rezerv tespit çalışmaları yapılmamış, potansiyel kalsit yataklarına rastlamak mümkündür. Türkiye kalsit yataklarının en belirgin özellikleri; CaCO_3 %'sinin yüksek, silis ve demir gibi empüritelerin düşük, öğütüldükten sonra beyazlık derecesinin çok yüksek olmasıdır (DPT, 2001; Yener, 2015). Ayrıca; ülkemizin en zengin kristal oluşumlu kalsitleri Niğde bölgesinde bulunmaktadır. Niğde Ticaret İl Müdürlüğü verilerine göre, kent ihracatında %20 pay alan madencilik sektörü yaklaşık 1900 kişiye istihdam sağlamaktadır. Özel sektöre ait firmalar tarafından üretilen granüle ve mikronize kalsitler yurtiçi ve yurtdışı piyasalara sunulmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Türkiye'nin küresel ölçekte kalsit minerali dış ticaret hacmi ve Niğde ili ihracat rakamları istatistiksel olarak değerlendirilerek, sektör paydaşları için yenilikçi çözüm önerileri sunulmaktadır.

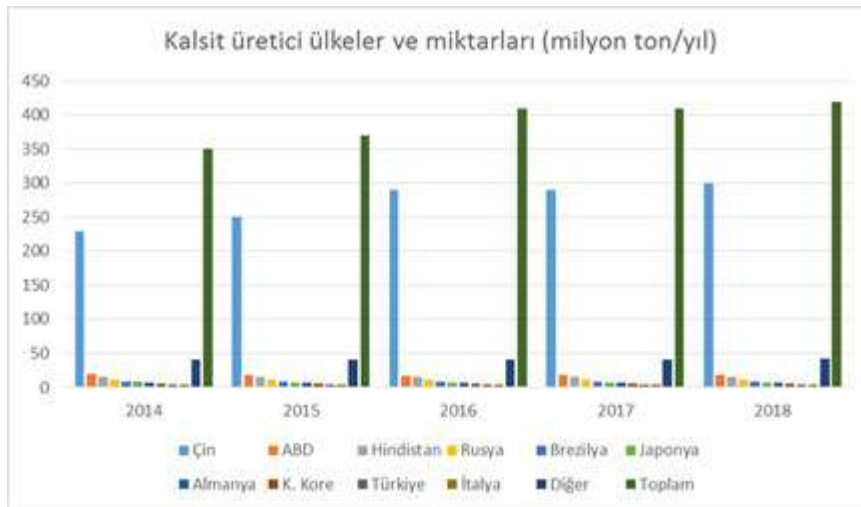
Ayrıca, aynı sektörde veya benzer mal üretiminde bulunan firma/ülke pazar payı koşulları “yoğunlaşma endeksleri” analizleri de yapılmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Türkiye’nin jeolojik olarak Alpin-Himalaya orojenik kuşağında bulunması, pek çok alterasyon / tektonizma sonucu oluşan değerli mineraller, ülkemizi maden yatakları bakımından zengin konuma getirmektedir. Türkiye 168 ülke arasında maden üretimi (ton) olarak 22’ci, değer (\$) bazında 28’inci, çeşitlilik yönünden 8’inci sırada yer almaktadır (Delibalta, 2018; TOBB, 2020). Bu sıralamadaki büyük farklılıklar; maden ihracatımızın yüksek katma değerli uç ürün yerine, daha düşük değerli ham/kaba işlenmiş cevher olarak satışından kaynaklanmaktadır. Örneğin bu fark, kalsit ihracatı fiyatlarında (ülkemiz 80-100 \$/ton, dünya 160-190 \$/ton) net olarak görülmektedir. Ancak; Türkiye hem maden potansiyeli hem de mineral çeşitliliği bakımından oldukça önemli rezervlere sahiptir. Uluslararası verilere (USGS, World Mining Data vb.) göre, 90 çeşit tabii kaynaktan 70’inin ülkemiz sınırları içinde varlığı tespit edilmiş ve bunlardan 60’a yakın madenin ihracatı yapılmaktadır. 2024 yılı doğaltaş ihracatımız, toplam maden ihracatımızda %35 pay almıştır.

3.1. Dünya Kalsit Ticareti ve Türkiye’nin Yeri

Ülkemiz zengin kalsit rezervlerine sahip olmasına rağmen, dünya kalsit üretiminin sadece %1’ini karşılamaktadır. 2018 yılı dünya kalsit üretimi 420 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Bu üretimin yaklaşık %70’ini Çin tek başına yapmaktadır. Türkiye 4,7 milyon ton kalsit üretimi ile dünyada 9’uncu sırada yer almıştır. Kalsit üretimi yapan başlıca ülkeler ve yıllara göre üretim miktarları Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Kalsit üretimi yapan önemli ülkeler ve miktarları (İMİB, 2020)

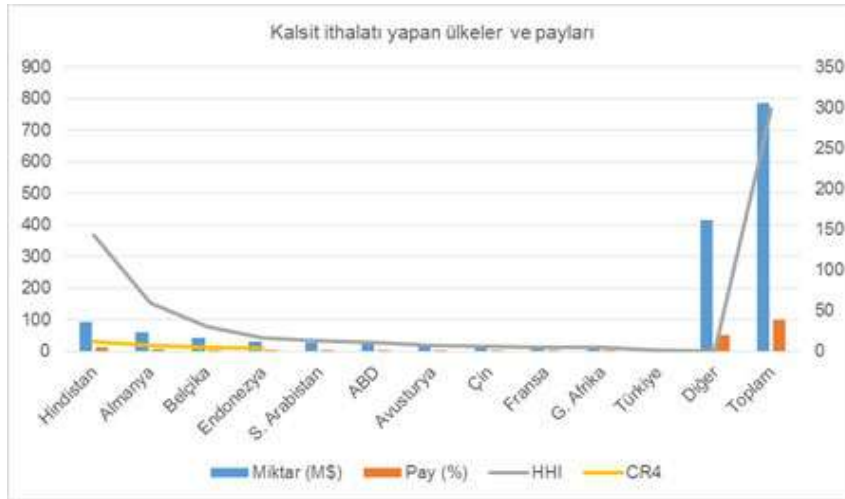
Kalsit üretimi yapan ülkelerin pazar paylarını daha yakından görebilmek için, 2018 yılı üretim miktarlarına bakmak yeterli olacaktır. Şekil 2’de görüldüğü gibi %71,43’lük pay ile Çin dünya kalsit üretimini domine etmektedir. Türkiye’nin dünya kalsit üretimine katkısı ise sadece %1,12 seviyesindedir.

2018 Yılı dünya kalsit minerali dış ticaret hacmi 786 milyon \$’lık bir büyüklüğe ulaşmıştır. Söz konusu pazarda pek çok ihracatçı ülke bulunmaktadır (Şekil 3). Türkiye 36 milyon \$’lık kalsit ihracatı ile 6’ncı sırada yer almaktadır.



Şekil 3. Kalsit ihracatı yapan önemli ülkeler ve payları

Kalsit ihracatı yapan ülke sayısının çok olması, dünya kalsit pazarını daha rekabetçi bir yapıya dönüştürmektedir. Özellikle küçük paylara sahip ihracatçı ülkeler, pazarı olumlu yönde dengede tutmaktadır. Dünya kalsit ithalatında ise, Hindistan ve Almanya ön plana çıkmaktadır (Şekil 4).

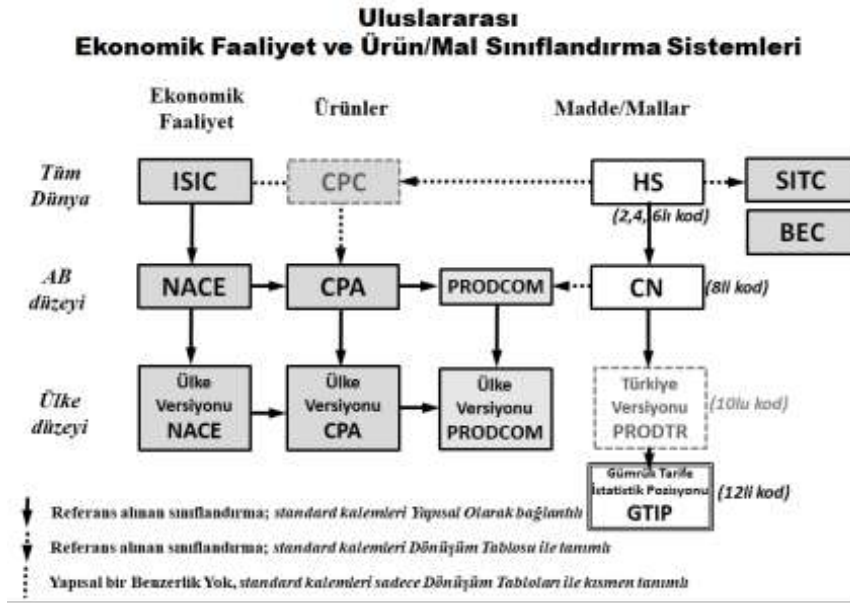


Şekil 4. Kalsit ithalatı yapan önemli ülkeler ve payları

Dünya kalsit ithalatı pazarı oldukça rekabetçi koşullara sahiptir, fakat yoğunlaşma (oligopol) görülmemektedir. Türkiye 8,74 milyon \$'lık kalsit ithalatı ile 24'üncü sırada yer almaktadır. Bu verilere göre, ülkemiz yaklaşık 36 milyon \$ ihracat ve 9 milyon \$ ithalat ile net (27 milyon \$) kalsit ihracatçısı konumundadır.

3.2. Gümrük Tarifesi ve Türkiye Kalsit Ticareti

Dünyada her türlü kıymetli taş, cevher, yarı mamul ve malların (emtia) ihracatı, ticari faaliyetin ölçeğinden bağımsız olarak gümrük tariflerinde belirlenmiş kodlar ile izlenmektedir (Şekil 5). Bu tür sınıflandırma sistemleri, uluslararası sözleşmelere taraf olan ülkelerin dış ticaret faaliyetlerinin kayıt/kontrol ve temel bilgi bankalarını oluşturmaktadır.



Şekil 5. Uluslararası ticari faaliyet ürün/mal sınıflandırma sistemleri (Zambak, 2018)

Standart Uluslararası Ticaret Sınıflaması (SITC): Yerel ve küresel dış ticaret verilerinin karşılaştırması ve toplanmasında kullanılmaktadır.

Harmonize Sistem (HS): Uluslararası gümrük teşkilatı tarafından geliştirilen, ürün dış ticaret verilerinin kontrolü için kullanılan bir sınıflamadır.

Birleştirilmiş Sınıflandırma (CN): AB ülkelerinin dış ticaret verilerinin arşivlenmesinde kullanılan bir ürün sınıflamasıdır. HS'den daha detaylı olup dönüşüm tablosu mevcuttur.

Gümrük Tarife İstatistik Pozisyonu (GTIP): CN kapsamında yapılan ulusal ürün sınıflamasıdır. CN'e 4 kod eklenerek ulusal düzeyde 12'li GTIP ürün kodlaması ile kullanılmaktadır.

Ülkemiz madencilik faaliyetleri sonucu üretilen, bazı inorganik kimyasal madde ve ürünlerde ihracat fazlası vermektedir. HS (GTIP) kodlu inorganik kimya (emtia) grubunda bulunan ve 2016 yılı ihracat değeri 20 milyon \$'ı aşan mallar; kimya (soda külü ve bor/krom kimyasalları), madencilik (çinko oksit, kalsit) ve çimento sektörü ürünlerinden oluşmaktadır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Türkiye'de ihracat fazlası veren inorganik kimyasal madde ve ürünler (Zambak, 2018)

Üretim Sektörü	HS(GTIP) Kodu	Ürün Grubu	Grup Toplamı
İnorganik Kimya	281000	Bor, borik asitler	~ 0,42 milyar \$
	283620	Sodyum karbonat	
	283630	Sodyum hidrojen / bikarbonat	
	281910	Krom trioksit	
	284130	Sodyum dikromat	
	281700	Çinko oksit / peroksit	
İnorganik Kimya (Madencilik)	251990	Erimiş, sinterlenmiş manyezit	~ 0,13 milyar \$
	283650	Kalsit (kalsiyum karbonat)	

İnorganik Kimya (Çimento sektörü)	252329 252310 252321	Portland, diğer Klinker Portland, beyaz	~ 0,45 milyar \$
Yukarıda verilen inorganik madde ve ürünlerdeki ihracat fazlası toplamı			~ 1,00 milyar \$

Çizelge 1’de görüldüğü üzere ülkemiz HS 283650 (GTIP) kodu ile kalsit minerali ihraç etmektedir. Ülkemizin 2018 yılı kalsit ihracatı yaptığı ülkeler ve % payları Şekil 6’da verilmektedir.



Şekil 6. Türkiye'nin kalsit ihracatı yaptığı ülkeler ve % payları

Ülkemiz kalsit ithalatı ise, aynı yıl 8,74 milyon \$ olarak gerçekleşmiştir. Bu ithalatın %35,13'ü sadece Belçika'dan yapılmıştır. Fransa, Almanya ve Birleşik Krallık diğer önemli ülkelerdir (Şekil 7). Türkiye kalsit ithalatı pazarında yoğunlaşma görülmekte ve oligopol bir yapı hakimdir. Bu yoğunlaşma, daha çok yüksek (nano) teknoloji kullanımı gerektiren ürün özelliklerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. Türkiye'nin kalsit ithalatı yaptığı ülkeler ve % payları

Ayrıca, Türkiye'nin kalsit ihracatı satış fiyatı dünya fiyatlarına göre oldukça düşük seviyededir (Şekil 8). Bunun nedenleri; aşırı iç rekabet koşulları ve kalsit minerallerini yüksek katma değerli ürün yerine, ham/kaba işlenmiş mineral olarak ihracat etmek gösterilebilir.



Şekil 8. Türkiye ve dünya kalsit ihracatı fiyat dağılımları (İMİB, 2020)

3.3. Niğde Kalsit İşletmeleri ve Ekonomik Önemi

Niğde ili madencilik sektöründe faaliyet gösteren firmalar incelendiğinde, öncelikli olarak kalsit işletmeleri, doğaltaş ve kum-çakıl ocakları dikkat çekmektedir. 2023 yılında coğrafi işaret ürün sertifikası ile tescil edilen Niğde kalsit işletmeleri, ülkemizin mikronize mineral üretiminde oldukça önemli bir lokasyonu haline gelmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Niğde kalsit işletmesinden genel bir görünüş

Kentte özel sektöre ait 54 firma; aktif olarak maden cevheri, endüstriyel mineraller ve yapı kimyasalları alanında üretim yapmaktadır. Söz konusu işletmeler 1 Ocak-30 Kasım 2023 tarihleri arasında 5.533.480 \$ maden ihracatı yaparak toplam 1900 kişiye istihdam sağlamıştır (Delibalta, 2009; Uçurum, 2015; Ars, 2023). Ancak; yapılacak teknolojik yatırımlar ve Ar-Ge çalışmaları ile ilin zengin kalsit madeni potansiyeli, ülke ve bölge ekonomisine daha fazla katma değer sunabilir (Şekil 10).



Şekil 10. Niğde madencilik sektörü ihracat rakamları ve % değişimi (TİM, 2023)

4. SONUÇLAR

Madenler/endüstriyel hammaddeler üretim ve kullanım ölçüsünde tükenebilen tabii kaynaklardır. Dünya tabii kaynak oluşumlarının coğrafi ve rezerv dağılımındaki farklılıklar, madenlerin uluslararası dış ticaretini gerekli kılmaktadır. Dolayısıyla, madencilik sektörü bugün küresel ölçekte aşırı rekabetçi ve stratejik bir pazar ekonomisi haline gelmiştir.

Dünyada ticareti yapılan maden/minerallerin %85’lik bölümünün varlığı ülkemizde belirlenmiş, halen 60’a yakın madenin üretim ve ihracatı yapılmaktadır. Türkiye 2024 yılı maden ihracatı, bir önceki yıla oranla %0,99 azalarak 5,745 milyar \$ gerçekleşmiştir. İhraç ürünlerimiz arasında 2,333 milyar \$ ile metalik madenler ilk sırada yer alırken, bunu 1,939 milyar \$ ile doğaltaşlar ve 1,139 milyar \$ ile endüstriyel mineraller izlemiştir (Kahraman, 2022; MAPEG, 2025). Bununla birlikte, 2024 yılı doğaltaş ihracatımız toplam maden ihracatında %35 pay ile ikinci sırada yer almıştır. Türkiye’nin de içinde bulunduğu dünya kalsit ticareti büyüklüğü, 2018 yılında 786 milyon \$ karşılığı 420 milyon ton gerçekleşmiştir. Çin 300 milyon ton ile dünya kalsit üretiminin %70’den fazlasını tek başına yapmaktadır. Yüksek iç talep/pazar dolayısıyla, Çin fazla üretim yapsa da kalsit ihracatı yapmamaktadır. Türkiye’nin dünya kalsit ticaretine katkısı ise 4,7 milyon ton ile sadece %1,12 seviyesindedir. Söz konusu pazarda, pek çok ihracatçı ülke bulunmaktadır. Türkiye 36 milyon \$’lık kalsit ihracatı ile 6’ncı sırada yer almaktadır.

Türkiye’nin Çanakkale-Biga, Balıkesir-Erdek, Bursa-Orhaneli, İzmir-Tire, Muğla-Kavaklıdere ve Niğde bölgeleri çok zengin kalsit rezervlerine sahiptir. Niğde kalsit ocakları Gümüşler formasyonunda yer almakta ve özel sektöre ait 54 firmadan 22’si günümüzde aktif olarak kalsit üretimi yapmaktadır. 1 Ocak-30 Kasım 2023 yılı il verilerine göre, madencilik sektörü toplam 1900 kişiye istihdam sağlamış ve 5.533.480 \$ ihracat gerçekleştirmiştir. Ancak; ilin zengin maden potansiyeli dikkate alındığında, kalsitin tüvenan cevher olarak değil, daha teknolojik ve uç ürün olarak satışı yapılmalıdır. Küresel kalsit minerali ticareti miktar olarak yıllara göre değişkenlik göstermekle birlikte, piyasalar artan talep yönünde ilerlemektedir. Bu kapsamda; kalsit üreticileri birliği ve ortak pazar kurularak iç rekabetin azaltılması, uluslararası iş birliği ağının genişletilmesi ve Ar-Ge faaliyetlerinin desteklenmesi gerekmektedir. Ayrıca; her sanayi dalının talep ettiği kalsit minerali tane boyutu ve fiziko-kimyasal özellikleri farklılık göstermektedir. Bu nedenle, kalsit işletmelerinin piyasa taleplerine göre yenilikçi, spesifik ürün tasarımları ve satışa sunmaları büyük önem arz etmektedir.

5. KAYNAKLAR

Ars, Ş. (2023). Niğde Ticaret İl Müdürlüğü, kişisel görüşme. Yayımlanmamış, 28 Ekim, Niğde.

Delibalta, M.S. (2009). Niğde ekonomisinde kalsit ve endüstriyel hammaddelerin önemi. 7. Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu ve Sergisi, 25-27 Şubat, Kuşadası, Türkiye.

Delibalta, M.S. (2018). Türkiye maden dış ticareti ve Niğde kalsit sektörünün ekonomik önemi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(3), 1060-1065.

DPT, (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2618. Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), Ankara.

Eroğlu, H., İstek, A., Koç, A. (2002). Türkiye’de üretilen kalsitin kuşe kağıt yapımında kullanılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(3), 415-421.

ETKB, (2025). Bilgi merkezi, Tabii kaynaklar Doğaltaşlar. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabikaynaklar-dogaltaslar> , Erişim tarihi: 09 Mayıs 2025.

İMİB, (2020). Kalsit yataklarının durumu, işletmeciliği ve geleceği. İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB), İstanbul.

Kahraman, M. (2022). Maden sektörü ve ihracat, Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi, 14(106), 116-117.

Kılıç, Ö. (2015). Çöktürülmüş kalsiyum karbonat üretimi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 79-85.

MAPEG, (2025). Maden İstatistikleri. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG). <https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik> , Erişim tarihi: 9 Temmuz 2025.

MTA, (2023). Kalsit. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/kalsitterit> , Erişim tarihi: 18 Aralık 2023.

Şahin, N. (2008). Kalsit hakkında bazı bilgiler, Madencilik Bülteni, 086, 48-51.

TİM, (2023). İhracat Rakamları. Türkiye İhracatçıları Meclisi (TİM). <https://tim.org.tr/tr/ihracat-rakamlari> , Erişim tarihi: 25 Aralık 2023.

TOBB, (2020). Türkiye Madencilik Sektörü Gelişim Raporu (2021/25). Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB), Ankara.

Toraman, Ö.Y. (2023). Kalsit (Ocak Madencililiği-Kırma-Öğütme-Seperasyon-Kaplama-Paketleme-İş Sağlığı ve Güvenliği). Birinci baskı, Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık.

Uçurum, M. (2015). Kalsit madencililiğinin geleceğinde optik ayırma teknolojilerinin yeri ve önemi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4(1), 40-46.

Yener, L. (2015). Kalsit (Agrekal, Mikrokal, Nanokal) katkılı malzemelerin kullanımı farklı sektörlerde yaygınlaşarak hızla artıyor, Sektörden Haberler Bülteni, 59, 40-54.

Zambak, C. (2018). Uluslararası ticarete yönelik faaliyet ve emtia sınıflandırma sistemleri. Türkiye Madenciler Derneği, İstanbul. Sektörden Haberler Bülteni, 70, 88-94.

TÜRKİYE'DEN MİSİR'A YAPILAN DOĞALTAŞ İHRACATININ DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF NATURAL STONE EXPORTS FROM TURKIYE TO EGYPT

E. Elsharkawi ¹, E. Kundak ^{2*}

^{1,2} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

*Sorumlu yazar: ecekundak@gmail.com

ÖZ

Doğaltaş ihracatı, Türkiye'nin toplam maden ihracatında önemli bir paya sahiptir. Bu durum, doğaltaş sektörünün dış ticaretteki yerinin stratejik düzeyde olduğu göstermektedir. Bu çalışma, Türkiye ile Mısır arasındaki 2019-2024 yılları arasında gerçekleştirilen doğaltaş ihracatını analiz ederek iki ülke arasındaki ticari ilişkilerin mevcut durumunu ve potansiyel gelişim alanlarını ortaya koymayı amaçlamaktadır. 2024 yılı verilerine göre, Türkiye'nin Afrika'ya yaptığı doğaltaş ihracatının büyük bölümü Kuzey Afrika'ya; bunun da önemli bir kısmı Mısır'a yapılmıştır. Mısır'a ihraç edilen ürünlerin neredeyse tamamını mermer-traverten blokları oluşturmaktadır; ancak işlenmiş mermer ürünleri, birim fiyat açısından çok daha yüksek katma değer sağlamaktadır. Bu durum, Mısır'a yönelik ihracat stratejilerinin revize edilmesini gerekli kılmaktadır. Ayrıca, ihracatın sürdürülebilirliği açısından siyasi ilişkiler, lojistik süreçler ve tanıtım faaliyetleri önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen bulgular, Mısır'ın Türkiye için giderek daha önemli bir pazar haline geldiğini ve bu pazarda rekabet gücünün artırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Türk doğaltaşlarının Mısır'da tanıtımının artırılması, sektörel iş birliklerinin geliştirilmesi ve lojistik-gümrük süreçlerinin uyumlaştırılması ihracatın sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Doğaltaş, mermer, Mısır, ihracat

ABSTRACT

Natural stone exports hold a significant share in Turkey's total mineral exports, highlighting the strategic importance of the natural stone sector in the country's foreign trade. This study aims to analyse the natural stone exports for Türkiye to Egypt during 2019–2024, examining the current status of bilateral commercial relations and identifying potential areas for development. According to 2024, the majority of Turkey's natural stone exports to Africa were directed to North Africa, with a significant portion destined for Egypt. Nearly all products exported to Egypt consist of marble-travertine blocks; however, processed marble products offer significantly higher added value in terms of unit price. This underscores the need to revise export strategies toward Egypt. Furthermore, factors such as political relations, logistics, and promotional activities are crucial for ensuring the sustainability of exports. The findings indicate that Egypt is becoming an increasingly important market for Turkey, and enhancing competitiveness in this market is essential. In this context, increasing the visibility of Turkish natural stones in Egypt, fostering sectoral cooperation, and harmonising customs and logistics procedures between the two countries are vital for maintaining export continuity.

Keywords: Natural stone, marble, Egypt, export

GİRİŞ

Türkiye, yüksek rezerv potansiyeli ve renk-desen çeşitliliği ile dünya pazarında önemli bir doğaltaş üreticisidir. Ayrıca, doğaltaşların jeolojik çeşitliliğinin zenginliği sebebiyle de tedarikçilerin bazen dayanım, bazen estetik talebini karşılayabilecek ürün yelpazesine sahiptir. Tüm bu özellikler, Türkiye'nin doğaltaş ihracatında küresel pazarda güçlü bir konumda olmasını sağlamıştır. Doğaltaş ihracatı sadece ülkenin ekonomik büyümesine katkı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda, madencilik sektöründe de ciddi bir istihdam sağlamaktadır. Doğaltaş blok üretimi ve blok ihracatının yanı sıra, işlenerek nihai ürün haline getirilip katma değeri yükseltilerek de ihraç edilebilen doğaltaşlar, Türkiye'nin maden ihracatında önemli bir paya sahiptir.

Türkiye, başta Çin, ABD, Hindistan ve Avrupa ülkeleri olmak üzere geniş bir alana doğaltaş ihracatı yapmaktadır. Son yıllarda stratejik önemi artan Orta Doğu ve Kuzey Afrika bölgesi Türkiye'nin doğaltaş ihracat pazarını genişlettiği bölgelerdir. Bu bölgelerdeki artan inşaat yatırımları ve kentleşme oranları doğaltaş talebini doğrudan etkilemektedir.

Demografik yapısı, yatırım potansiyeli ve stratejik konumu nedeniyle Kuzey Afrika Bölgesinde Mısır ticari açıdan ön plana çıkmaktadır. Mısır ve Türkiye arasındaki ticari ilişkiler, ekonomik ve tarihsel bağların yanında iş birlikleri ile de güçlendirilmelidir. 2025 yılında, Türkiye ile Mısır arasında madencilik ve enerji alanında yeni anlaşmalar imzalanmıştır. Bu anlaşmalarla iki ülke arasında, madencilik özelinde ilişkilerin daha da arttırılarak yatırımların teşvik edilmesi ve arttırılması hedeflenmektedir. Son dönemde Mısır ile Türkiye arasında madencilik alanında başlayan bu girişimler Türkiye madencilik sektörünün önemli bir parçası olan doğaltaş sektörünü de etkileyecektir. Madencilğin başka alanlarında başlatılan iş birlikleri zamanla doğaltaş alanına da kayarak doğaltaş sektöründe de yeni yatırım ve ihracat fırsatları doğmasının önünü açacaktır. Ayrıca, Mısır'da turizm sektöründeki genişlemeler ile konut ve altyapı projelerindeki artış sayesinde doğaltaş talebi her geçen gün daha da artacaktır.

Bu çalışmada, öncelikle Türkiye'nin 2019-2024 yılları arasındaki doğaltaş ihracat durumu incelenmiştir. Çalışmada kullanılan 2019-2024 yılı arasındaki doğaltaş ihracat verileri İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB)'nin her yıl düzenli olarak web sitesinde yayınladığı "Aylık Bazda Ürün Gruplarına veya Ülkelere göre Maden İhracat İstatistikleri" dosyalarından derlenmiştir. Aynı zaman dilimi için Türkiye'den Mısır'a yapılan doğaltaş ihracat değerleri incelenerek genel ihracat profili ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, 2022-2024 yılları arasında Mısır'a gerçekleştirilen ihracat ürün gruplarına göre detaylandırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan tüm değerlendirmeler ışığında, Mısır'a yapılan doğaltaş ihracatının daha da geliştirilmesine yönelik öneriler sunulmuştur.

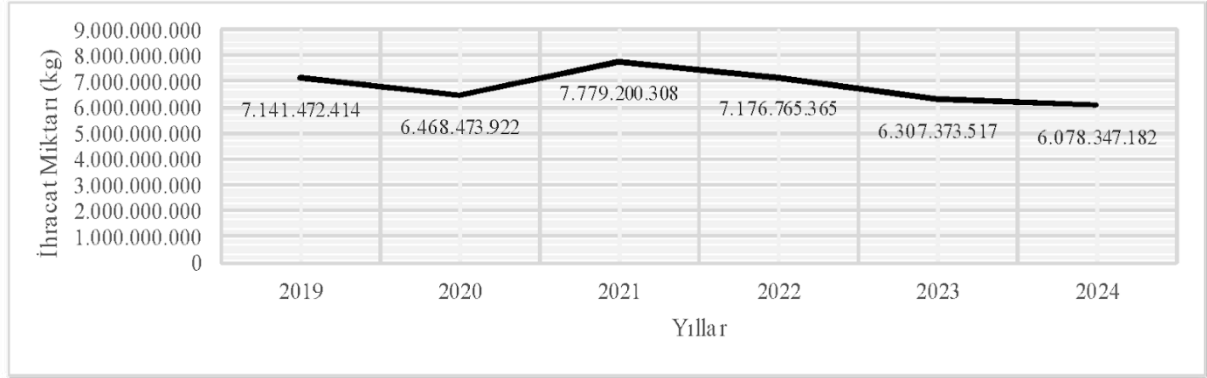
TÜRKİYE'NİN DOĞALTAŞ İHRACATI

2024 yılında İMİB tarafından yayınlanan Maden Sektörü Görünümü Raporu'nda bulunan ihracat verilerinden Türkiye'nin 2020-2024 yılları arasındaki toplam ihracatı, toplam maden ihracatı ve toplam doğaltaş ihracatı verileri derlenmiştir. Bu incelemeye göre, Türkiye'nin son 5 yılda ortalama 233.365.107.000\$ toplam ihracat getirisi olmuştur. Bu getirinin 5.686.319.000\$'ı maden ihracatından sağlanmıştır. Son 5 yıllık ortalama değerlendirildiğinde; Türkiye'nin toplam ihracatında maden ihracatının payı %2,45 ve toplam maden ihracatında doğaltaş ihracatının payının ise %34,86 olduğu tespit edilmiştir.

Türkiye'nin 2024 yılı maden ihracatı incelendiğinde tutar bazında, işlenmiş mermer 1.815.554.255kg ve 907.594.394\$ ile birinci, bakır cevheri 473.480.545 kg ve 663.599.505\$ ile ikinci, mermer-traverten ham, kabaca yontulmuş veya blok 3.168.165.767kg ve 616.065.056\$ ile üçüncü, krom cevheri 1.370.360.060kg ve 404.558.634\$ ile dördüncü, çinko cevheri 744.703.188kg ve 402.345.038\$ ile beşinci sırada yer almaktadır (İMİB, 2024). 2024 yılı toplam maden ihracatı getirisinin %32,3'ü

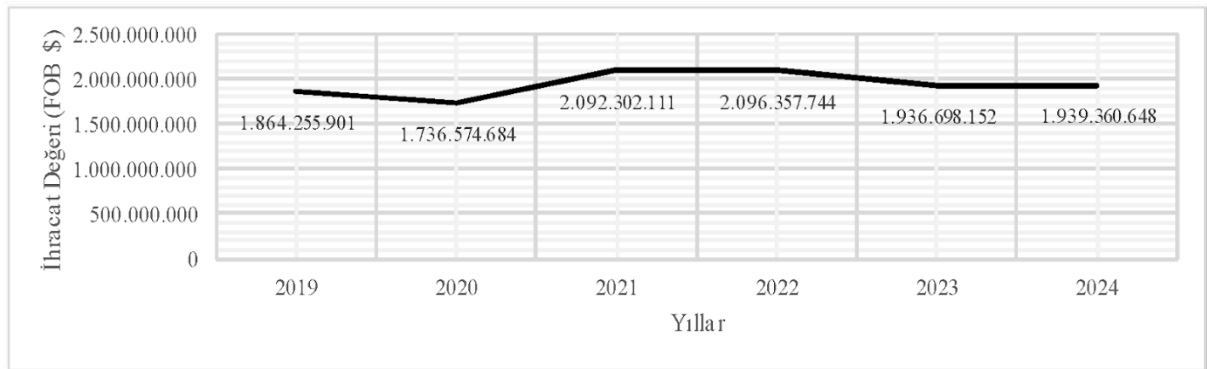
doğaltaş ihracatından sağlanmış ve toplam maden ihracatında ilk beş ürünün iki tanesi yine doğaltaş ürün gamından olmuştur. Maden ihracatında oldukça önemli bir yere sahip olan doğaltaş ihracatı üzerine farklı alanlarda çalışan araştırmacılar birçok çalışma yapmıştır (Çetin 2003; Tosun ve Tatar, 2007; Tunca vd., 2007; Efe ve Sallan Gül, 2017; Kokarcalı ve Köksal, 2021; Demir vd., 2023; Kaptan ve Adıgüzel, 2023).

Şekil 1’de 2019-2024 yılları arasında Türkiye’nin yıllık toplam doğaltaş ihracat miktarları verilmektedir. En yüksek ihracat miktarı 2021 yılında, en düşük ihracat miktarı ise 2024 yılında gerçekleşmiştir.



Şekil 1. Türkiye'nin 2019-2024 yılları arasındaki doğaltaş ihracat miktarları

Şekil 2’de 2019-2024 yılları arasında Türkiye’nin yıllık toplam doğaltaş ihracat değerleri verilmektedir. İhracattan en fazla getiri 2022 yılında, en az getiri ise 2020 yılında elde edilmiştir.



Şekil 2. Türkiye'nin 2019-2024 yılları arasındaki doğaltaş ihracat değerleri

Türkiye doğaltaş ihracat rakamları hem miktar (Şekil 1) hem de değer (Şekil 2) olarak incelendiğinde, bazı kırılma noktaları dikkat çekmektedir. Bu kırılmalardan birisi 2020 yılında gözlemlenmektedir. 17 Kasım 2019’da ilk covid vakasının Çin’de açıklanması ardından hızla yayılmaya başlayan Covid -19 salgını tüm dünyayı olduğu gibi Türkiye’yi de etkilemiştir. 11 Mart 2020 tarihinde Türkiye’de de ilk vakanın görüldüğü açıklanmış, sonrasında dünyanın pek çok yerinde olduğu gibi Türkiye’de de karantina uygulamaları, sokağa çıkma yasakları vb. yaşanmıştır. 2020 yılında Dünya genelinde yaşanan Covid-19 salgını nedeniyle yaşanan sağlık sorunları ve alınan tedbirlerden kaynaklı üretim ve ihracat rakamlarında pek çok sektörde olduğu gibi doğaltaş sektörü de etkilenmiştir. 2020 yılında Türkiye’nin toplam doğaltaş ihracatında miktar olarak %9,42 ve değer olarak %6,85 bir azalma olduğu gözlemlenmektedir. 2021 yılında ise, ihracat rakamlarında yaklaşık %20 oranında ciddi bir artış gözlemlenmektedir. 2022 yılı rakamları 2021 yılı rakamlarına yakınlık gösterirken; ikinci kırılma noktası da 2023 yılında gözlemlenmektedir. 2023 yılında miktar bazında %12,11 oranında ve tutar

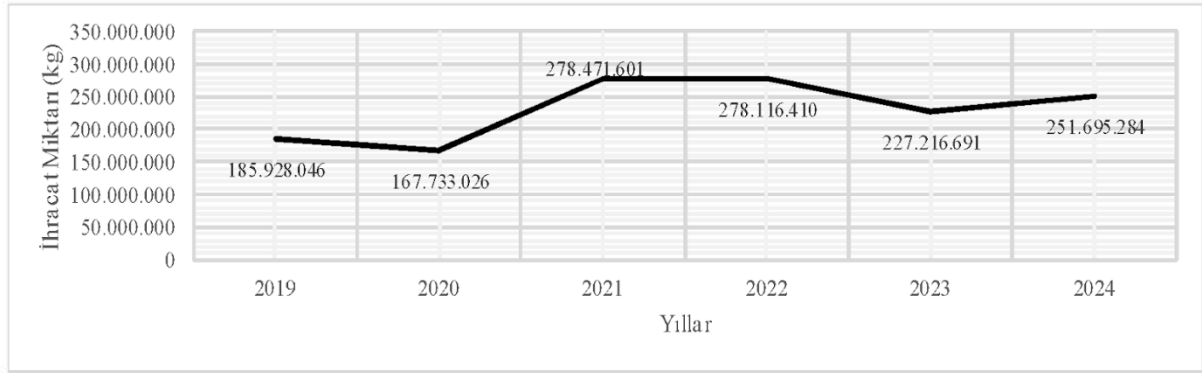
bazında %7,62 oranında ihracat rakamlarında bir azalma söz konusudur. Bunun nedeninin ise, 2023 yılında döviz kurunda yaşanan ciddi artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu tür küresel salgın ve ekonomik dalgalanmaların olmadığı dönemlerdeki doğaltaş ihracatındaki stabilizasyon, Türkiye doğaltaş rezerv yeterliliği ve ürün çeşitliliği ile doğaltaş sektörünün üretim sürekliliğini koruyacak güçte oluşu gibi avantajlarından kaynaklanmaktadır.

MISIR'A YAPILAN DOĞALTAŞ İHRACATI

Türkiye ile Mısır arasındaki ticaret, iki ülke arasında 2005 yılında Serbest Ticaret Anlaşması'nın imzalanmasından sonra hızla artmıştır. Türkiye'nin ihracatında Mısır önemli bir yer tutmaktadır. 2024 yılı ihracat rakamları incelendiğinde, Mısır madencilik ürünleri ihracatında 13. sırada yer almaktadır (TİM, 2024).

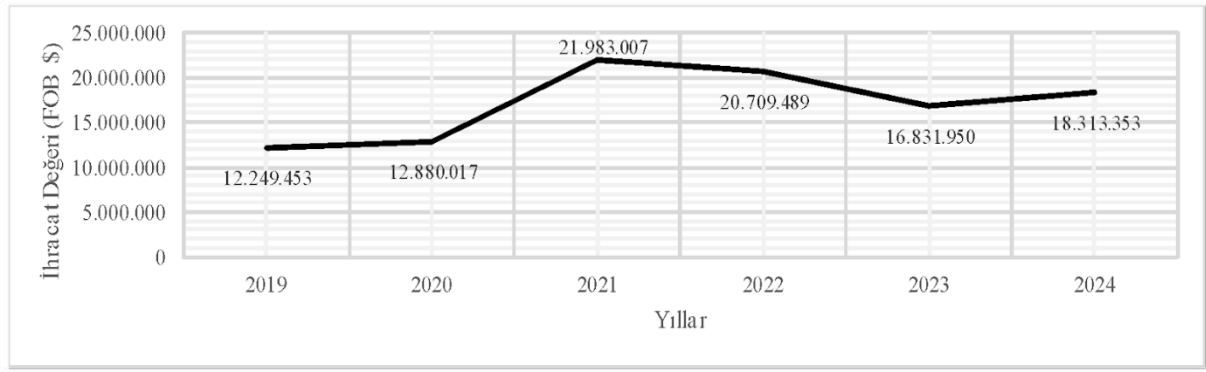
Türkiye'nin 2024 yılında 45 adet Afrika ülkesine doğaltaş ihracatı yapmıştır. Bu ülkelerden Cezayir, Fas, Libya, Mısır ve Tunus'un içinde bulunduğu 5 adet Kuzey Afrika bölgesine yapılan doğaltaş ihracatı, toplam Afrika'ya yapılan doğaltaş ihracatının miktar olarak %96,44'ünü ve parasal olarak %88,67'sini oluşturmaktadır. Ayrıca Kuzey Afrika ülkeleri kendi içerisinde değerlendirildiğinde, Mısır doğaltaş ihracatında miktar olarak ilk sırada gelmektedir. Kuzey Afrika bölgesinde 2024 yılı için yapılan doğaltaş ihracatının miktarsal olarak %47,15'i ve parasal olarak da %17,55'i Mısır'a yapılmıştır (İMİB, 2024).

Şekil 3'te Türkiye'nin 2019-2024 yılları arasında Mısır'a yaptığı doğaltaş ihracat miktarları verilmiştir. Mısır ihracatındaki dalgalanmalar (Şekil 3) toplam doğaltaş ihracatındaki dalgalanmalarla (Şekil 1) paralellik göstermektedir. 2021 yılında Mısır'a yapılan doğaltaş ihracatında %66,02 oranında ciddi bir artış gözlenmiştir. Mısır'a yapılan doğaltaş ihracatında 2022 yılında %0,13 oranında bir azalış; 2023 yılında %18,30 oranında bir azalış ve 2024 yılında %10,77 oranında bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Türkiye'nin 2019-2024 yılları arasındaki Mısır'a doğaltaş ihracat miktarları

Şekil 4'te Türkiye'nin 2019-2024 yılları arasında Mısır'a yaptığı doğaltaş ihracat tutarları verilmiştir. Mısır ihracatındaki dalgalanmalar (Şekil 4) toplam doğaltaş ihracatındaki dalgalanmalarla (Şekil 2) paralellik göstermektedir. 2021 yılında Mısır'a yapılan doğaltaş ihracatından elde edilen tutarda %70,68 oranında ciddi bir artış gözlenmiştir. Mısır'a yapılan doğaltaş ihracatından elde edilen tutarda 2022 yılında %5,79 oranında bir azalış; 2023 yılında %18,72 oranında bir azalış ve 2024 yılında %8,80 oranında bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Türkiye'nin 2019-2024 yılları arasındaki Mısır'a doğaltaş ihracat miktarları

Türkiye doğaltaş ihracatı 6 farklı ürün grubundan oluşmaktadır. Bunlar, mermer-traverten ham, kabaca yontulmuş veya blok; işlenmiş mermer, inşaata elverişli diğer işlenmiş taşlar; granit ham, kabaca yontulmuş veya blok; kayağan taşı-işlenmiş ve işlenmiş granit'tir. Bu ürün gruplarına göre Mısır'a yapılan doğaltaş ihracatının 2022-2024 yılları arası miktar ve tutarları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo1. Ürün gruplarına göre Mısır doğaltaş ihracat miktar ve değerleri

Ürün Grubu	2022		2023		2024	
	Miktar (kg)	Değer (\$)	Miktar (kg)	Değer (\$)	Miktar (kg)	Değer (\$)
Mermer-traverten ham, kabaca yontulmuş veya blok	275.442.300	19.715.232	224.774.635	15.448.386	250.166.132	17.432.425
İşlenmiş mermer	2.657.555	971.406	2.096.513	1.345.185	1.342.798	832.791
İnşaata elverişli diğer işlenmiş taşlar	332	953			23.880	32.598
Granit ham, kabaca yontulmuş veya blok	11.818	8.829	318.000	19.652	162.000	13.770
Kayağan taşı-işlenmiş	4.406	13.070	1.977	13.444	474	1.769
İşlenmiş granit			166	2.583		
Toplam	278.116.411	20.709.490	227.191.291	16.829.250	251.695.284	18.313.353

Tablo 1 incelendiğinde, Mısır'a yapılan doğaltaş ihracatının tamamına yakını mermer-traverten ham, kabaca yontulmuş veya blok ürün grubunun oluşturduğu görülmektedir. Bu ürün grubunun Mısır ihracatındaki oranına bakıldığında toplam ihracatın hacimsel olarak %99'unu, parasal olarak %95'ini oluşturduğu söylenebilir. Hacimsel ve parasal oranlar birbirine yakın olmakla beraber aradaki farkı işlenmiş ürün satışının birim fiyatının blok satışının birim fiyatından oldukça yüksek olması neden olmaktadır. 2022-2024 yılları için mermer-traverten blok birim satış fiyatı 0,07 \$/kg'dır. İkinci en fazla ihracat edilen işlenmiş mermer ürün grubunun birim fiyatı ise; 2022 yılı için 0,37\$/kg, 2023 yılı için

0,64\$/kg ve 2024 yılı için 0,62 \$/kg'dır. Katma değeri en yüksek ürün grupları ise; inşaata elverişli diğer işlenmiş taşlar ile kaygan taşı-ışlenmiştir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Türkiye ile Mısır arasındaki doğaltaş ihracatı ele alınarak iki ülke arasındaki mevcut durumun analiz edilmesi amaçlamıştır. Son 5 yıllık ihracat rakamları üzerinden bu analizler gerçekleştirilerek Türkiye'nin Mısır'daki doğaltaş pazar durumu genel hatları ile ortaya konmuştur. İhraç edilen doğaltaş ürün gruplarına göre detaylı inceleme ise son üç yılın ihracat verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Son 5 yıllık ortalamaya göre, Türkiye'nin toplam ihracatında maden ihracatının payı %2,45 ve toplam maden ihracatında doğaltaş ihracatının payı %34,86'dır. Maden ihracatının üçtü birinden fazlasını sağlayan doğaltaş ihracatının Türkiye için oldukça önemli olduğu söylenebilir.
- Türkiye'nin toplam doğaltaş ihracatı ve Mısır'a yapılan doğaltaş ihracatı Covid-19 salgınından ve döviz kurundaki ani yükselişten etkilenmiştir. Bu dönemler dışındaki ihracat rakamları daha stabildir. Bu durum, Türkiye'nin doğaltaş rezerv yeterliliği ve ürün çeşitliliği ile doğaltaş sektörünün üretim sürekliliğini koruyacak güçte oluşunun pazar payını korumada etkili olduğunu düşündürmektedir.
- 2024 yılı için Afrika'ya yapılan doğaltaş ihracatının hacimsel olarak %96,44'ü ve parasal olarak %88,67'si Mısır'ın da içinde bulunduğu Kuzey Afrika'ya yapılmaktadır. Kuzey Afrika'ya yapılan doğaltaş ihracatın hacimsel olarak %47,15 ve parasal olarak %17,55'i Mısır'a yapılmaktadır.
- Türkiye'nin mermer-traverten blok ihracatında Mısır, Çin ve Hindistan'dan sonra üçüncü sırada yer almaktadır.
- Mısır'a ihracat edilen doğaltaşların hacimsel olarak %99'u, tutar olarak %95'i mermer-traverten blok ürün grubunda yapılmaktadır.
- İhracat birim fiyatları üzerinden değerlendirme yapıldığında, işlenmiş mermer grubunun mermer-traverten blok grubundan daha getirisi yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İşlenmiş mermerin ham mermer-travertene göre, 2022 yılında yaklaşık 5 kat, 2023 ve 2024 yıllarında ise yaklaşık 9 kat daha fazla getiri sağladığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, Mısır'a yapılan ihracatta hedef işlenmiş mermer ürün grubunu arttırmaya yönelik olmalıdır.

Elde edilen bulgular, Türkiye'nin doğaltaş ihracatında Mısır'ın giderek önem kazanan bir pazar haline geleceğini göstermektedir. Mısır'da artan inşaat faaliyetleri ile kamu destekli altyapı projeleri ve özel sektör yatırımları doğaltaş talebinin sürekli olmasını sağlayacaktır. Bu durumda, Türkiye rekabetçi fiyat, yüksek kalite ve coğrafi yakınlık gibi avantajlarını kullanarak bu talebin büyük bir kısmını karşılamaya talip olmalıdır.

Ticaretin sürekliliğini ve verimliliğini tehdit eden bazı durumlar göz ardı edilmemelidir. Bu çalışmada incelenen dönem için bir değerlendirme yapıldığında Covid-19 salgının ve 2023 yılında yaşanan döviz kurundaki ani yükselişin ihracat rakamlarındaki düşüşe yansıdığı da gözlemlenmiştir. Ancak bunların dışında, ülkeler arasında yaşanan dönemsel siyasi gerilimler de ticari ilişkileri doğrudan etkileyecek ve ticaretin sürdürülebilirliğini zayıflatabilecek önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Doğaltaş ihracatımızda Mısır pazarındaki payımızı genişletebilmek için, Türk doğaltaşlarının Mısır'da tanınırlığını arttıracak çalışmalar yapılmalıdır. Mısır'da gerçekleştirilen fuarlara doğaltaş sektörünün katılımı sağlanmalıdır. Döviz kurundaki ani değişimlerden ihracatçıların daha az etkilenmesinin sağlanmasına yönelik önlemlerin alınması sağlanmalıdır. İki ülke arasındaki siyasi dalgalanmalardan etkilenmeyi azaltabilmek için sektörel iş birliklerinin kurularak güçlendirilmesi hedeflenmelidir. Ayrıca, ihracat sürecinde malın zamanında ulaştırılması ihracat sürekliliği ve

güvenilirliği açısından önem taşıdığından her iki ülkenin liman ve gümrük süreçleriyle ilgili uyumlandırma çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

Çetin, T. (2003). Türkiye mermer potansiyeli, üretimi ve ihracatı. Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, 23(3).

Demir, B. G., Özdoğan, A. K., Akbulut, A. (2023). Türkiye'deki travertenlerin tarih, turizm, madencilik ve doğaltaş ihracatı açısından değerlendirilmesi. AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture, 7(2), 291-302.

Efe, T., Sallan Gül, S. (2017). Türkiye'de doğaltaş sanayinin coğrafi ve ekonomik sürdürülebilirliği. Akademia Sosyal Bilimler Dergisi, (3), 173-181.

İMİB, 2019, Aylık Bazda Ürün Gruplarına veya Ülkelere göre Maden İhracat İstatistikleri, Erişim adresi: <https://imib.org.tr/veri-merkezi/ihracat-istatistikleri> (erişim: 22.03.2025)

İMİB, 2020, Aylık Bazda Ürün Gruplarına veya Ülkelere göre Maden İhracat İstatistikleri, Erişim adresi: <https://imib.org.tr/veri-merkezi/ihracat-istatistikleri> (erişim: 22.03.2025)

İMİB, 2021, Aylık Bazda Ürün Gruplarına veya Ülkelere göre Maden İhracat İstatistikleri, Erişim adresi: <https://imib.org.tr/veri-merkezi/ihracat-istatistikleri> (erişim: 22.03.2025)

İMİB, 2022, Aylık Bazda Ürün Gruplarına veya Ülkelere göre Maden İhracat İstatistikleri, Erişim adresi: <https://imib.org.tr/veri-merkezi/ihracat-istatistikleri> (erişim: 22.03.2025)

İMİB, 2023, Aylık Bazda Ürün Gruplarına veya Ülkelere göre Maden İhracat İstatistikleri, Erişim adresi: <https://imib.org.tr/veri-merkezi/ihracat-istatistikleri> (erişim: 22.03.2025)

İMİB, 2024, Aylık Bazda Ürün Gruplarına veya Ülkelere göre Maden İhracat İstatistikleri, Erişim adresi: <https://imib.org.tr/veri-merkezi/ihracat-istatistikleri> (erişim: 22.03.2025)

İMİB, 2024. Maden Sektörü Görünümü Raporu, ss 18.

Kaptan, A., Adıgüzel, M. (2023). Türkiye'de doğaltaş sektörü ve rekabet gücü. İstanbul Ticaret Üniversitesi Dış Ticaret Dergisi, 1(3), 105-114.

Kokarcalı, U., Köksal, M. (2022). Türkiye'de doğaltaş sektörü ihracatını etkileyen makroekonomik faktörler. İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 4(2), 183-198.

İstanbul Maden İhracatçıları Birliği tarafından yayınlanan TİM (Türkiye İhracatçıları Meclisi), (2024). İhracat 2024 Raporu, TİM Ekonomik Araştırmalar Şubesi, ss 119.

Tosun, A., Tatar, Ç. (2007). Türkiye'nin mermer ihracatını artırma olanaklarının araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 9(3), 13-20.

Tunca, M. Z., Aytemiz, L., Özaltın, Ö. G. O., Göçmen, A. G. G. (2007). Mermer ihracatçısı işletmelerin mevcut durumlarına ilişkin bir araştırma. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 12(3), 177-192.

BİLDİRİLER / PAPERS

6.Bölüm

TASARIM YARIŞMALARINDA DOĞALTAŞ KULLANIMININ KATILIM PROJELERİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ: ULUSLARARASI DEĞİŞİK DOĞALTAŞ TASARIM YARIŞMASI

*ANALYZING THE USE OF NATURAL STONE IN DESIGN COMPETITIONS THROUGH
PARTICIPATION PROJECTS: INTERNATIONAL DIFFERENT NATURAL STONE DESIGN
COMPETITION*

E. Okuyucu^{1*}, F. Mazlum²

¹ *Afyon Kocatepe Üniversitesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü*

² *Afyon Kocatepe Üniversitesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü*

**Sorumlu Yazar: ebruokuyucu@hotmail.com*

ÖZ

Yarışma projeleri, yaratıcılığın sınırlarını zorlayarak kullanıcıların gereksinimlerini ve ihtiyaçları bir arada düşünen, özgün ve yenilikçi çözümler üretmek için değerli bir platform sunar. Bu sayede, hem işlevsel hem de estetik açıdan farklı tasarımlar üretilebilmesi teşvik edilir. Tasarım eğitimi veren bölümlere hitap eden yarışmalar, farklı bakış açılarının bir araya gelmesini sağlayarak eğitimde rekabetçi bir ortam yaratırken aynı zamanda kamuoyunun tasarım süreçlerine katılımını da destekler. Bu özelliklerinden ötürü yarışmalar, hem katılımcılara önemli katkılar sağlar hem de destekçilerin ürün-fikir geliştirme konusunda alternatif düşünceler üretebilmesine ve ürün çeşitliliğini artırarak sektördeki alanlarını genişletebilmesine olanak sağlar. Bu yarışmaların katılımında en büyük payı öğrenci kategorileri oluşturmaktadır. Türkiye’de tasarım eğitimi veren iç mimarlık, iç mimarlık ve çevre tasarımı, endüstri ürünleri tasarımı, endüstriyel tasarım gibi bölümlerde eğitim gören öğrencilerin tasarım yarışmalarını yakından takip ettikleri ve katılım sağladıklarını veriler neticesinde görebilmek mümkündür. Bu bağlamda katılımcı olan öğrenciler hazırladıkları yarışmalar sayesinde hem tasarım dünyalarının ufuklarını genişletirken hem de verilen çerçeve ve sınırlar dâhilinde imalat ve üretim safhalarını planlayarak gelişimlerini pratik alanda da sağlamaktadırlar. Doğaltaşların kullanımının, tasarımın temel unsur olması gerektiği yarışmalardan biri olan “Uluslararası Değişik Doğaltaş Tasarım Yarışması” katılım koşulunda aktif öğrenci olma zorunluluğu bulunması bakımından benzerlerinden ayrılmaktadır. Bu şart ile birlikte yarışma sadece öğrenciler arasında düzenlenmektedir. Profesyonel kategorinin bulunmadığı bu yarışmada öğrenciler, eğitim hayatlarında aldıkları teorik bilgileri uygulama yöntemleri ile pratik hale dönüştürerek uygulama ve malzeme bilgisi edinirken aynı zamanda ileride atılacakları profesyonel hayatları için de sunum ve iletişim becerileri kazanabilmektedir. Bu bağlamda ele alınan çalışmada, katılımcılar özelinde doğaltaşın materyal olarak kullanımı, form ve estetik açıdan değerlendirmesi ile birlikte tercih sebepleri ve tasarım eğilimleri analiz edilecektir. Yapılan bu analiz neticesinde elde edilecek bulguların eğitim ve profesyonel alanlarda kazanımlar elde edilmesini sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tasarım yarışmaları, iç mimarlık, doğaltaş

ABSTRACT

By pushing the boundaries of creativity, competition projects offer a valuable platform to produce original and innovative solutions that consider the needs and requirements of users together. This encourages the production of designs that are both functionally and aesthetically different. Competitions addressing design education departments create a competitive environment in education by bringing together different perspectives, while at the same time supporting the participation of the public in design processes. Due to these characteristics, competitions provide significant contributions to the participants and enable supporters to generate alternative ideas for product-idea development and to expand their space in the sector by increasing product diversity. Student categories constitute the largest share in the participation of these competitions. As a result of the data, it is possible to see that students studying in departments such as interior architecture, interior architecture and environmental design, industrial design and industrial design closely follow and participate in design competitions. In this context, while the participating students expand the horizons of their design world thanks to the competitions they prepare for, they also ensure their development in the practical field by planning the manufacturing and production phases within the given framework and limits. The “International Different Natural Stone Design Competition”, which is one of the competitions where the use of natural stones and design should be the main element, differs from its counterparts in that the condition of participation is to be an active student. With this condition, the competition is organized only among students. In this competition, which does not have a professional category, students can transform the theoretical knowledge they receive in their education life into practical knowledge through application methods and gain application and material knowledge, while at the same time gaining presentation and communication skills for their professional lives in the future. In this context, the study will analyze the use of natural stone as a material, its evaluation in terms of form and aesthetics, as well as the reasons for preference and design tendencies of the participants. It is thought that the findings to be obtained as a result of this analysis will provide gains in educational and professional fields.

Keywords: Design competitions, interior architecture, natural stone

GİRİŞ

Yaratıcılık kavramının ortaya çıktığı süreçte tasarım ve tasarımsal eylemler de bulunmaktadır. Yaratıcılık birçok farklı nedenle ortaya çıkabileceği gibi bir dürtü veya beceriyle de oluşabilmektedir. “Farklı olma” dürtüsü ve ideası, kişinin özgün olma arayışının temel unsurunu oluşturabilmekte ve problemin farklı şekillerde ele alınmasını sağlayabilmektedir. Yaratıcı düşünme, mevcut bilgi birikimindeki eksiklikleri ve sorunları fark ederek başlamaktadır. Bu sayede, yeni fikirler ve varsayımlar ortaya koyulabilir. Süreç, tamamen özgün düşünceler üretmeyi ve farklı kavramlar arasındaki bağlantıları keşfetmeyi içermektedir. Aynı zamanda, mevcut düşünce unsurlarını birleştirerek yenilikçi sentezler oluşturma yeteneğini de kapsamaktadır. Başka bir deyişle yaratıcı düşünme; tasarım odaklılık ve geleceği öngörme becerisi olarak tanımlanabilmektedir. İnsanlık tarihi ile başladığı düşünülen yaratıcı düşünce, her ne kadar son beş yüzyılda sanat ile ilişkilendirilse de günümüzde teknoloji, mühendislik, yazılım ve yapay zeka entegrasyonu bu tanımın kapsama alanına girdiği anlaşılmaktadır.

Yaratıcı düşünme olgusu özellikle tasarım ve mimari alanlarda geniş bir tabanı oluşturduğu bilinmektedir. Akademik eğitimin yanı sıra pratik uygulamalarda ve profesyonel çalışma hayatında genç tasarımcılardan bu düşünme becerilerini geliştirmeleri beklenmektedir. Bu bağlamda düşünce olgusu, arka planda bilinçaltının sınırları, sosyal kaygılar, çelişkiler ve insan-çevre faktörünün sınırları ile de mücadele halinde olduğu görülmektedir. Herakleitos'un, "Çelişki hem kraldır hem de babadır" söylemi her şeyin çelişki ile sınırları olduğunu öngörmekte ve sınırlarla mücadelenin yaratıcı üretimlerin kaynağı olarak tanımlanmaktadır (May, 1975). The Courage to Create (Yaratma Cesareti) adlı kitabında, Rollo May, sınırlar ve tasarım arasındaki ilişkiyi şu şekilde anlatmaktadır: "İnsan bilinci, varoluşumuzun ayırt edici yönüdür; biz sınırlamalar olmaksızın asla geliştiremeyiz. Bilinç, ortaya çıkan bir farkındalıktır.

Olasılıklar ve sınırlamalar arasındaki diyalektik gerilimden doğar. Yaratıcı eylem, insanı sınırlayan şeyle birlikte ve ona karşı gerçekleşir." Sınırların insan hayatında değerli olduğunu belirtir ve yaratıcılığın kendisi sınırlar gerektirir; çünkü yaratıcı eylem hem sınırlarla birlikte hem de sınırlara karşı ortaya çıkmaktadır. Kısaca insanı hem sınırlayan hem de sonsuz ihtimallerin anahtarı olduğunu vurgulamaktadır (May, 1975).

Diğer bir ifadeyle sınırlar, malzemenin doğal yapısı, maliyeti, estetik ve sanatsal görüntüsü, tasarımcı-kullanıcı bağlamında yorumlamalar gibi tasarımın temelinde çözülmesi gereken problemler olarak sayılabilmektedir. Bu noktada, doğaltaşın dezavantaj gibi görünen sınırlarının, bir avantaja dönüştürülebileceği söylenebilmektedir. Doğru yönetilen bir süreç ile yeni ve yaratıcı çözümler avantaj sağlayabilir. Tasarımda doğaltaş kullanımı farklı tasarımlar elde etme fırsatı verir ve yaratıcı ürünler sunarken aynı zamanda da çevre dostu ve sürdürülebilir bir yaklaşım olarak görülmektedir. Bu çalışma; "Değişik Doğaltaş Tasarım Yarışması" kapsamında tasarımcıların sınırlar çerçevesinde nasıl davrandıkları, tasarımlarında bu faktörleri nasıl çözümlediği ya da ne gibi farklılıklar sergilediğini çalışmaları üzerinden analiz etmektedir.

Kuramsal Çerçeve: Doğaltaş ve Tasarım İlişkisi

Doğaltaşın ÇSB'ye göre tanımı: "Doğal olarak oluşmuş kayaktan kopmuş, koparılmış parça." olarak belirtilirken doğal yapı taşı ise: "Doğada mevcut püskürük, tortul, başkalaşmış kayalarda açılmış taş ocaklarından çıkarılan, homojen, atmosfer etkilerine dayanıklı, petrografik ve teknolojik özellikleri bakımından yapı işlerinde kullanılmaya elverişli taştır." şeklinde ifade edilmektedir. Doğaltaşlar," bilinen en eski inşaat malzemelerinden birisi olması nedeniyle binlerce yıldır insanlar tarafından kullanılmaktadır. Yine günümüzde doğaltaşlar, yapıların çeşitli yerlerinde ve mimari dekoratif amacıyla kullanılmaktadır (Çelik ve Kavuşan, 2001). Tasarıma katkı sunması bakımından peyzaj projelerinde, mimari projelerde ve içmimari projelerde oldukça sık kullanılan doğaltaşlar yalnızca bir malzeme olarak değil estetik öge olarak da görsel 1, 2 ve 3'te görüleceği üzere tasarımcılar tarafından sıkça tercih edilmektedir.



Görsel 1. Lingguang Tapınağı (URL 1) Görsel 2. Sancaklar Cami (URL 2) Görsel 3. Trablus Kongre Merkezi (URL 3)

Tasarım süreçlerinde malzeme seçimi hem işlevsellik hem de estetik açıdan belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, doğaltaşlar uzun yıllardır yapı sektörünün ve tasarım dünyasının vazgeçilmez malzemeleri arasında yer almaktadır. Günümüz tasarım anlayışında, malzeme seçimi yalnızca estetik bir tercih değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, işlevsellik ve üretilebilirlik açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda doğaltaşlar hem geleneksel hem de çağdaş mimari ve endüstriyel tasarım projelerinde önemli bir malzeme grubu olarak öne çıkmaktadır. Doğaltaşların sahip olduğu fiziksel dayanım, estetik çeşitlilik ve tarihsel süreklilik; onları diğer malzemelerden ayıran başlıca özellikler arasında yer almaktadır (Yılmaz ve Demirtaş, 2020). Doğaltaş, doğal süreçler sonucu oluşan ve yer kabuğunda bolca bulunan kayalardan elde edilen yapı ve tasarım malzemesi olarak tanımlanabilir. Bu malzeme hem iç mekân hem de dış mekân uygulamalarında; zemin

kaplamalarından cephe tasarımlarına, peyzaj uygulamalarından mobilya detaylarına kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır (Çelik, 2019).

Özellikle mermer, traverten, kireçtaşı, granit, kayrak taşı ve kumtaşı gibi türler; gerek estetik formları gerekse işlenebilirlikleri açısından en sık tercih edilen doğaltaş çeşitleri arasında yer almaktadır. Endüstriyel tasarım alanında ise doğaltaş, özellikle mobilya, aksesuar ve yüzey uygulamalarında modern tasarım ilkeleriyle birleşerek hem zamansızlık hem de malzeme kimliği sunmaktadır. Bununla birlikte, doğaltaşların işlenebilirlik düzeyleri, maliyet-etkinlik oranları ve yerel kaynaklarla ilişkili erişilebilirliği de tasarım kararlarını doğrudan etkilemektedir (Öztürk ve Sarı, 2021).

İç mimarlık, yalnızca mekânın fiziksel sınırlarını tanımlayan değil, aynı zamanda kullanıcı deneyimini şekillendiren disiplinler arası bir tasarım alanıdır. Bu kapsamda malzeme seçimi, iç mekânın kimliğini ve atmosferini belirlemede başat rol oynamaktadır. Doğaltaşlar hem geleneksel hem de çağdaş iç mekân uygulamalarında sahip oldukları özgün doku, renk çeşitliliği ve estetik değer sayesinde, iç mimarlar tarafından sıklıkla tercih edilen bir malzeme grubu hâline gelmiştir (Aydın, 2021). İç mimari projelerde; zemin, duvar kaplamaları, lavabo tezgâhları, şömine yüzeyleri, merdiven basamakları, niş detayları gibi çok çeşitli yüzeylerde kullanım alanı bulur. Bu malzeme yalnızca görsel zenginlik katmakla kalmaz, aynı zamanda uzun ömürlü ve bakım gereksinimi düşük yapısıyla da kullanıcı odaklı tasarımlarda işlevsel avantajlar da sağlamaktadır (Koç, 2020). İç mimarlıkta malzeme seçiminde sürdürülebilirlik, estetik ve işlenebilirlik önemli ölçütlerdir. Doğaltaş; doğal kaynaklı olması, geri dönüştürülebilirliği, düşük yüzey bakım ihtiyacı ve uzun ömürlü kullanım ömrü ile bu ölçütlerin büyük bir bölümünü karşılamaktadır. Mermer, traverten, bazalt, granit, kayrak taşı ve oniks gibi taş türleri; projelerin ihtiyacına göre yüzey etkisi, renk sıcaklığı, ışık yansıtma kapasitesi ve mekânsal bütünlük gibi kriterlere göre değerlendirilmektedir (Demirtaş ve Elmacı, 2018). Bu bağlamda tasarım dünyasına ülkemiz penceresinden bakıldığında, doğaltaşın kullanımı her ne kadar arzu edilen seviyede olmasa bile oldukça yaygın bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır.

Türkiye’de Gerçekleştirilen Doğaltaş Tasarım Yarışmaları

Doğaltaş, mimarlık, iç mimarlık ve endüstriyel tasarım gibi alanlarda estetik, işlevsellik ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Türkiye, zengin doğaltaş rezervlerine sahip bir ülke olması nedeniyle bu malzemeyi sadece üretim değil, aynı zamanda yaratıcı tasarım süreçlerinde de değerlendiren önemli bir aktör hâline gelmiştir. Bu bağlamda, 2000 yılı sonrasında düzenlenen doğaltaş temalı tasarım yarışmaları, sektörde yenilikçi fikirlerin teşvik edilmesinde, genç tasarımcıların desteklenmesinde ve doğaltaşın güncel kullanım potansiyelinin ortaya konmasında kritik rol oynamaktadır. Aynı zamanda bu yarışmalar sayesinde genç tasarımcılar, profesyoneller ve sektör çalışanlarının da doğaltaşı tanımaları ve projelerinde ya da uygulamalarında kullanmak adına bir farkındalık oluşturduğu da görülmektedir.

2009 yılında İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB) tarafından başlatılan Endüstriyel ve Mimari Doğaltaş Tasarım Yarışması, Türkiye’de bu alanda kurumsal temsiliyeti olan en erken yarışma örneklerinden biridir. Bu yarışma, üniversite öğrencileri ve profesyonel tasarımcıları hedef alarak her yıl düzenli olarak sürdürülmektedir. 2023 yılı itibarıyla 12. edisyonuna ulaşan yarışma, sektördeki güncel tasarım eğilimlerini doğaltaş kullanımı üzerinden yeniden yorumlayan bir platform işlevi görmektedir (İMİB, 2023).

2021 yılında Ege Maden İhracatçıları Birliği’nin (EMİB) başlattığı AMORF Doğaltaş Proje ve Tasarım Yarışması, özellikle yenilikçi uygulamalar ve çok disiplinli yaklaşımların desteklendiği bir başka önemli örnektir. AMORF yarışması, öğrenciler ve genç profesyonellere açık olması bakımından sektöre yeni katılımlar açısından da dikkat çekmektedir (EMİB, 2023).

Bir diğer dikkat çeken platform ise, İzmir’de İZFAŞ tarafından düzenlenen Uluslararası Değişik Doğaltaş Tasarım Yarışmasıdır. 2022 öncesinde Ezber Bozan Tasarım Yarışması adı altında yapılan etkinlik bu tarih itibarıyla yeni ismi ve içeriği ile son halini aldığı bilinmektedir. 2022 itibarıyla 4. edisyonu gerçekleşen yarışma, doğaltaşın mobilya, iç mimarlık ve ürün tasarımı gibi alt alanlarda yenilikçi kullanımlarını teşvik etmektedir (İZFAŞ, 2023). Yarışma, Marble İzmir Fuarı ile eşzamanlı gerçekleştirilerek sektör ile tasarımcılar arasında doğrudan bağ kurmaktadır.

Son dönemde ortaya çıkan MAYEM Uluslararası Yarışması gibi girişimler, doğaltaş odaklı yarışma kültürünün yerel yönetimler ve özel sektör iş birlikleriyle nasıl genişlediğini göstermektedir. 2025 yılında 7. kez düzenlenen yarışma, genç tasarımcılara ve mimarlık öğrencilerine hitap etmektedir (MAYEM, 2025).

Türkiye’de 2000 yılı sonrasında doğaltaş tasarım yarışmaları, sektörel gelişim kadar tasarım eğitimi ve kültürü açısından da büyük bir değer taşımaktadır. Bu yarışmalar; doğaltaşın çağdaş yorumlarını teşvik eden, yeni malzeme deneyimlerine zemin hazırlayan ve tasarımcı-yapı sektörü iş birliklerini destekleyen bir platform olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, doğaltaşın geleneksel kullanımlarının ötesine geçerek iç mekân, ürün ve peyzaj gibi çok sayıda alt disiplinde yer almasını sağlamaktadır. Tüm bu kazanımlar haricinde yalnızca doğaltaş kullanımı veya tasarım yarışmasına yönelik değil aynı zamanda bu organizasyonlar çerçevesinde firma-tasarımcı, firma-üniversite buluşmaları da düzenlenmekte, yapılan teknik geziler ve webinarlar ile genç tasarımcıların hem mesleki bilgileri hem de eğitimlerinin zenginleştirildiği de görülmektedir.

Uluslararası Değişik Doğaltaş Yarışması

İlki 2018 yılında İzmir Büyükşehir Belediyesi iştiraki olan İZFAŞ ve Türkiye Doğaltaş ve Mermer Üreticileri Derneği tarafından düzenlenen ve önceki adı Ezber Bozan Tasarım Yarışması olan yarışma, Marble İzmir Uluslararası Doğaltaş ve Teknolojileri Fuarı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yarışmanın temel amacı, doğaltaşın yalnızca yapı elemanı olarak değil; mobilya, iç mekân objesi, kentsel donatı ya da ürün tasarımı gibi farklı alanlarda da değerlendirilebileceğini göstermektir (İZFAŞ, 2023). Yarışma bu yönüyle, doğaltaşın çok yönlü kullanım olanaklarını sorgulayan ve yaratıcı çözümler arayan bir tasarım ortamı sunmaktadır. Yarışma hem profesyonellere hem de üniversitelerin mimarlık, iç mimarlık, endüstriyel tasarım ve güzel sanatlar bölümlerinde öğrenim gören tüm tasarım öğrencilerine açıktır. Bu durum, akademik camia ile sektör arasında bir köprü kurulmasına katkı sağlamaktadır. Her yıl artan başvuru sayısı ve çeşitlenen proje içerikleri, doğaltaşın farklı disiplinlerdeki karşılıklarını daha görünür kılmaktadır.

Uluslararası Değişik Doğaltaş Tasarım Yarışması, özellikle genç tasarımcıları cesaretlendirmesi bakımından önemli bir işleve sahiptir. Yarışmaya katılan projelerde; geleneksel malzeme olan doğaltaş, çağdaş tasarımın dinamikleriyle yeniden yorumlanmakta; dijital üretim teknikleri, sürdürülebilirlik kriterleri ve kullanıcı deneyimi gibi kavramlarla entegre edilmektedir (Kılıç ve Demirtaş, 2022). Ayrıca yarışma, kazanan tasarımların prototipleştirilmesi ve üretim süreçlerine dâhil edilmesiyle yalnızca teorik değil, pratik katkılar da sunmaktadır. Marble İzmir gibi uluslararası fuarlarla entegre yürütülmesi, yarışmanın hem ulusal hem de küresel ölçekte tanınırlığını artırmakta ve Türk doğaltaş sektörünün yaratıcı yüzünü görünür kılmaktadır. Bu durum, tasarım odaklı kalkınma stratejilerine katkı sunarken, aynı zamanda yerel kaynakların daha katma değerli ürünlere dönüşmesini desteklemektedir (Öztürk, 2021).

Tablo 1. Yıllık Katılım Analizi

Yıl	Başvuru Sayısı	Katılımcı Ülke Sayısı	Finale Kalan Proje	Ödül Alan Proje	Kazanma Oranı (%)
2018 (Ezber Bozan Tasarım Yarışması)	46 proje	Ülke bilgisi yok	17 finalist	3 ödül	~6.5 %

2022 (4. ed.)	1072 proje	15 ülke	28 finalist	3 ödül	~0.38 %
2023 (5. ed.)	1072 proje	15 ülke	28 finalist	3 ödül	~0.38 %
2024 (6.ed.)	1265 proje	20 ülke	34 finalist	3 ödül	~0.34 %
2025 (7.ed.)	892 proje	Ülke bilgisi yok	24 finalist	3 ödül	~0.44 %

2022-2025 yılları arasındaki verilere bakıldığında; başvuru sayısında yaklaşık yirmi yedi kat gibi bir artış görülmektedir. Finalist proje sayısının 17’den 34’e iki kat arttığı, kazanma oranının 2018’deki yüksek düzeyden (%6,5) 2024’e kadar %0,34’e kadar düşerek çok daha seçici bir hal aldığı görülmektedir. Bu veriler ışığında, yarışmanın hem uluslararası tanınırlığının arttığını hem de seçicilik ve kalite standardının yükseldiği söylenebilmektedir. 2025 yılında ise bu oranın 0,44'lere çıktığı görülmektedir. 2018-2025 yılları arasında yapılan yarışmaya ilişkin afişler Tablo 2’de gösterilmektedir.



Görsel 4, 5, 6 . Uluslararası Değişik Doğaltaş Yarışması Tasarım Yarışması Afişleri (URL 4, 5,6)

Uluslararası Değişik Doğaltaş Yarışması’nda Ödül Alan Projelerin İncelenmesi

2022 yılında yapılan “Değişik Bir Tasarım Yarışması” temasıyla düzenlenen 4. Değişik Doğaltaş Tasarım Yarışması’nda 46 çalışma değerlendirmeye alındığı bilinmektedir. Değerlendirmeye alınan çalışmalardan 17’si finale kalma hakkına sahip oldukları görülmektedir. Ödül alan çalışmalardan biri kent mobilyası, biri aydınlatma elemanı bir diğeri de bahçe-kafe mobilyası olarak tasarlanmıştır. 2023 yılında 15 ülkeden 1072 proje değerlendirilmeye alınmış olup 28 finalist çalışmadan 15’i ödüle layık görülmüştür. Bu ödüllerden 3’ü dereceye giren, 12’si ise firma özel ödülü, yurt dışı fuar katılım ödülü, yabancı katılım ödülü gibi çeşitli ödüller layık görülmüştür. 2024 yılındaki yarışmada 15 ülkeden 1072 proje değerlendirilmeye alınmış olup 28 finalist çalışmadan 18’i, ödül aldığı görülmektedir. Bu ödüllerden 3’ü dereceye giren, 15’si ise firma özel ödülü, yurt dışı fuar katılım ödülü, yabancı katılım ödülü gibi çeşitli ödüller layık görülmüştür. 2025 yılında yapılan yarışmada katılımcı sayısı ve ülke sayısı belirtilmemekle birlikte 25 finalist çalışma olduğu açıklanmıştır. Ödüllerden 3’ü dereceye giren,

22'si ise firma özel ödülü, yurt dışı fuar katılım ödülü, yabancı katılım ödülü gibi çeşitli ödüller layık görülmüştür. Çalışmaların form, malzeme ve işlev analizleri Tablo 2'de görülmektedir.

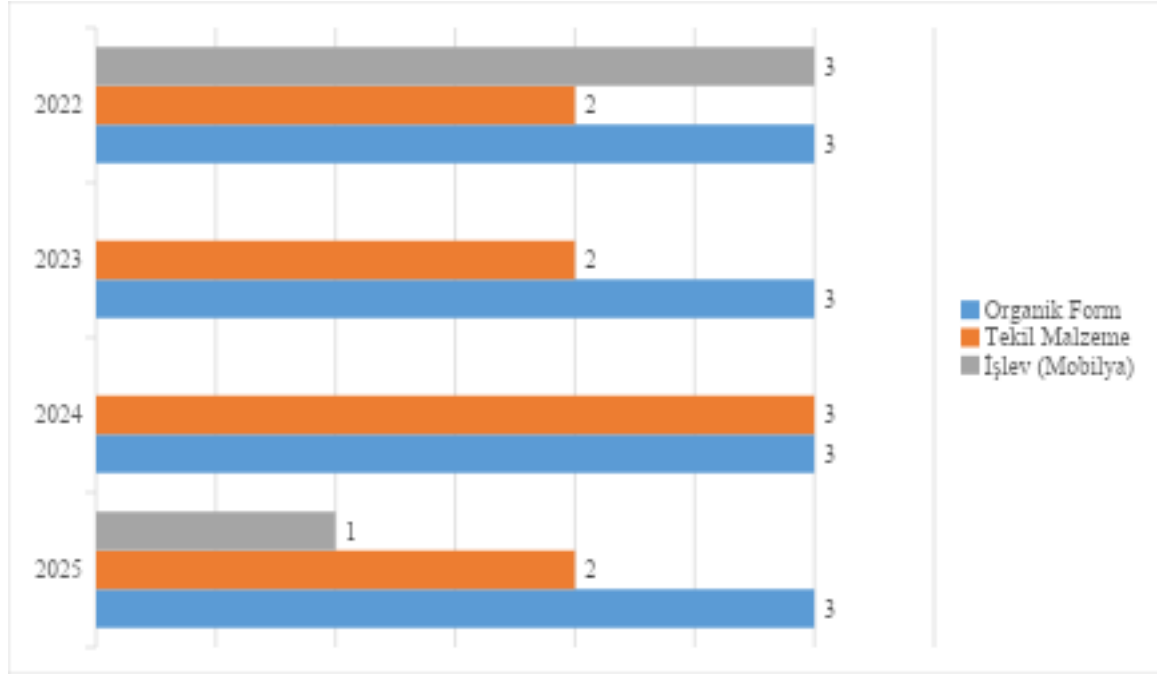
Tablo 2. 2022-2025 Yılları Arasındaki Dereceye Giren Çalışmalar

2022	Çalışmanın Derecesi	1	2	3
	Çalışma Görseli			
	Form	Organik	Organik	Organik
	Malzeme	Doğaltaş-Ahşap	Doğaltaş	Doğaltaş
	İşlev	Kent Mobilyası-Oturma Birimi	Aydınlatma	Bahçe-Kafe Masası
2023	Çalışmanın Derecesi	1	2	3
	Çalışma Görseli			
	Form	Organik	Organik	Organik
	Malzeme	Doğaltaş (Mermer)	Doğaltaş (Mermer)	Doğaltaş (Mermer)
	İşlev	Aksesuar-Takı Standı	Aydınlatma-Kase	Aydınlatma-Buhurdanlık
2024	Çalışmanın Derecesi	1	2	3
	Çalışma Görseli			
	Form	Organik	Organik	Organik

	Malzeme	Doğaltaş-(Mermer) Metal	Doğaltaş (Mermer)	Doğaltaş (Mermer)
	İşlev	Saat-Aydınlatma	Duvar Saati	Mutfak Ekipmanı-Havan
2025	Çalışmanın Derecesi	1	2	3
	Çalışma Görseli			
	Form	Organik	Organik	Organik
	Malzeme	Doğaltaş-(Mermer)	Doğaltaş (Mermer)	Doğaltaş (Mermer)
	İşlev	Oturma Birimi	Sehpa	Komodini-Sehpa

2022 yılında yapılan yarışmada dereceye giren çalışmalar üzerinden form, malzeme ve işlev özellikleri analiz edildiğinde, yarışmacılardan ikisinin (1. ve 3'üncü olan çalışma) mobilya işleviyle tasarladığı görülmekle birlikte yarışmacılardan birinin (2. olan çalışma) aydınlatma tasarımı yaptığı görülmektedir. 1. ve 3'üncü olan tasarımda yalnızca doğaltaş kullanılmadığı, yardımcı malzeme olarak ahşap ve metal kullanıldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca dereceye giren tasarımlardan 1. ve 2. olanının tekil fonksiyonda olduğu, 3. olan tasarımın ise ikincil fonksiyona sahip olduğu ifade edilmektedir. Yarışma amacının; doğaltaşın endüstriyel tasarım sürecinde kullanım alanının artırılması olarak düşünüldüğünde sonuç ürünlerin amaca hizmet edebilecek oranda doğaltaş kullanımına sahip oldukları anlaşılmaktadır. 2023 yılında teması "aksesuar tasarımı" olarak belirlenen yarışmada dereceye giren çalışmalar üzerinden form, malzeme ve işlev özellikleri analiz edildiğinde, 1. olan çalışmanın takı standı işleviyle tasarlandığı görülmekle birlikte 2. ve 3. olan çalışmaların aydınlatma ekipmanı olarak tasarlandığı görülmektedir. 3. olan çalışmada ikincil fonksiyon olarak buhurdanlık işlevi olduğu da bilinmektedir. Dereceye giren ilk üç tasarımın malzeme içeriğine bakıldığında çoklu materyal ve doku kullanıldığı tespit edilmiştir. Formal açıdan üç çalışmanın da organik hatlarla tasarlandıkları görülmektedir. 2024 yılında tasarım içeriğinin "ev-ofis aksesuarı" olarak belirlenmesiyle dereceye giren ilk üç tasarımın 2'sinin (1. ve 2. olan çalışmalar) saat olarak düşünüldüğü, 3. olan çalışmanın ise mutfak ekipmanı olarak (havan) tasarlandığı bilinmektedir. Ayrıca 1. olan çalışmada yardımcı materyal olarak metalin de kullanıldığı, 2. ve 3. olan çalışmalarda ikincil malzeme olarak doğaltaş kullanıldığı görülmektedir. Derece alan ilk üç çalışmada da formların organik olarak tasarlanmış olduğu, 1. ve 3. olan tasarımlarda çoklu işlev tercih edilirken 2. olan tasarımda tekil işlev kullanıldığı da görülmektedir. 2025 yılında tasarım içeriğinin "mobilya" olduğu yarışmada; 1. dereceyi alan çalışmanın çoklu işlevinin olduğu (Oturma birimi ve kitaplık), 2. ve 3. olan çalışmaların ise tekil işleve (sehpa, komodini gibi) sahip oldukları tespit edilmiştir. Malzeme kullanımına bakıldığında ise 1. ve 2. olan çalışmaların tekil doğaltaş malzemeye, 3. olan çalışmanın ise çoklu doğaltaş malzemeye sahip oldukları görülmektedir. Yarışmanın temasına uygun olarak dereceye giren ilk 3 tasarımın işlevlerinin de mobilya tasarımı oldukları bilinmektedir. Sonuç olarak, Şekil 7'de belirtildiği üzere Uluslararası Değişik Doğaltaş

Tasarım Yarışması'nda dereceye giren tasarımcıların son 4 yılki verilerine bakıldığında tüm çalışmaların organik form ile oluşturulduğu görülmektedir. Tekil malzeme kullanım eğilimlerinin 2023 yılı haricinde sabit kaldığı, işlev seçiminin yarışma temasına sadık kalınarak yapıldığından dolayı 2023 ve 2024 yıllarında mobilya tasarımı olarak tasarlanmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 7. 2022-2025 Yılları Arasında Yapılan Yarışmada İşlev-Tekil Malzeme-Organik Form Kullanım Analizi

SONUÇ

Sonuç olarak, yarışmanın düzenlendiği 2022-2025 yılları arasındaki doğaltaş ihracatına bakıldığında yaklaşık 1,9 milyar dolar ile 1,95 milyar dolar arasındaki değişimiyle ülke ekonomisi açısından önemi görülmektedir. 2022 ve sonrasında blok taş ihracatının işlenmiş ürünlere oranının azalması doğaltaş ve maden sektöründe tasarım ve endüstriyel tasarımın önem arz ettiği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda tasarımcıların üreticilerle ve firmalarla buluşmalar hem doğaltaş tanınmaları hem de sektörün gelişimi açısından değerlidir. Genç tasarımcıların eğitim hayatlarına ve sonrasında profesyonel kariyerlerine destek olmak adına düzenlenen tasarım yarışmalarının varlıkları bu anlamda çok kıymetlidir. Sayısal verilerin bu ilişkilerin kuvvetlendiğinde olumlu olarak ihracat hacmine yansıdığını görmek mümkündür. Ülkemizde düzenlenen tasarım yarışmaları içerisinde sadece öğrenci kategorisi olan ve bu yönüyle farkındalık yaratan Değişik Doğaltaş Tasarım Yarışması'nın konu kapsamındaki katma değeri oldukça yüksektir. Hem üreticiler hem de genç tasarımcıların buluşmaları, birlikte çalışma imkânının oluşturulması, ülkemizdeki tasarımcıların doğaltaş tanınması ve firmaların da tasarımcıların dünyalarını görebilmeleri adına Değişik Doğaltaş Tasarım Yarışması kıymetli bir yer teşkil etmektedir. Genç tasarımcıların tasarımlarını görselleştirme aşamalarında BİM tabanlı programları kullandıkları bilinmektedir. Bu anlamda firmaların elinde bulunan ya da temin edebilecekleri ürünlere ait kaplamaların (texture) bir sanal kütüphanede toplanması ve bu kütüphanenin de ücretsiz olarak tasarım firmaları ile eğitim kurumlarıyla paylaşılmasının hem yarışma katılımlarını artıracak hem de sektörel olarak işlenmiş ürün hacminin pozitif anlamda etkileneceği düşünülmektedir. Yarışma tasarımlarına ödül alan çalışmalar üzerinden bakıldığında form olarak organik hatların seçilmesi hem doğaltaş sektörüne hem de bu sektöre hizmet eden makine sektörüne bir potansiyel oluşturmaktadır. Sonuç olarak işlevsellik boyutunda tekil ya da çoğul işlev fark etmeksizin tasarımcıların, formal olarak organik hatları tercih etmesi; firmaların da bu yönde dikkatlerini çekmesi gereken bir veri elde edilmiştir. Bu tür tasarım

yarışmalarının, doğaltaş firmalarıyla tasarımcıları buluşturmaları yanında, estetik kaygısıyla ürünlerin üretilmesi, işlevsel olarak kullanım potansiyeli yüksek ürünlerin elde edilmesi, tasarımcılara istihdam noktasında bir kapı açması ve doğaltaş firmalarının farklı bir tasarım perspektifiyle buluşması bağlamında önemli katkıları olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

Aydın, E. (2021). İç mekân tasarımında doğaltaş kullanımının estetik ve işlevsel yönleri. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İç Mimarlık Bölümü Yüksek Lisans Tezi.

Çelik, M. Y., Kavuşan, G. (2001). Doğaltaş ve Mermerlere Uygulanan Yüzey Şekillendirme Teknikleri, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 77, 86.

Çelik, H. (2019). Yapı malzemesi olarak doğaltaşların mimarideki kullanım biçimleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi Yayınları.

Demirtaş, A., Elmacı, M. (2018). İç mekân tasarımında doğaltaş kullanımının kullanıcı deneyimine etkisi. Tasarım Kuram Dergisi, 13(1), 45–58.

Ege Maden İhracatçıları Birliği (EMİB). (2023). Amorf Doğaltaş Proje ve Tasarım Yarışması.

İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB). (2023). Doğaltaş Tasarım Yarışması 2023.

İZFAŞ. (2023). Uluslararası Değişik Doğaltaş Tasarım Yarışması Tanıtım Kataloğu. İzmir Büyükşehir Belediyesi Yayınları.

Kılıç, B., Demirtaş, N. (2022). Doğaltaş Malzemenin Tasarımsal Dönüşümü: Yarışma Pratikleri Üzerinden Bir Okuma. Tasarım ve Kuram Dergisi, 18(2), 45-60.

Koç, R. (2020). Sürdürülebilir iç mimarlıkta doğal malzeme kullanımı: Doğaltaş örneği. İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Araştırmaları Dergisi, 6(2), 102–117.

May, R. (1975). The courage to create. New York: Norton.

MAYEM. (2025). 7. Uluslararası Doğaltaş Tasarım Yarışması Duyurusu.

Öztürk, M. (2021). Doğal Kaynakların Tasarımla Değerlenmesi: Türkiye Örneği. Mimarlık ve Malzeme Araştırmaları, 7(1), 112–128.

Öztürk, M., Sarı, E. (2021). Endüstriyel tasarımda doğal malzeme kullanımı: Doğaltaş örneği. Tasarım Kuram ve Uygulama Dergisi, 9(1), 22-38.

Yılmaz, S., Demirtaş, E. (2020). Mimari tasarımda doğaltaşların tarihsel gelişimi ve günümüzdeki uygulama alanları. İnşaat Teknolojileri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 78–91.

<https://www.egebirlilik.org.tr>

<https://www.stoneworldtr.com>

<https://www.marble.izfas.com.tr>

<https://www.dogaltastasarimyarismasi.com>

URL 1 Lingguang Tapınağı <https://www.trip.com/travel-guide/attraction/changbai/lingguang-tower-23579544/>

URL 2 Sancaklar Cami <https://www.stoneworldtr.com>

URL 3 Trablus Kongre Merkezi <https://www.stoneworldtr.com>

URL 4 <https://www.degisiktasarimyarismasi.com/>

URL 5 <https://www.degisiktasarimyarismasi.com/>

URL 6 <https://www.degisiktasarimyarismasi.com>

KENT ESTETİĞİ BAĞLAMINDA TAŞ MALZEMENİN MİMARİ ÜSLUP OLUŞTURMASI: AFYONKARAHİSAR ÖRNEĞİ

ARCHITECTURAL STYLE CREATION OF STONE MATERIAL IN THE CONTEXT OF URBAN AESTHETICS: THE CASE OF AFYONKARAHİSAR

Ş.E. Okuyucu^{1*}, S. Baks¹, F. Mazlum^{2*}

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi ve Çevre Tasarımı Bölümü

² Afyon Kocatepe Üniversitesi Marmara Restorasyon Programı

*Sorumlu Yazar: smazlum@aku.edu.tr

ÖZ

Kent estetiği, bir kentin fiziksel ve görsel yönlerden bir bütün olarak ele alınma sürecini ifade eder. Mimari üslup da bu estetiğin önemli bir etkeni ve yansımasıdır. Mimarlığın teknik, mekânsal ve işlevsel yönlerinin bütünü eserin estetik değerini yansıtmaktadır. Tarihsel süreçte pek çok medeniyete ev sahipliği yapan Afyonkarahisar kentinin köklü tarihi, mimari üslubunu da şekillendirmiştir. Günümüze kadar ulaşan eserlerin kalıcılığına etken olan taş malzemeler mimari üslubun şekillenmesini her dönemde etkilemiştir. Sivil ve anıtsal mimarlık örneklerinde yaygın şekilde karşımıza çıkan taşlar, kentin kendine özgü bir yaklaşıma sahip olmasını sağlamaktadır. Afyonkarahisar kentinde de yerel taşın kullanımı yapılarıdaki mimari üslubu önemli ölçüde etkileyerek yapıların dönem etkisinin okunduğu kimlik öğeleri haline dönüşmesine katkı sağlamıştır. Çalışma kapsamında Cumhuriyet Dönemi eserlerinden olan Afyonkarahisar PTT Binası (Merkez Müdürlüğü) ile Ali Çetinkaya Gar Binası, ana yapı malzemesi olan doğaltaşın yapılara kazandırdığı üslup üzerinden değerlendirme yapılacaktır. Bu yapılar üzerinden Cumhuriyet Dönemi'nin mimarlık üslubunun eğilimlerini yansıtan mimari kimliğin aktarılması ve değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Dönem etkisinde modern mimarlık etkilerini yansıtan yapılar aynı zamanda yerel malzemenin kullanımı ile cephelerinde özgün bir üslup ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, yerel taşın, Cumhuriyet Dönemi mimarlığı üzerindeki üslup etkisi ve bu eserlerin kent estetiği bağlamındaki ilişkisi estetik bağlamda incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Cumhuriyet Dönemi mimarlığı, kent estetiği, mimari üslup, taş malzeme

ABSTRACT

Urban aesthetics refers to the process of considering a city as a whole in terms of physical and visual aspects. Architectural style is also an important factor and reflection of this aesthetic. The whole of the technical, spatial and functional aspects of architecture reflects the aesthetic value of the work. The deep-rooted history of the city of Afyonkarahisar, which has hosted many civilizations in the historical process, has also shaped its architectural style. Stone materials, which have contributed to the permanence of the works that have survived to the present day, have affected the shaping of the architectural style in every period. The stones, which are commonly encountered in examples of civil and monumental architecture, enable the city to have a unique approach. In the city of Afyonkarahisar, the use of local stone significantly affected the architectural style in the buildings and contributed to the transformation of the buildings into identity elements where the effect of the period is read. Within the scope of the study, Afyonkarahisar PTT Building (Central Directorate) and Ali Çetinkaya Station Building, which are among the works of the Republican Period, will be evaluated on the style brought to the buildings by natural stone, which is the main building material. Through these structures, it is aimed

to convey and evaluate the architectural identity that reflects the tendencies of the architectural style of the Republican Period. The buildings, which reflect the effects of modern architecture under the influence of the period, also reveal a unique style on their facades with the use of local materials. In this context, the stylistic effect of local stone on the architecture of the Republican Period and the relationship of these works in the context of urban aesthetics will be examined in the aesthetic context.

Keywords: Republican architecture, urban aesthetics, architectural style, stone material

GİRİŞ

Mimari üslup, mimari esere yüklediği görsel ve fiziksel özellikler ile kent ve yapı üzerinde kimlik oluşturmaktadır. Belli dönemde etkisi görülen veya bilinçli olarak yönelim sağlanan mimari üsluplar, mimarlık eserlerinin formlarından süsleme özelliklerine kadar barındırdığı anlayışı ile kente dair okuma yapmamızı sağlar. Üslubu oluşturan kimlik ifadeleri yapıların dönemlerine dair izlenim oluştururken, kendinden sonraki süreç için de bir altlık niteliği taşımıştır. Bunun yansıması olarak Cumhuriyet Dönemi'nin mimarlık anlayışını şekillendiren de Osmanlı Dönemi Batılılaşma sürecinden itibaren, döneme dair sosyo kültürel doku, kültürel yapı, teknolojiye gelişmeler olmuştur.

Toplumların geçirmiş olduğu ekonomik, politik düşüncesinden ve içinde bulunduğu sosyal çevreden etkilenmeyen bir sanat düşünülemez. Osmanlı Devleti'nin son döneminde geçirdiği toplumsal, ekonomik, siyasal ve kültürel değişimler aynı şekilde sanatına dolayısıyla mimarisine de yansımış, Cumhuriyet Dönemi Mimarlığının oluşmasını doğrudan etkilemiştir (Alsaç, 1976; Durukan Kopuz, 1999). Sanayi devrimi ile sanayinin ve teknolojinin gelişmesi, ekonomik ve sosyal yapının değişmesine neden olmuş; ulaşım ve iletişim araçları artmış ve yaygınlaşmıştır. Tüm bu gelişmeler mimarlığı da tasarım ve malzeme kullanımı alanında etkilemiş ve Avrupalı mimarların 20. yüzyıla özgü bir mimarlık yaratma çabaları ürünlerini vermeye başlamıştır (Hasbora, 1999). Cumhuriyet Dönemi mimarlığının getirdiği modernleşme süreci, kendine özgü malzeme seçimleri ile üslubu şekillendirmiştir. I. Ulusal Mimarlık Döneminde, geleneksel anlayışa yönelik malzeme tercihleri sürdürülürken, II. Ulusal Mimarlık Döneminde modernleşme yaklaşımı ile yerel doğaltaş kullanımları ve betonarme gibi yeni teknolojik materyaller ile malzemeler ön plana çıkmıştır. Uygulama süreçlerine bağlı olarak imalatların hızlanması, ulaşılabilirliği ve modern estetik anlayışı oluşturulmasının sonucu olarak özellikle kamu binaları kendine özgü üslupları ile daha büyük ölçeklerde görülmeye başlanmıştır. Bu yaklaşım ile döneme dair verilen mimari eserler, beraberinde taşıdığı kimlik ile kentlerin estetik algısını büyük ölçüde etkilemiştir.

Mimari üslubu şekillendiren önemli bir materyal olan malzeme, yapının bulunduğu bölgenin potansiyeline göre de bir şekillenme süreci oluşturmaktadır. Bu bağlamda zengin andezit taşı ocaklarına sahip olan Afyonkarahisar ilinde Cumhuriyet Dönemi'nde inşa edilmiş kamu yapılarına kimlik kazandırdığı görülmektedir. Kendine özgü renk tonları, dayanımı ve işlenebilirliği ile mimari üsluba katkı sağlamıştır. Bu bağlamda çalışmada, modern tasarım yaklaşımı ile II. Ulusal Mimarlık Dönemi etkilerinin görüldüğü Afyonkarahisar PTT Binası (Merkez Müdürlüğü) ve Afyonkarahisar Ali Çetinkaya Garı üzerinden yerel andezit taşının yapılara kazandırdığı üslup değerlendirilmesi yapılacaktır.

CUMHURİYET DÖNEMİ KAMU YAPILARINDA CEPHELERİN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ

Osmanlı Devleti'ndeki ilk Batılılaşma hareketi 18. yüzyılda sarayın isteği üzerine yapılarda uygulanmaya başlanan bezemeler ile başlamıştır. Yüzyılın sonunda ordunun daha çağdaş eğitim alabilmesi için Batı'dan getirilen askeri uzmanlar; kışla ve kamu yapıları, banka gibi yeni işlevlerin yer alacağı yapıları tasarlayacak olan yabancı mimarlar izlemiştir. Devletin öncülüğünde yapılan bu yenilikler, 1839'da ilan edilen Tanzimat Fermanı ile kısa sürede Batılılaşma hareketi olarak nitelendirilmiş ve her alanda hayata geçirilmeye çalışılmıştır (Hasbora, 1999). 19. yüzyıldan itibaren

özel bir mimari üsluba sahip, kâgir, gösterişli kamu yapıları inşa edilerek devletin otoritesi yapılar aracılığı ile hissettirilmiştir. Yeni ve farklı işlevli yapıların inşa edilmesi ile kent yapısında modernleşme ve dönüşüm görülmeye başlanmıştır (Sarı ve Umar, 2023). Bu dönem kamu yapılarında, üslup arayışları Neo-Klasik mimarlığı tanımlamıştır. Bu üslupta simetrik cephe düzenleri, anıtsal girişler, sütunlar, kemerler ve alınlıklar gibi Antik Yunan ve Roma Mimarisini yansıtmaktadır. Ankara'daki ilk TBMM binası ve bazı bakanlık binaları bu üslubun örneklerindendir. Türk Mimari stilinde olan iki katlı binanın en belirgin özelliği duvarlarında Ankara taşı andezit kullanılmış olmasıdır (URL 1).



Şekil 1. Ankara ilk TBMM Binası (URL 2)

Avrupa'nın Neo-Klasik üslubu karşısında Osmanlı Devleti'nde 1890 sonrasında milli mimari arayışları başlamış, Batı'dan başlayarak bütün dünyayı etkisi altına alan milliyetçilik hareketi 19. yüzyılda Osmanlı Devleti'nde de etkili olmuştur. 1908'de II. Meşrutiyet'in ilanı ile başlayıp 1930'larda sona eren dönem, Türk mimarlık tarihinde I. Ulusal Mimarlık Dönemi olarak tanınmıştır (Yavuz, 2009; Akbulut ve Şahin, 2024). Batı'nın etkisinden kurtulmanın ancak ulusal öğeleri bütünleştirilerek mümkün olacağını düşünen dönemin mimarları, eski mimari öğeleri yeniden ortaya çıkaracak tasarımlar kullanmışlardır (Sarı ve Umar, 2023). Yapılarda sivri kemer, ikiz veya üçüz pencere uygulamaları, geniş saçaklar taç kapı uygulamaları, bitkisel ve geometrik süslemeler, mukarnaslar gibi Geleneksel Türk Mimarisine özgü unsurlar uygulanmıştır (Özcan, 2003). Bu ulusçu yaklaşım etrafında şekillenen mimaride, planda işlevselliğe dikkat edilmesi nedeniyle üslup özellikleri daha çok cephe tasarımlarında dikkat çekmektedir. Üslup anlayışının karakteristik özellikleri kamu yapılarının cephelerinde sıklıkla kullanılmıştır (Akbulut ve Şahin, 2024).



Şekil 2. Mimar Kemalettin Bey tarafından inşa edilen Karaağaç İstasyonu (URL 3)

II. Ulusal Mimarlık akımının oluşmasında kendinden önceki dönemlerin etkisi bulunmaktadır. Türk mimarları rasyonel fonksiyoncu düşüncüyü geliştirme çabasında iken bir taraftan da bölgesel özelliklerin mimarlık üstündeki etkinliğini de göz ardı etmemişlerdir (Alsaç, 1976). II. Ulusal Mimarlık akımı olarak, rasyonel ve fonksiyoncu mimarlık akımının uzantısı şeklinde gelişen (Kopuz, 1999) üslup, dönem yapılarında farklı anlayışlarda sergilenmiştir. I. Ulusal Mimarlık Dönemi'nin yoğun süslemeci ve Osmanlı-Selçuklu özelliklerini yönelen ulusçu üslup azalmaya başlamıştır. Modernizmin işlevselci yanına yönelimle, yapılarda sadeleşme ve geometrik formlar ön plana çıkmıştır. Ancak bu modernizm, 1930'lu yıllardaki soyut ve evrensel modernizmden farklı olarak, ulusal bir kimlik arayışıyla şekillenmiştir.

1930'lu yılların zorunlu olarak yönlendiği devletçi ekonomi politikası kamu sektörünü yapılanma sürecinde öncelikli hale getirmiştir. Bu doğrultuda 1930-35 yılları arasında kentler, çağdaş toplum bilincini destekleyici biçimde yeniden örgütlenerek inşa edilmeye başlanmıştır (Atay, 1969). 1930'lu yıllarda Avrupa'da görülmeye başlanan yoğun baskıcı rejimler, faşizm ve Nazizm'in yükselişi birçok sanat alanında olduğu gibi mimarlık alanını da etkilemiştir. Bu mimarlık anlayışında anıtsallığın ön plana çıkması, büyük boyutlu yapılar, bu yapılarda doğa taş malzemenin kullanılması, cephelerde simetri izlenimi ve klasik anıtsal Avrupa mimarlığındaki yaklaşımlar söz konusudur (Şekil 3) (Sözen, 1984; Çubukçu, 2021).



Şekil 3-4. Devlet Opera ve Balesi Binası, Ankara Tren Garı, 1935 (URL 4, 5)

1930'lu yılların devletçi ekonomi politikası, kamudaki yapısal oluşum sürecini öncelikli hale getirirken, bu dönemde kentlerin şekillenmesinde Art Deco stili önemli bir rol oynamıştır. Cumhuriyet Dönemi Mimarlığı üzerine yapılan pek çok çalışmada aktarıldığı gibi, Art Deco'nun modern, geometrik ve anıtsal özellikleri, yeni devlet kimliği ile örtüşmektedir. Bu bağlamda inşa edilen yapılar, döneme estetik anlayış katarak kentlerin modern bir üslup kazanmasına katkıda bulunmuştur. Bu stilde inşa edilen önemli dönem eserlerinden birisi Ankara Tren Garı binasıdır (Şekil 4). 1927 ve 1940 yılları arasındaki Türk Mimarlığı 1927-33 ve 1933-40 yılları arasını kapsayan iki evrede incelendiğinde; ilk evreye ilişkin karakteristik özellikler şöyle sıralanabilir: yapıların planları işleve ve içindeki hacimlerin özelliklerine göre geometrik biçimler içinde, ama kare, dikdörtgen gibi belli, geometrik çerçevelere girmeden düzenlenmektedir. Teras çatı ve betonarme iskelet kullanımı yaygınlaşmaktadır. İkinci evrede, yani 1933-40 yılları arasında ise, mimari açıdan şu özellikler söz konusudur (Batur 1983; Gülbahar, 1995). Konutlarda ve kamu yapılarında işlevsel bir planlama uygulanmaktadır ve özellikle apartmanlarda bir tür "şemalaşma" oluşturulmuş durumdadır. Yapılar hangi amaca yönelik kullanılacaksa onun işlevsel çözümüne göre planlanıp biçimlendirilmektedir. Böylece "cephelere önem veren anlayıştan" uzaklaşmaktadır (Gülbahar, 1995). Eskinin yoğun bezemeli cephelerinin yerini daha yalın ve hatta tamamıyla bezemesiz cepheler almıştır (Sözen, 1984). Özellikle kamu binalarında etkisini gördüğümüz II. Ulusal Mimarlık Dönemi yapılarında, estetik kaygıların yanı sıra kullanım kolaylığı ve işlevsellik gözlenmektedir. Evrensel modernizm etkisinin yanı sıra, bazı mimarlar ve projelerde yerel coğrafyanın ve kültürel mirasın izlerini taşıyan tasarımlar da görülür. Malzeme seçiminde ve formlarda bölgesel özelliklere göndermeler yapılabilir. Bu tercihler, dönemin mimari üslubunu ve kentlerin fiziksel çehresini önemli ölçüde şekillendirdiği görülmektedir.

AFYONKARAHİSAR CUMHURİYET DÖNEMİ YAPILARININ İNCELENMESİ

Afyonkarahisar PTT Binası (Merkez Müdürlüğü)

Bayındırlık Bakanlığı ve Ulaştırma Bakanlığı görevlerinde bulunmuş, Türkiye Cumhuriyeti'nin ilk Ulaştırma Bakanı olan Ali Çetinkaya'nın Bakanlığı döneminde yaptırılmış bir yapı olan Afyonkarahisar PTT Binası Cumhuriyet Döneminin özelliklerini yansıtan önemli yapılardan biridir. Afyonkarahisar'da PTT binasının (Merkez PTT) yapımı 1938 yılında gerçekleştirilmiştir. Ali Çetinkaya Gar'ı ile aynı dönemde inşasına başlanan binanın postane olarak hizmet vermeye başlaması 1939 yılının sonuna tarihlendirilmektedir (URL 6). Günümüzde de Afyonkarahisar PTT Merkez Müdürlüğü olarak işlevini sürdürmektedir. Kent merkezinde inşa edilen PTT Binası bodrumlu, iki katlı, kuzey cephede dört katlı kare gövdeli saat kuleli bir yapıdır. Şehirde saat kulesinin bulunduğu iki yapıdan birisidir (İlaslı, 2012). Yapıdaki saat kulesi, binaya sadece işlevsel değil, sembolik bir değer de katmaktadır. Saat kuleleri, modernleşmenin ve zaman kavramının toplumsal yaşamda yer edinmesinin simgesi olarak da yorumlanabilir.



Şekil 5. Merkez PTT Binası (URL 7)

Ön ve arkadan iki girişi vardır, ayrıca güneyden bodruma bir başka girişi daha vardır. Ön giriş, ana giriş olması nedeniyle iki kat yüksekliğinde eyvan biçiminde içerlek boşluklu olup ortada iki dikmeyle desteklenerek görkemli bir cephe elde edilmiştir (İlaslı, 2012). Bu durum, yapının anıtsal ve simetrik mimariyi benimsediğini göstererek Cumhuriyet Dönemi'nde sıkça görülen devletin gücünü yansıtan mimari dil ile örtüşmektedir. Ön, arka ve güneyden olmak üzere birden fazla girişin bulunması, yapının kamusal işlevini ve erişilebilirliğini vurgulamaktadır. Ali Çetinkaya Tren Garı Afyon İstasyonu 19 Temmuz 1939 yılında tamamlanmış ve hizmete açılmıştır. Daha sonra istasyona, Afyon doğumlu olan Ali Çetinkaya'nın adı verilmiştir. Bugün de demiryolu istasyonu işlevini sürdürmektedir.



Şekil 6. Ali Çetinkaya Garı (URL 8)

Bina inşa edildiği dönemin II. Ulusal Mimarlık dönemi üslubunu yansıtacak biçimde dikey ve yatay hacimlerle yapılan bezemesiz, simetrik düzenlemelere, teras çatı ve geometrik cephe kompozisyonuna sahiptir. Tek katlı olarak yatayda gelişen istasyon binası, masif duvarları, geniş cam yüzeyli anıtsal girişi ve iki yöne uzanan kollarla simetrik yapısına karşın, sağ yan cepheye eklenen üç katlı lojman binası ve yükselen saat kulesi ile asimetrik bir forma kavuşmuştur. Saat kulesi gibi belirgin bir dikey öğeyle yatay bloğu birleştiren kütle kompozisyonu ve Afyonkarahisar'ın çetin kış koşullarına karşı uygulanan teras çatı dönemin mimari estetik anlayışının sonucudur (Erkan ve Haşmetoğlu, 2013).

Binanın yaklaşık 1500 m² alana sahip tek katlı istasyon bölümünde yöresel kesme andezit taşı kullanılırken, dönemin yeni malzemesi betonarme, hatılarda, döşemelerde ve giriş salonu, bavul bölümü gibi geniş açıklıkların geçilmesinde karkas sistem olarak kullanılmıştır. (Erkan ve Haşmetoğlu, 2013). Binanın bezemeden uzak anlayışı, mimarının yalınlık ve işlevsellik ilkelerini benimsediğini, süsleme yerine biçimsel olarak sadelikle etki yaratma arayışında olduğunu gösterir. Geniş cam yüzeyli girişler kamusal açıklığı ve modernliğin önemli temsilleridir.

Yapıların Üslup İncelemesi

Afyonkarahisar'daki Cumhuriyet Dönemi kamu binaları, modernleşme düşüncesinin somutlaşmış örnekleridir. İşlevselliklerinin yanı sıra yeni bir estetik anlayışı, çağdaş bir yaşam vizyonunu ve ulusal bir kimliği yansıtmaya misyonunu üstlenmişlerdir. Yapısal olarak işlevselliği ve mimari üslubun verdiği fiziksel görünüm ile dönem özelliklerinin tanımlanmasında cephe tasarımları önemli rol oynamaktadır. Bu çerçevede estetik anlayışı şekillendiren malzeme kullanımının, cephelerde imaj oluşturarak görsel üslubu önemli ölçüde şekillendirdiği görülmektedir. Çalışmada, bu kapsamda Merkez PTT Binası ve Ali Çetinkaya Gar Binası cephelerinde kullanılan malzeme, uygulama yöntemi, doğaltaşa ait renk seçimleri analiz edilecektir.

PTT Merkez Binasının kolonadlı giriş alanındaki traverten kaplama haricinde, her iki yapıda da cephe kaplamaları andezit malzeme ile yapılmıştır. Andezit, volkanik kökenli, dayanıklı ve kendine özgü dokusu ile dikkat çeken bir doğaltaştır. Çalışma bağlamında ele alınan cephelerde yüzey kaplama uygulamalarında, mimari elemanların ve yapı bölümlerinin sınırlandırılması, algılatılması yönünde renk ve uygulama tekniklerinde farklılıklar görülmektedir. Renk uygulamalarında beyaz, gri, pembe,

kahverengi tonları tercih edilmiştir. Uygulama tekniklerinde ise derzli ve derzsiz şekilde birleşen parçaların yüzeyinde genel olarak çekiçleme tekniğinin kullanıldığı görülmektedir.

Çizelge 1. Doğaltaş renk analizi tablosu

Malzeme / Renk Kodu*	Kullanılan Doğaltaş	Malzeme / Renk Kodu*	Kullanılan Doğaltaş
Traverten / 5Y 8/1 Yellowish Gray		Andezit / N8 Very Light Gray	
Andezit / N9 White		Andezit / 10YR 8/2 Very Pale Orange	
Andezit / 5R 7/4 Moderate Pink		Andezit / 5R 5/4 Moderate Red	
Andezit / 5RP 4/2 Grayish Red Purple		Yüzey üzerinde kaplama bulunduğu için malzeme tanımlaması gözle yapılamamıştır.	

* Doğaltaş renk analizi tablosunda bulunan renk kodları Geological Rock – Color Chart (2009) (URL 9) kaynağı üzerinden tespit edilmiştir.

Dönem izlerine dair özellikleri barındıran yapılar, kübik forma sahiptirler. Ana cephede, merkezde tanımlanan kolonadlı girişler sağ ve solda simetrik bir düzenli bir plan sistemini yansıtır olsa da her iki yapıda da bulunan saat kuleleri bu simetrik düzeni kırmaktadır. Her iki yapının ana giriş cephesinde de anıtsal yüksekliğe sahip üç parça şeklinde okunan kolonadlı girişler, malzemenin oluşturduğu sınır ve vurgu ile güçlendirilmiştir. Üslup etkisini de yansıtan bu anlayışta klasik referanslı anıtsallık yerine, daha soyut ve geometrik formlu mekânsal sınırlarla oluşturulan anıtsal girişler görülmektedir. Modernleşme etkisi ile geleneksel mimari formlardan uzaklaşan uygulamaların yansıması olarak giriş cephesindeki kolonları birbirine bağlayan düz kemerler görülmektedir. Gar binasında kolon ve kemer bağlantıları giriş boşluklarının etrafında cephe düzenlerinden daha koyu renkte (5R 5/4 Moderate Red), bordür şeklinde uygulanmıştır. PTT Binası cephesi de benzer düzende uygulamaya sahipken renk olarak daha koyu tonda (5RP 4/2 Grayish Red Purple) bir uygulama görünür. Giriş cephesinin iç kısmını oluşturan beden duvarlarında açık renkli traverten (5Y 8/1 Yellowish Gray) malzemenin kullanımı cephedeki giriş algısını güçlendirmektedir. Gar Binası ana cephesinde bej tonlarında (10YR 8/2 Very Pale Orange) kesme taş ve kilit örgü düzenini, giriş ve saçak yüzeyindeki renk geçişleri vurgulamaktadır. Ana cephe görünüşüne etken olan saat kulesinin de yer aldığı lojman bölümüne dair yapı bloğu renginin

daha koyu tonlarda uygulanması, yüzey farklılıklarının algılanması sağlanmıştır. Yapının sınır bölgelerinde ve detay vurgularında koyu tonlarda (5R 5/4 Moderate Red) andezit tercih edilirken arka ve sağ yan cephenin beden duvarlarında kesme taş ve kilit örgü düzeninde bej ve gri tonlarda (10YR 8/2 Very Pale Orange) andezit tercih edilmiştir. Lojman ve saat kulesinin bulunduğu yapı bloğunda kahverengi tonlarında görülen yüzey üzerinde kaplama bulunduğu için malzeme tanımlaması gözle tespit edilememiştir. PTT Binasında olduğu gibi dikey formda panel görüntüsü verecek şekilde bir kaplama uygulanmıştır. PTT Binasının ana giriş cephesi haricindeki diğer yüzeylerinde andezit malzemenin üç renk kullanımı görülmektedir. Zemin kotunu katlardan ayıran koyu ton (5RP 4/2 Grayish Red Purple) ile başlayan düzende, kat okumalarını sağlayan pencere kuşakları, alt ve üst bordür sıralarındaki pembe (5R 7/4 Moderate Pink) renk tonları ile ayrılmaktadır. Bu kuşaklar yatayda bant görünümü sağlarken aralarda dolgu olan beyaz (N9 White) renk dikey parçalarla panel kaplama görünümü vermektedir. Diğer cephe özellikleri ele alındığında ana cepheye göre renk ve uygulama biçimlerinin farklılaştığı tespit edilmiştir.

Çizelge 2. Yapılara ait analiz tablosu

YAPILAR	GİRİŞ CEPHESİ	DİĞER CEPHELER	PENCERE DÜZENİ	MALZEME UYGULAMASI
PTT Merkez Binası				
Ali Çetinkaya Tren Garı				

Gar binasındaki pencere, kapı gibi yapı elemanları, cephe sınırlarına dair net okumalar sağlamaktadır. Bu elemanlar yerleşim düzenleri ile cephelerin içerisinde dengeli bir görünüm oluşturmaktadır. Ana giriş kapılarında oluşturulan vurgular cepheden renk ve hacmi ile ayrılmaktadır. Ahşap kasalı olan kapılarda piriç detaylar dönemin Art Deco stilini yansıtan örneklerdir. Kapı dışına söve şeklinde uygulanan yüzeyi (malzeme tespiti gözle yapılamamıştır) kaval silme görünümüyle vurgu oluşturmuştur. Kapı ve pencere lentoları ve denizliklerdeki malzeme formları ile tanımlamalar yapılmıştır. PTT Binasının giriş cephesindeki kolonadlı bölümde yer alan yüksek pencerelerde vitray pencere uygulamaları yer almaktadır. Kat tanımlamalarını sağlayan pembe tonundaki andezit malzeme, oluşturduğu kuşaklar ile pencereler için de tanımlama sağlamıştır. Cephe düzeninde, yapı elemanlarının cam, metal, ahşap gibi malzemeleri ile estetik bir kombinasyon oluşturduğu görülmektedir. Kapılar ve pencereler cephenin anıtsal ve simetrik düzeniyle uyumlu bir şekilde tasarlanmıştır. Oranları ve yerleşimleri cephedeki malzeme dağılımı ile yapıların dengeli, net bir görünüm kazanmasını

sağlamaktadır. Kaynak yakınlığı dolayısıyla yapılarıdaki malzemenin yerel bağlamı ile güçlü bir ilişki kurarak yerellik vurgusu oluşturur. Andezitin kendine has renk tonları (beyaz, gri, pembe, kahverengi tonları) ile cepheye doğal ve sıcak bir görünüm oluşturmaktadır. İnceleme bağlamındaki yapıların, malzemenin özgün renkleri ve doğal nitelikleri sayesinde yapaylıktan uzak, canlı ve bütünsel bir algı yaratarak belirgin bir kimlik kazandığı görülmektedir. Yöresel bir malzeme olarak andezit taşının kullanımı hem yerel kaynakların değerlendirilmesi hem de doğaltaşın dayanıklılığından faydalanma açısından önemlidir. Bu durum, dönemin millî kaynaklara yönelim politikasıyla da bağdaşmaktadır.

SONUÇLAR

Cumhuriyet Dönemi kamu binaları, Türkiye'nin modernleşme serüveninin ve mimari düşüncesinin önemli birer göstergesidir. Cumhuriyet'le birlikte, Anadolu kentlerinde yaşanan değişim daha çok kamu yapılarıyla kendini hissettirmiştir. Afyonkarahisar'da II. Ulusal Mimarlık Akımı izlerini başarılı şekilde yansıtan dönemin farklı akım ve üsluplarını harmanlayan özgün örnekler bulunmaktadır. Bu bağlamda çalışma kapsamında ele alınan PTT Merkez Binası ve Ali Çetinkaya Tren Garı mimaride modernleşmenin, ulusal kimlik oluşumunun önemli iki örneği ve II. Ulusal Mimarlık Dönemi'nin estetik, teknolojik ve simgesel ifadeleri bir araya getiren nitelikli kamu yapılarıdır. Yalın, bezemeden uzak mimarisi, yerel ve modern malzemenin dengeli kullanımı, kent dokusundaki yeri ve sembolik öğeleriyle hem mimarlık tarihi hem de Cumhuriyet ideolojisinin mimari temsili açısından değerli örneklerdir. Bu bağlamda çalışma; II. Ulusal Mimarlık Dönemi'ne ait mimari ilkelerin yansımalarını görmek ve bu dönemin mimarlık dili ile ideolojik yansımaları arasındaki ilişkiyi, estetik bağlamda analiz etmek amacıyla ele alınmıştır. Yapıların işlevselliği ötesinde, bir dönemin toplumsal vizyonunu yansıtan mimari temsiller olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ele alınan yapıların fiziksel ve simgesel nitelikleri ile yerel tarih ve ulusal kimlik inşası açısından taşıdığı özellikler üzerinden bir belgeleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Doğaltaşın kullanımı üzerinden kent estetiğine sağladığı katkıyı, üslup özellikleri anlamında ele alınan çalışmada, malzemenin kullanım yeri ve biçimlerine göre katmanlı bir kimlik oluşturma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Yerel bağlamı, estetik çeşitliliği, dayanıklılığı ve sürdürülebilirlik özellikleri sayesinde yapıya özgün bir karakter kazandırmaktadır. Tasarım sürecinde andezit ve traverten gibi doğaltaşların, doğal özelliklerinin, işleme tekniklerinin ve diğer malzemelerle olan uyumunun bilinçli bir şekilde kullanılması, yapıların güçlü ve anlamlı bir kimliğe sahip olmasını sağlamıştır. Cumhuriyet Dönemi kamu binalarının cephe tasarımlarında belirleyici bir rol oynayarak dönem karakteri kazandırmıştır.

KAYNAKLAR

Akbulut, P., Şahin, M. (2024). Neo-Klasik Dönem ve Birinci Ulusal Mimarlık Dönemi Osmanlı Hapishane Yapıları Cephe Kurgularının Fraktal Analiz Yöntemiyle Karşılaştırılması, *IDA: International Design and Art Journal* ISSN: 2687-5373 V olume: 6, Issue: 2 / 2024

Atay, F. R. (1969). Çankaya, 1881-1938, Doğan Kardeş Matbaacılık, İstanbul, 1969, 452 Çubukçu, E. (2021). Erken Cumhuriyet Dönemi Mimarisinde Ulusal Kimlik Arayışı: Ankara'daki Kamu Yapıları.

Kültür Araştırmaları Dergisi, 2021, 9: 359-378 Durukan Kopuz, A. (1999). Cumhuriyet Döneminde Mimarlık Akımları ve Adana'daki Yansımaları. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi. Adana

Erkan, İ., Haşmetoğlu, H. Ş., (2013). Cumhuriyet Dönemi Mimarlığı Anadolu'da Modern Bir İstasyon Binası: Ali Çetinkaya İstasyonu. *Mimarlık* 374. Erişim Adresi: <http://www.mimarlikdergisi.com/index.cfm?sayfa=mimarlik&DergiSayi=388&RecID=3328>

Hasbora, H. (1999). İstanbul Art Deco Mimarisinde Apartman Cephe Tipolojisi. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi / Sosyal Bilimler Enstitüsü. İstanbul İlaslı, A. (2012). Tarihe Tanık Yapılar. Taşpınar Yerel Tarih ve Kültür Dergisi. Sayı 8.

Sarı, F.Z., Umar, N. (2023) Geç Osmanlı ve Erken Cumhuriyet Dönemi Kamu Yapıları: Malatya Kenti Örneği. Art-Sanat, 19(2023): 415–445 DOI: 10.26650/artsanat.2023.19.1132478 Erişim adresi: <http://art-sanat.istanbul.edu.tr/tr/>

Özcan, B. “Ankara Anafartalar Caddesi ve Çevresindeki Birinci Ulusal Mimarlık Dönemi Yapıları”. Yüksek Lisans Tezi. Ege Üniversitesi, 2002), 3.

İNTERNET KAYNAKLARI

URL1:<https://www.ktb.gov.tr/TR-96356/ankara---kurtulus-savasi-muzesi-i-tbmm-binasi.html>
Erişim tarihi: 06.04.2025

URL2:<https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/ankara/gezilecekyer/kurtulus-savasi-muzesi-i-tbmm-binasi> Erişim tarihi: 08.04.2025

URL3:<https://kulturportali.gov.tr/turkiye/edirne/gezilecekyer/karaagac-tren-gari> Erişim tarihi: 08.04.2025

URL4:https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27de_mimarl%C4%B1k#/media/Dosya:AnkaraStateOpera2.JPG Erişim tarihi: 10.04.2025

URL 5: <https://x.com/cekulvakfi/status/1661024429596622848/photo/1> Erişim tarihi: 09.05.2025

URL 6: <https://www.afyonzafer.net/ptt-172-yildir-hizmet-veriyor> Erişim tarihi: 10.05.2025

URL 7: <https://www.facebook.com/groups/583576672056877/posts/1433328080415061/> Erişim tarihi: 11.05.2025

URL 8: <https://kulturenvanteri.com/yer/ali-cetinkaya-gari-afyon/#17.1/38.764088/30.552389> Erişim tarihi: 11.05.2025

URL 9: <http://munsellstore.com/files/CIPA00011%5C599.pdf> Erişim tarihi: 14.05.2025

TRAVERTENLERİN FARKLI TUZ ÇÖZELTİLERİ İLE TUZ KRİSTALLENMESİNE BAĞLI FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF CHANGES IN PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF TRAVERTINE DUE TO SALT CRYSTALLIZATION WITH DIFFERENT SALT SOLUTIONS

M. Sert ^{1*}, M.Y. Çelik², Z. Arsoy²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mermer ve Doğaltaş Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü

*Sorumlu yazar: msert@aku.edu.tr

ÖZ

Travertenler yapı sektöründe oldukça sık kullanılan bir doğaltaş türüdür. Travertenler hem gözenekli hem de karbonat içerikli olduğundan tuzlu su ortamlarından yoğun olarak etkilenmektedir. Tuzlu su ortamlarına maruz kalan travertenlerin yapısal ve görsel bütünlükleri korunuyor gibi görünse de fiziko-mekanik özelliklerinde bazı olumsuzluklar meydana gelmektedir. Tuz korozyonunun neden olduğu bu olumsuzlukların, travertenlerin basınç dayanımları, su emme özellikleri ve gözenek boyutlarındaki değişimlerin oranlarının belirlenmesi, bu çalışmanın ana odak noktasını oluşturmaktadır. Bu amaçla travertenlerin kimyasal (XRF yöntemiyle), mineralojik-petrografik (polarize mikroskop, XRD ve SEM analizleri) özellikleri incelenmiş ve fiziko-mekanik özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir. Bunun yanında çalışmada kullanılan sodyum sülfat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve potasyum klorür (KCl) tuzlarına maruz kalan travertenlerin bozulma davranışları araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Traverten, tuz kristallenme, tuz korozyonu, fiziko-mekanik özellikler

ABSTRACT

Travertines are a type of natural stone that is frequently used in the construction industry. Due to their porous structure and carbonate content, travertines are highly affected by saline environments. Although travertines exposed to saline conditions may appear to maintain their structural and visual integrity, some adverse effects occur in their physico-mechanical properties. The main focus of this study is to determine the impact of salt corrosion on the compressive strength, water absorption properties and pore size distribution of travertines. For this purpose, the chemical (analyzed by XRF), mineralogical-petrographic (polarized microscope, XRD, and SEM analyses), and physico-mechanical properties of travertines were examined, and changes were determined. Additionally, the deterioration behavior of travertines exposed to sodium sulfate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) and potassium chloride (KCl) salts was investigated.

Keywords: Travertine, salt crystallization, salt corrosion, physico-mechanical properties

1. GİRİŞ

Travertenler yapı taşı olarak kullanılan suda çözünmüş kalsiyum karbonatın çökmesiyle oluşan gözenekli kireçtaşlarıdır (Pentecost, 2005). Alp-Himalaya orojenik kuşağında yer alan Türkiye, İran, İtalya, İspanya, Yunanistan ve Portekiz gibi birçok ülke büyük traverten rezervlerine sahiptir (Török, 2006; Pedley, 2009; Karaca vd., 2010; Török and Vásárhelyi 2010; García-del- Cura et al., 2012; Çobanoğlu 2015; Korkanç 2018, Çelik ve İbrahimioğlu 2021). Tuz kristalleşmesinin yapı taşlarının dayanıklılığı üzerinde önemli bir olumsuz olduğu ile ilgili literatürde akademik çalışmalar mevcuttur (Jefferson 1993; Cooke 1994; Steiger 1996, 2002; Steiger and Zeunert 1996; Benavente et al., 2007; Ruiz Agudo et al., 2007; Angeli et al., 2007; Yavuz ve Topal 2007).

Akın ve Özsan (2011) hızlandırılmış tuz yaşlandırma testleri kullanılarak sarı travertenin uzun vadeli dayanıklılığının değerlendirilmesi konusunda çalışmışlardır. Tuz kristallenme testleri (25 döngü) sonrasında travertenlerde %40–50 bütünlük kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan sodyum sülfat tuzunun magnezyum sülfat tuzuna göre daha yıkıcı olduğu belirlenmiştir.

Papay vd. (2021) çalışmalarında, gözenekli kireçtaşlarında Orta Avrupa bölgesinde geçmiş yüzyıllarda inşaatlarda yaygın olarak kullanılan üç farklı gözenekli kireçtaşını tuz ve donma-çözülme testlerine tabi tutmuştur. Bu testlerden önce numunelerin yüzeyine 4 farklı etil silika bazlı konsolide edici ile sağlamlaştırılmıştır. Bu sağlamlaştırma donma çözülme testlerinde işe yaramasına rağmen tuz kristallenmesi testlerinde istenen etkiyi göstermemiş, numunelerin tuz koşullarına karşı dayanımını artıramamıştır.

Romero Bastidas vd. (2022) çalışmalarında, Santa Ana de los Ríos de Cuenca, Ekvador'daki travertenlerin fiziko-mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığın belirlenmesi konusunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda gözeneklilik oranları yüksek travertenlerin düşük olanlara nazaran tuz kristallenmesinden daha fazla etkilendikleri belirlenmiştir.

Zalooli vd. (2019) çalışmalarında, İran'ın Doğu Azerbaycan eyaleti, Azarshahr'daki Gerdoi ve kırmızı travertenlerin dayanıklılık değerlendirmişlerdir. Her iki taşta da 20 döngünün sonunda kuru ağırlıkta çok hafif bir artış kaydedildi. Kırmızı travertenin kuru ağırlığı 30 döngüden sonra ani bir azalma göstermiştir. Tuz kristalizasyon testi sonunda elde edilen ağırlık kaybı Gerdoi ve kırmızı travertenlerde sırasıyla %3,32 ve %8,83 olmuştur. P-dalgı hızı azalması sırasıyla %36,43 ve %59,71'dir. Basınç dayanımlarındaki azalma da azalması sırasıyla %44,67 ve %53,69 olarak bulunmuştur.

Tuz kristallenmenin gözenek çeperlerine uyguladığı basınç üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde, ayrışma süreçlerinin mikroskobik nedenini anlamaya dönük çalışmalar, oldukça çeşitli disiplinler tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmalar sonucunda sınırlı ve aşırı doygun koşullar altında büyüyen tuzların kristalizasyon basıncı uyguladığı konusunda fikir birliğine varılmıştır (Evans, 1969; Goudie, 1974; Scherer, 1999; Espinosa-Marzal and Scherer, 2010; Flatt et al., 2014; Çelik ve Sert, 2022).

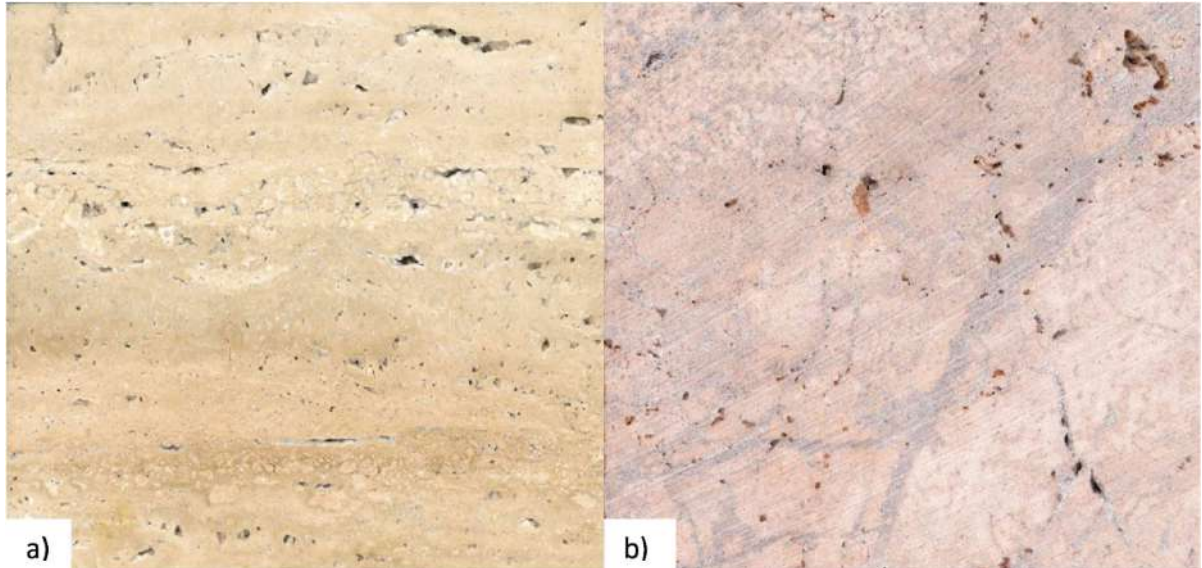
Doğada yapı malzemelerini zamanla korozyona uğratan farklı tuz bileşenleri bulunmaktadır. Potasyum klorür çok düşük konsantrasyonlarda deniz suyunda ve yeraltı sularında bulunmaktadır. Sodyum sülfat tuzu da potasyum klorür ile benzer olarak deniz suyunda ve tuzlu göllerde bulunmaktadır. Bu tuzlar aerosol etkisiyle deniz ve tuzlu göl kenarlarına yakın bölgelerdeki yapılarda kullanılan doğaltaşların yüzeylerine nüfuz ederek bozulmalarına neden olmaktadır. Ayrıca yeraltı suları, kılcal su emme yoluyla yapılarda ve kaldırımlarda kullanılan doğaltaşlara nüfuz edebilmektedir. Bu durum taşların hem görsel hem de yapısal bazı hazarlara uğramasına neden olmaktadır (Charola, 2000; Wüst and McLane, 2000; Ordóñez et al., 2016). Çalışmada potasyum klorür ve sodyum sülfat kullanılmasının nedeni traverten gibi taşların sıklıkla bu tuzların bozundurma etkilerine maruz kalıyor olmasıdır. Son

zamanlarda özellikle yeraltı sularından kılcal etki yoluyla gelen tuzların binaların zemine yakın doğaltaş kaplamalarına ve kaldırım döşemelerine zarar verdiği görülmektedir.

Bu çalışma, Türkiye'nin zengin traverten kaynaklarını ve yapı malzemesi olarak kullanabilirliğini tuz bozundurmaları yönünden ele almaktadır. Çalışma, travertenlerin gözeneklilik özelliklerinin ve bu özelliklerin tuz kristallenmesi sonucu nasıl değişiklik gösterdiğinin incelenmesine odaklanmaktadır. Bu bağlamda, sodyum sülfat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve potasyum klorür (KCl) çözeltilerinin travertenler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

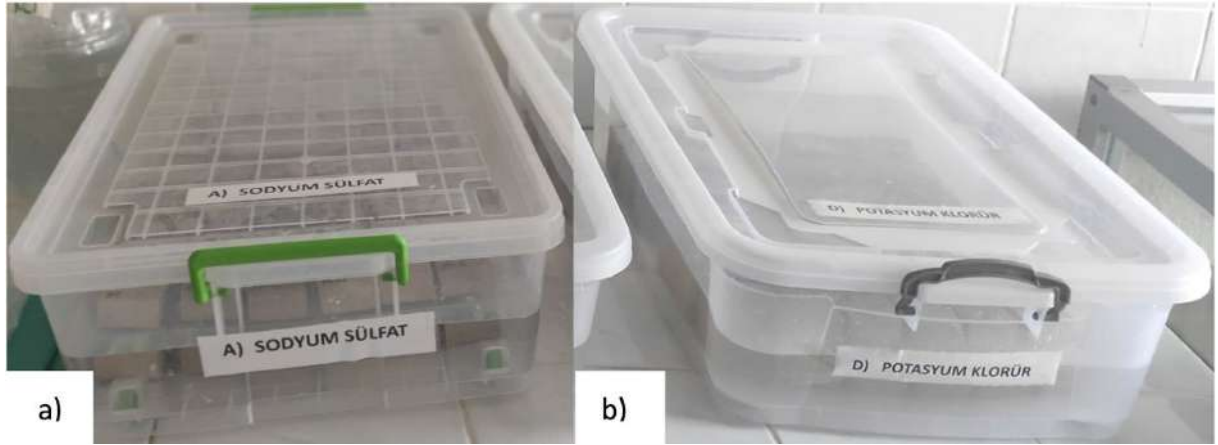
Bu çalışmada Türkiye'de yaygın olarak kullanılan ve ihraç edilen Karaman ve Kütahya illerinden çıkartılan traverten numuneleri kullanılmıştır (Şekil 1). Karaman travertenini (KT) çoğunlukla krem ve açık sarı renklindedir, Kütahya travertenini (PT) açık ila koyu pembe ve kırmızıdır. Her iki traverten türü de renk ve dokusal özellikleri nedeniyle benzerlerinden daha popülerdir. Deneylerin bir bölümü Mermer ve Doğaltaş Teknolojisi Araştırma ve Uygulama Merkezi ile Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Karaman (a) ve Kütahya (b) travertenlerinin yüzey görüntüleri

Numunelerin elementel bileşimleri TS EN 15309 standardı esas alınarak Afyon Kocatepe Üniversitesi Doğaltaş Analiz Laboratuvarında yapılmıştır. Kimyasal analizler Rigaku ZSX Primus 2 marka bir XRF (X-Ray Fluorescence Spectroscopy) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Petrografik tanımlamaları TS EN 12407 standardına göre Afyon Kocatepe Üniversitesi Doğaltaş Analiz Laboratuvarında yapılmıştır. Numuneler polarizan mikroskopta okunmadan önce ince kesit hazırlama işlemi yapılmıştır. İlk olarak numuneler lamel ebatlarına getirilmek için elmas bir testere yardımıyla kesilmiştir. Sonrasında kesilen numune yüzeyi cilalı değilse numune zımparalama-parlatma işlemi yapılmıştır. Bu işlem tamamlandıktan sonra lamel üzerindeki numune elmaslı taşlama makinasıyla $10\mu\text{m}$ 'a kadar inceltirilmiş ve polarizen mikroskopla incelenmiştir.

Travertenlerin tuz kristallenme testleri TS EN 12370 standardına göre yapılmıştır (Şekil 2). Numune boyutu olarak $50 \times 50 \times 50$ mm küp numuneler kullanılmıştır. Çalışmada %14'lük sodyum sülfat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve potasyum klorür (KCl) çözeltileri kullanılmıştır. Traverten örneklerinin tuz kristallenme testi öncesinde ve sonrasında Çizelge 1'de verilen testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Karaman (a) ve Kütahya (b) travertenlerinin tuz kristallenme testleri

Çizelge 1. Tuz kristallenme testleri öncesi ve sonrası gerçekleştirilen testler

Metot No	Metot Adı
TS EN 1926	Basınç dayanımı tayini
TS EN 14579	Ses hızı ilerlemesinin tayini
TS EN 1936	Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini
TS EN 13755	Atmosfer basıncında su emme tayini

3. BULGULAR

3.1. Kimyasal Analiz

Mikronize olarak öğütülmüş traverten örneklerinin ana element oksit (CaO , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , MnO , K_2O , TiO_2 ve P_2O_5) yüzdeleri X-ışını floresans spektrometresi (XRF) ile belirlenmiştir (Çizelge 2). Kalsiyum oksit (CaO) her iki traverten için en yüksek yüzde oksit içeriğine sahiptir. Her iki traverten de ağırlıkça kütlelerinin büyük bir kısmını (PT: %43,45, KT: %44,08) kızdırma kaybı (LOI) esnasında kaybetmiştir. Pembe travertenin demir oksit miktarının (PT: 0,10, KT: 0,03) bir miktar fazla olmasından dolayı pembe rengi aldığı düşünülmektedir.

Çizelge 2. Karaman ve Kütahya bölgesinden çıkartılan travertenlerin elementel bileşimleri

Bileşim	Kütahya Pembe Traverten (PT)	Karaman Sarı Traverten (KT)
Na_2O	0.01	-
MgO	0.17	0.22
Al_2O_3	0.04	0.03
SiO_2	0.11	0.04
P_2O_5	0.01	0.01
SO_3	0.01	0.01
CaO	56.02	55.58
MnO	0.02	-
Fe_2O_3	0.10	0.03
NiO	0.01	-
SrO	0.05	0.01

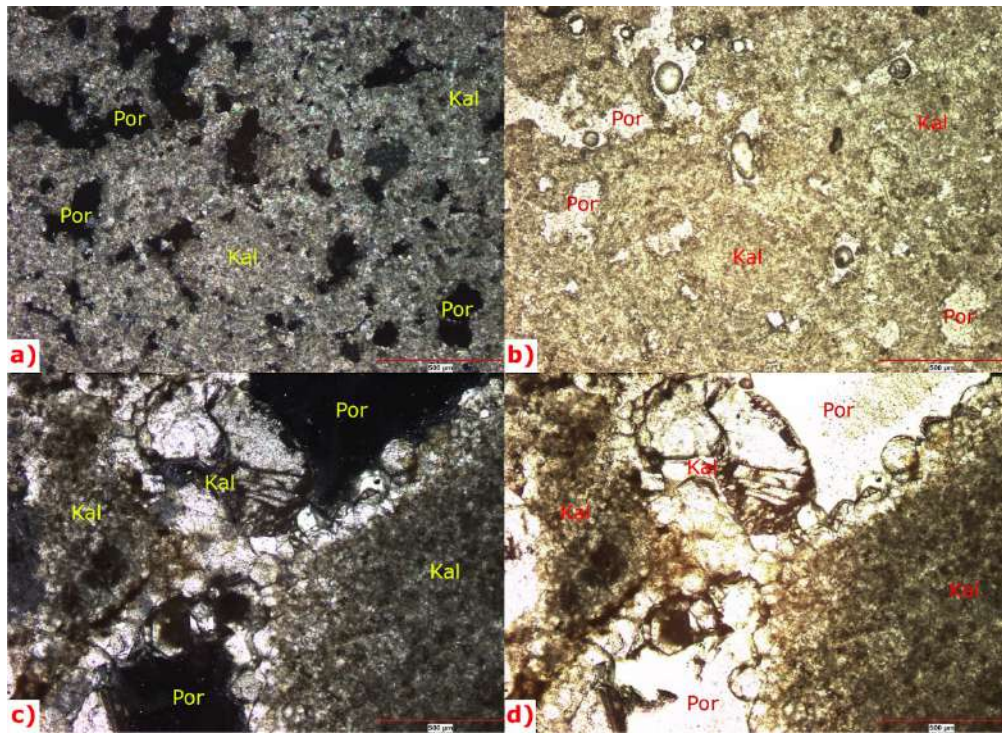
LOI

43.45

44.08

3.2. Petrografik Tanımlama

Örneklerin petrografik tanımlamaları her iki numune için üçer adet hazırlanan ince kesitler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Tüm travertenlerin polarize optik mikroskop analizine göre, kalsit tüm örneklerdeki en yaygın mineraldir. Kalsit kristalleri farklı büyüme oranları, boyutlar ve şekiller gösterir. Her iki numunede de gözeneklerin varlığı hem ham yüzey görüntülerinde hem de ince kesit görüntülerinde göze çarpmaktadır. Kristaller mikritik (çok ince taneli) yapıdadır. Kütahya traverteninin ince kesitlerinde kristalin kabuk dokuları da belirlenmiştir. Fe oksitler Kütahya traverteninde sıklıkla gözlenir. Birçok gözenek iri taneli ikincil sparitik kalsit ($>100\ \mu\text{m}$) ile doludur. Mikrit, $4\ \mu\text{m}$ 'den küçük ince taneli, eşit ve anhidral kalsit kristalleridir. Ayrıca, Kütahya traverteninde bazı doldurulmamış gözenekler tanımlanmıştır.



Şekil 3. Karaman (a, b) ve Kütahya (c, d) bölgesinden çıkartılan travertenlerin tek nikol ve çift nikol ince kesit görüntüleri. Kal: kalsit, Por: gözenek

3.3. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Karaman ve Kütahya travertenlerinin sodyum sülfat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve potasyum klorür (KCl) tuzlarına maruz bırakılmadan önceki ve tuz hasarına maruz kaldıktan sonraki fiziko-mekanik özellikleri Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. Karaman bölgesinden çıkartılan travertenlerin (KT) fiziko-mekanik özellikleri

Test Adı	Orijinal değer	Sodyum sülfat sonrası	Potasyum klorür sonrası
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	32,08	26,00	34,33
Ses hızı ilerlemesinin tayini (km/saat)	4974	4083	4891

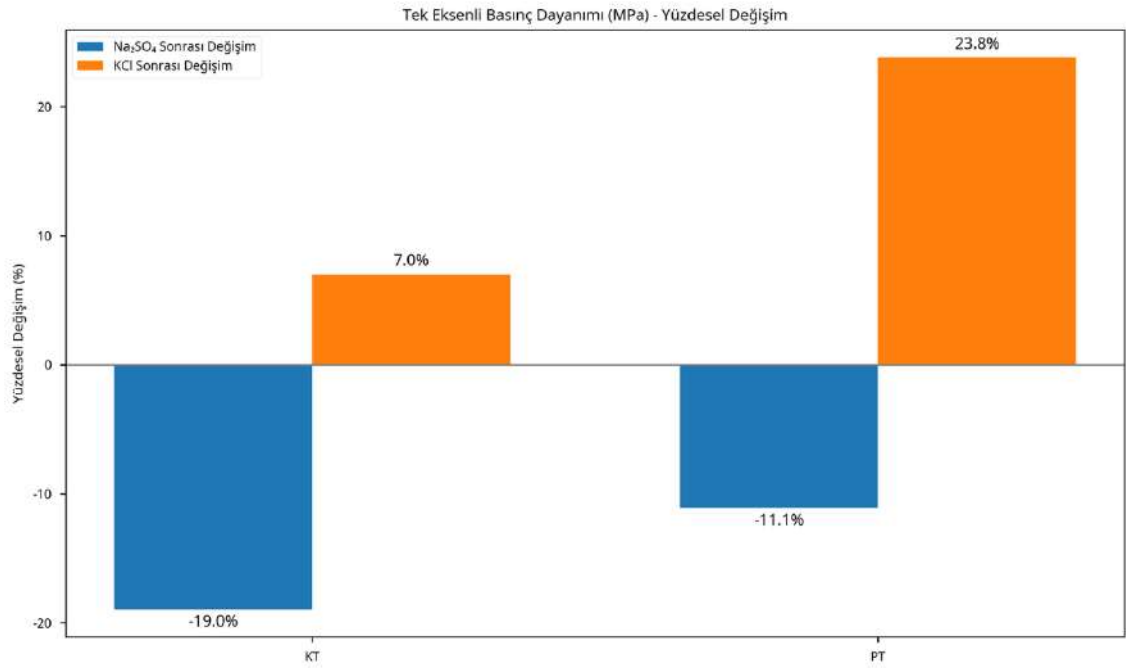
Atmosfer basıncında su emme tayini (%)	3,47 (Na ₂ SO ₄) 2,22 (KCl)	4,65	1,96
Gerçek yoğunluk (kg/m ³)	2732,33 2346,33	2681,50	2660,83
Görünür yoğunluk (kg/m ³)	(Na ₂ SO ₄) 2377,67 (KCl)	2355,33	2386,83
Toplam gözeneklilik (%)	14,15 (Na ₂ SO ₄) 13,00 (KCl)	12,17	10,30
Açık gözeneklilik (%)	5,94 (Na ₂ SO ₄) 4,89 (KCl)	5,73	3,80

Çizelge 4. Kütahya bölgesinden çıkartılan travertenlerin (PT) fiziko-mekanik özellikleri

Test Adı	Orijinal değer	Sodyum sülfat sonrası	Potasyum klorür sonrası
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	42,00	37,33	52,00
Ses hızı ilerlemesinin tayini (km/saat)	5161	2107	3178
Atmosfer basıncında su emme tayini (%)	0,70 (Na ₂ SO ₄) 0,71 (KCl)	1,25	0,99
Gerçek yoğunluk (kg/m ³)	2821,50 2561,83	2686,33	2694,83
Görünür yoğunluk (kg/m ³)	(Na ₂ SO ₄) 2569,50 (KCl)	2538,67	2544,50
Toplam gözeneklilik (%)	9,20 (Na ₂ SO ₄) 8,92 (KCl)	5,51	5,58
Açık gözeneklilik (%)	1,61 (Na ₂ SO ₄) 1,81 (KCl)	2,73	2,72

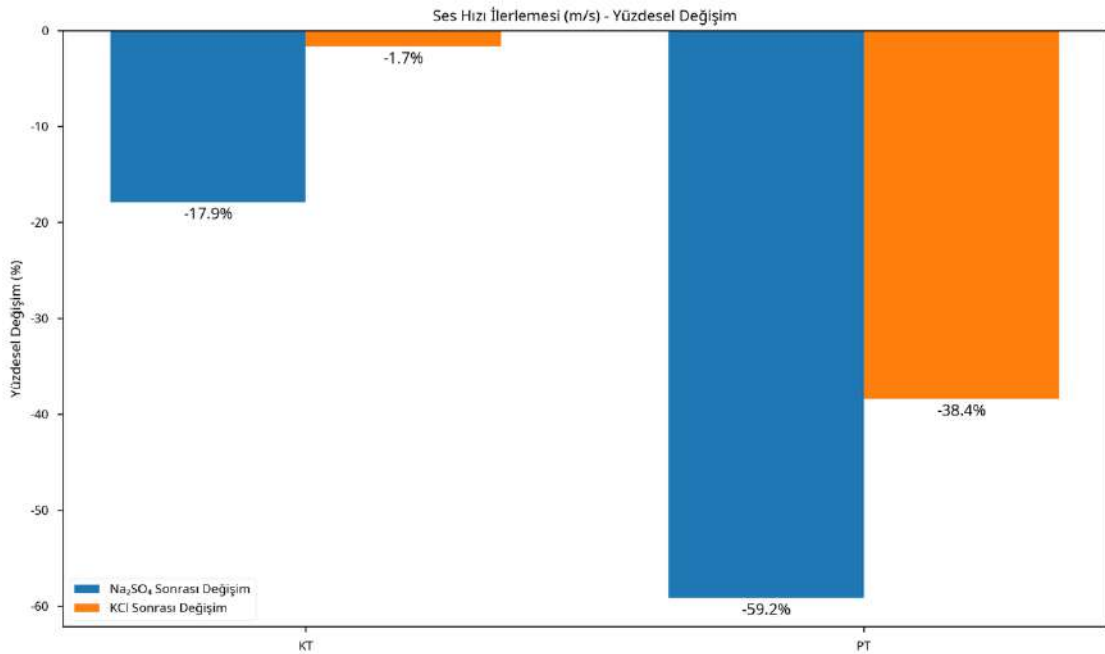
4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Analiz sonuçları incelendiğinde, her iki traverten numunesinin de tuz çözeltilerine maruz kaldıktan sonra fiziko-mekanik özelliklerinde belirgin değişiklikler gösterdiği belirlenmiştir. Bu değişiklikler, tek eksenli basınç dayanımı, ses hızı ilerlemesi, su emme, yoğunluk ve gözeneklilik değerlerinde gözlemlenmiştir. KT tek eksenli basınç dayanımında (%19) ve ses hızı ilerlemesinde (%18) önemli düşüşler gözlemlenmiştir (Şekil 4). Ses hızındaki azalma, malzemenin iç yapısında mikro-çatlakların oluştuğunun ve yapısal bütünlüğün zayıfladığının bir göstergesidir (Şekil 5). PT, KT'ye kıyasla Na₂SO₄ etkisine daha duyarlı olduğu görülmektedir. Basınç dayanımındaki düşüş (%11) KT'ye göre daha az olsa da ses hızı ilerlemesindeki azalma (%59) çok daha yüksektir. Bu durum, PT'nin iç yapısında daha yaygın bir mikro-hasara meydana geldiğini düşündürmektedir. Potasyum klorürün kristalleşme basıncı genellikle sodyum sülfattan düşüktür. Bu nedenle, genel olarak daha az hasara yol açması beklenir. KT'deki sonuçlar bu beklentiyle kısmen uyumludur. Ancak PT'deki ses hızı düşüşü, KCl'nin de önemli iç hasara neden olabileceğini göstermektedir. Basınç dayanımındaki beklenmedik artışlar, muhtemelen gözenek dolgusunun belirli test koşullarındaki mekanik tepkiyi iyileştirmesiyle ilgilidir, ancak bu durum malzemenin genel bozunma direncini yansıtmayabilir. Ses hızındaki düşüşler, her iki numunede de KCl maruziyeti sonrası bir miktar iç hasarın varlığını teyit etmektedir.



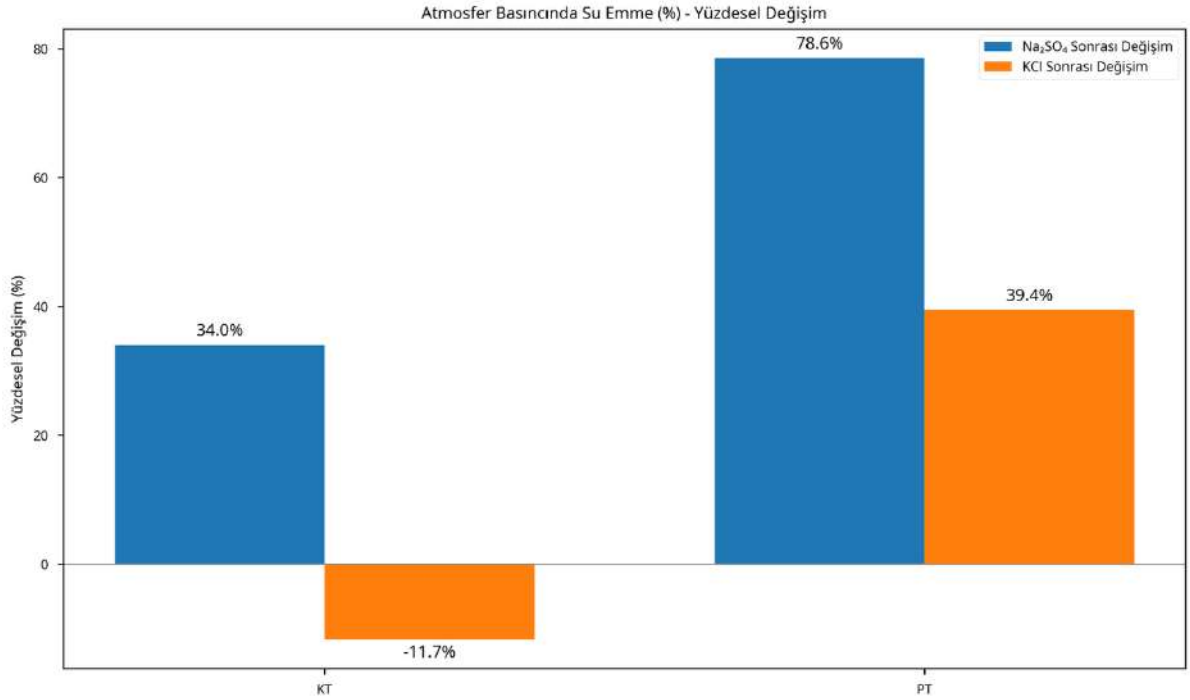
Şekil 4. Örneklerin tuz kristallenme testleri sonrası basınç dayanımı değerlerindeki değişimler

Na₂SO₄ işlemi PT üzerinde ses hızını yaklaşık %60 oranında azaltarak 5161 km/s'den 2107 km/s'ye geriletmiş, KT'de ise daha hafif bir düşüş gözlenmiştir (4974 km/s'den 4083 km/s'ye). Bu fark, PT'de iç çatlakların artışı ve buna bağlı olarak elastik rijitlikte büyük azalmayı göstermektedir (Şekil 5). KT'nin yoğunluğu 2732→2681 kg/m³'e, PT'ninki 2821→2686 kg/m³'e gerilemiştir (Şekil 7). Gerçek yoğunluk değerlerinde düşüş görülmesi ise örneklerin kılcal gözeneklerinde tuzların çökmesi ve çökelen tuzların yoğunluğunun örnek travertenlerin yoğunluklarından az olmasına bağlanabilir.

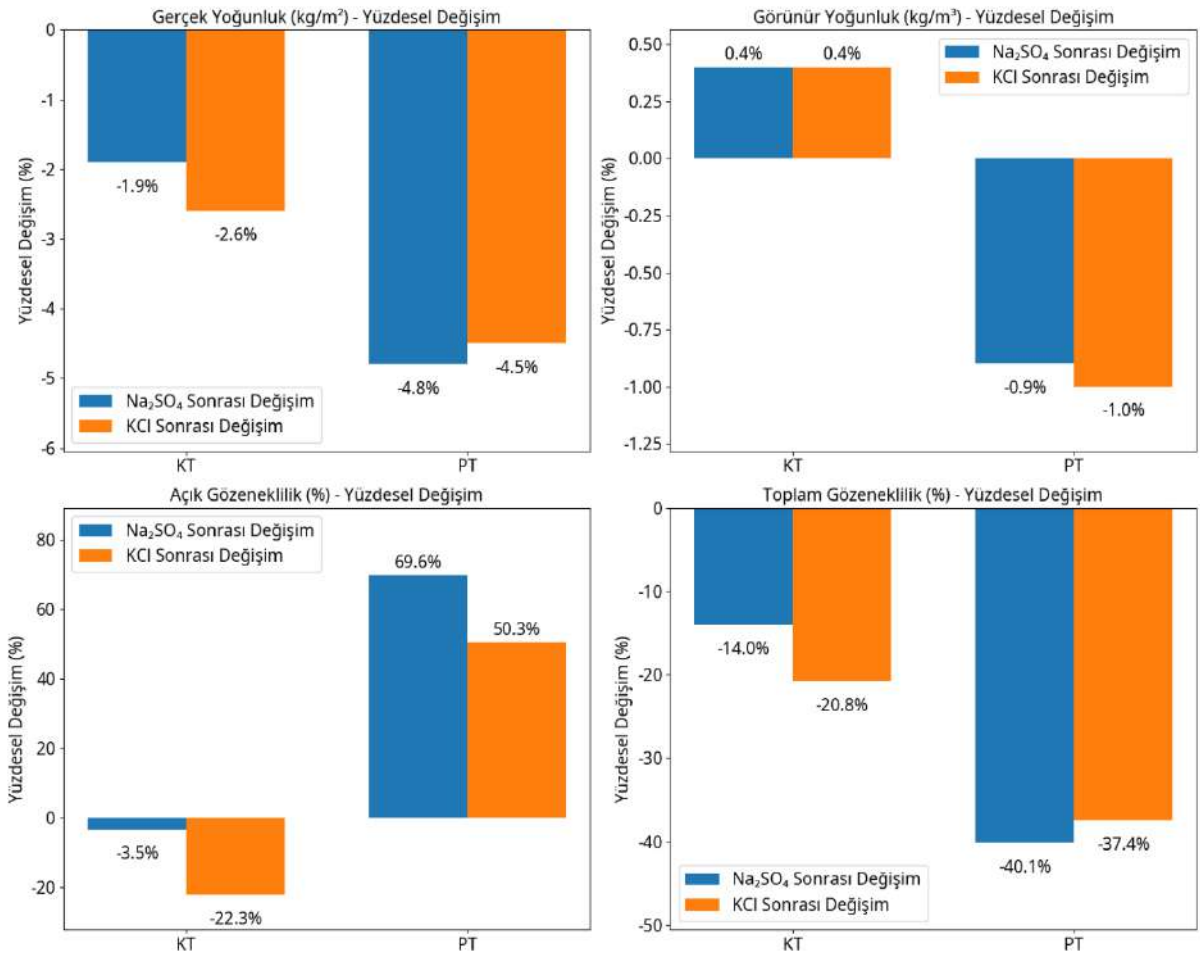


Şekil 5. Örneklerin tuz kristallenme testleri sonrası ses hızı değerlerindeki değişimler

KT için su emme oranında artış (%3,47'den %4,65'e) gözlenirken, toplam (%14,15'ten %12,17'ye) ve açık gözeneklilikte (%5,94'ten %5,73'e) azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 6, Şekil 7). Ayrıca her iki örnekte de su emme oranlarının azalması, gözeneklerin tuz çökeltileriyle dolduğuna işaret etmektedir. Her ne kadar tuz deneyleri sonrasında örnekler 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra yıkama işlemine tabi tutulsa da tuz etkisi kılcal yollarla numunelerin derinliklerine nüfus etmektedir.



Şekil 6. Örneklerin tuz kristallenme testleri sonrası su emme değerlerindeki değişimler



Şekil 7. Örneklerin tuz kristallenme testleri sonrası gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik değerlerindeki değişimler.

Elde edilen bulgular neticesinde, Karaman (KT) ve Kütahya (PT) travertenlerinin sodyum sülfat ve potasyum klorür tuzlarının bozundurucu etkilerine maruz kaldığını göstermektedir. Sodyum sülfat, her iki numunede de belirgin iç hasara ve mekanik özelliklerde zayıflamaya neden olmuştur, Kütahya traverteninin bu etkiye daha duyarlı olduğu görülmektedir. Potasyum klorürün etkileri daha karmaşıktır; bazı durumlarda (özellikle PT'de) tek eksenli basınç dayanımında artışa neden olurken, P-dalgası hızı ölçümleri önemli iç hasarın meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, oluşan tuz kristallerinin gözenekleri doldurmasının ve kristalleşme basıncının neden olduğu hasarın karmaşık etkileşimini yansıtmaktadır.

Gözenekliliği yüksek olan KT Na_2SO_4 maruziyetiyle belirgin oranda hasar görürken, KCl'in doğada daha düşük derişimli olması mikro gözenekleri kapatarak bir miktar sağlamlaştırıcı etki oluşturduğu düşünülmektedir. PT'de ise genelde gözeneklerin tuz kristalleriyle tıkanması mekanik dayanımı artırmış; Na_2SO_4 ile oluşan çatlaklar ise ses hızındaki düşüşe yansımıştır. Kimyasal bileşimdeki küçük farklılıklar (örneğin demir içeriği) bu davranışları tamamen açıklamasa da tüm bulgular taşların mikro yapısı ile ilişkili olduğu kanaatini desteklemektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 24.MUH.03 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Ayrıca numunelerin temini hususundaki katkılarından dolayı Gençler Mermer San. Tic. A.Ş. ve İnformar Mermer İnş. Nak. San. Tic. A.Ş. firmalarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akın, M., Özsan, A. (2011). Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 101–114. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0287-x>

Angeli, M., Bigas, J. P., Benavente, D., Menéndez, B., Hébert, R., David, C. (2007). Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage. *Environmental Geology*, 52(2), 205–213.

Benavente, D., Cueto, N., Martínez-Martínez, J., García del Cura, M. A., Cañaveras, J. C. (2007). The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. *Environmental Geology*, 52(2), 215–224.

Charola, A. E. (2000). Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39(3), 327–343.

Cooke, R. U., Gibbs, G. B. (1994). Crumbling heritage Studies of stone weathering in polluted atmospheres.

Çelik, M. Y., İbrahimoglu, A. (2021). Characterization of travertine stones from Turkey and assessment of their durability to salt crystallization. *Journal of Building Engineering*, 43, 102592. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102592>

Çelik, M. Y., Sert, M. (2022). An investigation of the pore size distribution variations with salt crystallization tests of Döğer tuff (Afyonkarahisar-Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(48). <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02549-z>

Çobanoğlu, İ. (2015). Prediction and identification of capillary water absorption capacity of travertine dimension stone. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 10135–10149. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1902-8>

Espinosa-Marzal, R. M., Scherer, G. W. (2010). Advances in understanding damage by salt crystallization. *Accounts of Chemical Research*, 43, 897–905.

Evans, I. S. (1969). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 19, 153–177.

Flatt, R., Caruso, F., Sanchez, A., Scherer, G. W. (2014). Chemo-mechanics of salt damage in stone. *Nature Communications*, 5(4823). <https://doi.org/10.1038/ncomms5823>

García-del-Cura, M. Á., Benavente, D., Martínez-Martínez, J., Cueto, N. (2012). Sedimentary structures and physical properties of travertine and carbonate tufa building stone. *Construction and Building Materials*, 28(1), 456–467.

Goudie, A. (1974). Further experimental investigation of rock weathering by salt crystallisation and other mechanical processes. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband*, 21, 1–12.

Jefferson, D. P. (1993). Building stone: the geological dimension. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 26(4), 305–319.

Karaca, Z., Deliormanli, A. H., Elci, H., Pamukcu, C. (2010). Effect of freeze–thaw process on the abrasion loss value of stones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(7), 1207–1211.

Korkanç, M. (2018). Characterization of building stones from the ancient Tyana aqueducts, Central Anatolia, Turkey: implications on the factors of deterioration processes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 237–252.

Ordóñez, S., La Iglesia, Á., Louis, M., García-del-Cura, M. Á. (2016). Mineralogical evolution of salt over nine years, after removal of efflorescence and saline crusts from Elche's Old Bridge (Spain). *Construction and Building Materials*, 112, 343–354.

Pápay, Z., Rozgonyi-Boissinot, N., Török, Á. (2021). Freeze–Thaw and Salt Crystallization Durability of Silica Acid Ester Consolidated Porous Limestone from Hungary. *Minerals*, 11(8), 824. <https://doi.org/10.3390/min11080824>

Pedley, M. (2009). Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments. *Sedimentology*, 56, 221–246. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.01012.x>

Pentecost, A. (2005). *Traverten*. Springer.

Romero Bastidas, M., Aguirre Ullauri, M. D. C., Ramírez Bustamante, J., Vargas Vallejo, M., Castillo Carchipulla, E. (2022). The quantification of physico-mechanical properties and durability of onyx-travertines from Santa Ana de los Ríos de Cuenca, Ecuador. *Heritage Science*, 10(1), 194.

Ruiz Agudo, E., Mees, F., Jacobs, P., Rodriguez Navarro, C. (2007). The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environmental Geology*, 52(2), 305–317.

Scherer, G. W. (1999). Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, 29, 1347–1358.

Steiger, M. (1996). Distribution of salt mixtures in a sandstone monument: sources, transport and crystallization properties. In F. Zezza (Ed.), *EC research workshop on origin, mechanisms and effects of salts on degradation of monuments in marine and continental environments* (ss. 241–246). European Commission.

Steiger, M. (2002). Salts and crusts. In P. Brimblecombe (Ed.), *The effects of air pollution on the built environment*. Imperial College.

Steiger, M., Zeunert, A. (1996). Crystallization properties of salt mixtures: comparison of experimental results and model calculations. In J. Riederer (Ed.), *Proceedings of 8th int congress on deterioration and conservation of stone* (ss. 535–544). Berlin.

Török, Á. (2006). Hungarian travertine: weathering forms and durability. In R. Fort, M. Alvarez de Buergo, M. Gómez-Heras, C. Vazquez-Calvo (Eds.), *Heritage, weathering and conservation* (ss. 199–204). Taylor & Francis Group.

Török, Á., Vasarhelyi, B. (2010). The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology*, 115, 237–245.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2006). TS EN 14579: Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri-Ses hızı ilerlemesinin tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2007). TS EN 1926: Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri-Basınç dayanımı tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2007). TS EN 1936: Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri-Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2008). TS EN 15309: Atıkların ve toprağın nitelendirilmesi-X ışını floresans yöntemi kullanılarak elementel bileşimin tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2014). TS EN 13755: Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri-Atmosfer basıncında su emme tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2019). TS EN 12407: Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri-Petrografik İnceleme. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2020). TS EN 12370: Doğaltaşlar-Deney Yöntemleri-Tuz kristallenmesine direncin tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Wüst, R. A., McLane, J. (2000). Rock deterioration in the royal tomb of Seti I, Valley of the Kings, Luxor, Egypt. *Engineering Geology*, 58(2), 163–190.

Yavuz, A. B., Topal, T. (2007). Mermer bozulmasında termal ve tuz kristalizasyonunun etkileri: Batı Anadolu, Türkiye'den örnekler. *Mühendislik Jeolojisi*, 90, 30–40.

Zalooli, A., Khomehchiyan, M. Nikudel, M. R. (2019). Durability assessment of Gerdoi and red travertines from Azarshahr, East Azerbaijan province, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 1683–1695. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1249-y>

LYCUS VADİSİ YERLEŞİMLERİNDEKİ MİMARİ MERMER BLOKLARI İÇİN OLASI BİR KAYNAK ALANI: THIOUNTA (GÖZLER-DENİZLİ) ANTİK MERMER OCAKLARI

A POSSIBLE PROVENANCE FOR ARCHITECTURAL MARBLE BLOCKS IN LYCUS VALLEY SETTLEMENTS: THIOUNTA (GOZLER-DENIZLI) ANCIENT MARBLE QUARRIES

T. Koralay ^{1,*}, M. Özkul ¹

¹ Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Denizli/Türkiye
tkoralay@pau.edu.tr

ÖZ

Antik dönemde dağlık Phrygia kentleri ile Lykos Vadisi arasındaki bağlantıyı sağlayan önemli bir geçiş noktasında konumlanan Thiounta antik yerleşimi, mermer ocaklarıyla öne çıkmaktadır. Tarihi kayıtlarda, buradan çıkarılan mermerlerin Roma döneminde, Hierapolis'te lahit yapımında kullanıldığı, Bizans döneminde ise "Thiounta'nın Sandıkları" adıyla Konstantinopolis'e gönderildiği yazmaktadır. Thiounta mermerleri, renk, foliasyon durumu, kristal boyutu ve mika içeriklerine göre beyaz, mavimsi gri bantlı ve mavimsi gri olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Beyaz ve mavimsi gri bantlı mermerler homoblastik/heteroblastik mozaik dokuya sahipken, mavimsi gri mermerler heteroblastik mozaik dokuya sahiptir. Mermer örnekleri, başlıca kalsit ± dolomit (beyaz), kalsit ± dolomit ± kuvars ± muskovit ± opak minerallerden (mavimsi gri bantlı, mavimsi gri) oluşmakta olup bu mineral bileşimini XRD çalışmaları da doğrulamaktadır. Mermerler, ana oksit ve iz element içerikleri bakımından benzer bir bileşim aralığına sahip olup Ti, Y, Zr, Fe ve Al içerikleri bakımından kısmen farklılıklar göstermektedir. Thiounta mermerlerinin $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ ve $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ değerleri sırasıyla beyaz mermerlerde 0,55‰ ile 2,24‰ ve -3,82‰ ile -3,24‰ arasında, mavimsi-gri bantlı mermerlerde -1,09‰ ile 2,26‰ ve -3,095‰ ile -2,55‰ arasında, mavimsi-gri mermerlerde ise -0,28‰ ile -0,04‰ ve -3,27‰ ile -2,93‰ arasında değişmektedir. Minero-petrografik, jeokimyasal ve C-O duraylı izotop sonuçları, Thiounta mermerlerinin kıta kenarında çökelmiş, yüksek CaO içerikli kireçtaşlarının metamorfizması sonucu oluştuğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Lykos Vadisi, Thiounta Mermerleri, Jeokimya, C-O izotopları

ABSTRACT

The ancient settlement of Thiounta, located at an important crossing point connecting the mountainous cities of Phrygia and the Lykos Valley, is renowned for its marble quarries. Historical records indicate that the marble extracted from here was used in the production of sarcophagi in Hierapolis during the Roman period and was later sent to Constantinople during the Byzantine period under the name "Chests of Thiounta." Thiounta marbles can be classified into three groups based on color, foliation, crystal size, and mica content: white, bluish-gray banded, and bluish-gray. White and bluish-gray banded marbles have a homoblastic/heteroblastic mosaic texture, while bluish-gray marbles have a heteroblastic mosaic texture. The marble samples are primarily composed of calcite ± dolomite (white) and calcite ± dolomite ± quartz ± muscovite ± opaque minerals (bluish-gray banded, bluish-gray). XRD studies also confirm this mineral composition. The marbles have a similar composition range regarding major oxides and trace elements but show variations in their Ti, Y, Zr, Fe, and Al contents. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ values of the Thiounta marbles range from 0,55‰ to 2,24‰ and from -3,82‰ to -3,24‰ in white marbles, from -1,09‰ to 2,26‰ and from -3,095‰ to -2,55‰ in bluish-gray banded marbles, from -0,28‰ to -0,04‰ and from -3,27‰ to -2,93‰ in bluish-gray marbles, respectively. Minero-petrographic, geochemical, and C-O stable isotope results reveal that the

Thiounta marbles formed due to the metamorphism of limestones with high CaO content deposited along the continental margin.

Keywords: Lykos Valley, Thiounta Marbles, Geochemistry, C-O isotopes

GİRİŞ

Mermer, antik çağlardan günümüze kadar kültürel ve sanatsal açıdan önemli bir yapı malzemesi olmuştur. Antik dönemde özellikle heykeltcilik, anıtsal yapılar ve tapınak inşasında yaygın olarak kullanılan mermer, aynı zamanda geçmiş toplumların ekonomik, kültürel ve ticari dinamiklerinin anlaşılması açısından önemli bilgiler taşımaktadır (Monna ve Pensabene, 1977; Dodge, 1991; Attanasio, 2003). Antik mermer ocaklarına yönelik jeoarkeoloji çalışmaları, yalnızca mermerlerin mineralojik ve jeokimyasal özelliklerini belirlemekle kalmayıp aynı zamanda geçmişte mermerin çıkarılması, işlenmesi ve taşınması süreçleri hakkında da önemli bilgiler sunmaktadır. Özellikle belirli ocaklardan çıkarılan taşların, antik yapıların inşasında ve heykel sanatında nasıl kullanıldığına dair araştırmalar, dönemin taş işçiliği teknikleri hakkında önemli ipuçları vermektedir. Örneğin, Roma ve Helenistik dönemlere ait mermer ocaklarında gözlemlenen testere izleri, metal tel testereler veya suyla soğutulan aşındırıcı tekniklerin kullanımına işaret etmektedir. Benzer şekilde, kırma ve şekillendirme aşamalarında tespit edilen kama ve çekiç izleri, blokların çıkarılmasında kama ile yarma yönteminin yaygın olarak tercih edildiğini göstermektedir (Asgari, 1979; Pensabene, 1985; Klemm and Klemm, 2008; Hirt, 2010; Malacrino, 2010; Bingöl, 2012).

Bununla birlikte, jeoarkeoloji çalışmaları antik mermer ticaretinin izlerini sürerek bu malzemenin farklı bölgelere nasıl taşındığını ve dağıtıldığını da ortaya koymaktadır. Petrografik, mineralojik ve jeokimyasal analizler, antik yapı ve heykellerde kullanılan mermerlerin kökenini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle karbon ve oksijen duraylı izotop analizleri, farklı mermer ocaklarına özgü kimyasal bileşimleri belirleyerek kullanılan taşların coğrafi kökenini tespit etmeye olanak sağlamaktadır. Mikroskobik incelemeler ise mermerin tane boyutu, dokusu ve mineral bileşimini analiz ederek kaynak tespiti sürecine katkıda bulunmaktadır. Bu sayede, belirli bir antik yapıda kullanılan mermerin hangi ocaktan temin edildiği belirlenerek antik ticaret ağlarının haritası çıkarılabilmektedir (Dodge, 1991; Herz, 1992; Asgari and Matthews, 1995; Gorgoni et al., 2002; Attanasio, 2003; Brilli et al., 2005; Bruno et al., 2012; Attanasio et al., 2015; Koralay ve Kılınçarslan, 2015; Cantisani and Scardozzi, 2016; Koralay and Kılınçarslan, 2016; Bağcı, 2020; Antonelli ve Nestola, 2021; Prochaska and Attanasio, 2022; Fernandez et al., 2023; Lapuente et al., 2024; Koralay et al., 2025). Ayrıca, tarihsel kayıtlar ve epigrafik belgeler de jeoarkeoloji çalışmalarına önemli destek sağlamakta olup antik metinlerde mermer ticaret yolları, taş ocakları ve büyük ölçekli inşaat projeleri hakkında çeşitli bilgiler yer almaktadır. Örneğin, Roma İmparatorluğu döneminde Dokimeion, Thasos, Prokonnesos ve Carrara gibi önemli mermer ocaklarından çıkarılan taşların, geniş bir coğrafyada inşaat ve sanat eserlerinde kullanıldığı bilinmektedir (Monna ve Pensabene, 1977; Pensabene, 1985; Dodge, 1991; Attanasio, 2003; Al-Bashaireh, 2021).

Batı Anadolu'da birçok medeniyetin mermer ihtiyacını karşılayan Göktepe, Afrodissias, Efes, Dokimeion, Synada ve Prokonnesos ocaklarına yönelik ayrıntılı ve çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, Roma ve Bizans dönemlerinde lahit yapımında kullanılan mermerlerin çıkarıldığı Thiounta ocakları yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışma kapsamında, Lykos Vadisi yerleşimlerinde yaygın olarak kullanılan mimari mermer blokların olası kaynak alanlarından biri olarak, tarihsel kayıtlar ve coğrafi konumu nedeniyle dikkat çeken Thiounta (Gözler-Denizli) antik mermer ocakları seçilmiş ve ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmada, söz konusu ocaklardan çıkarılan mermerlerin mineralojik, petrografik, ana ve iz element bileşimleri ile C-O kararlı izotop verilerine dayalı kapsamlı bulgular sunulmaktadır. Elde edilen sonuçların, Lykos Vadisi'ndeki antik yerleşimlerde (Hierapolis, Laodikya ve Tripolis) sürdürülen yenileme ve bütünleme çalışmalarına önemli bir bilimsel veri tabanı sağlaması hedeflenmektedir.

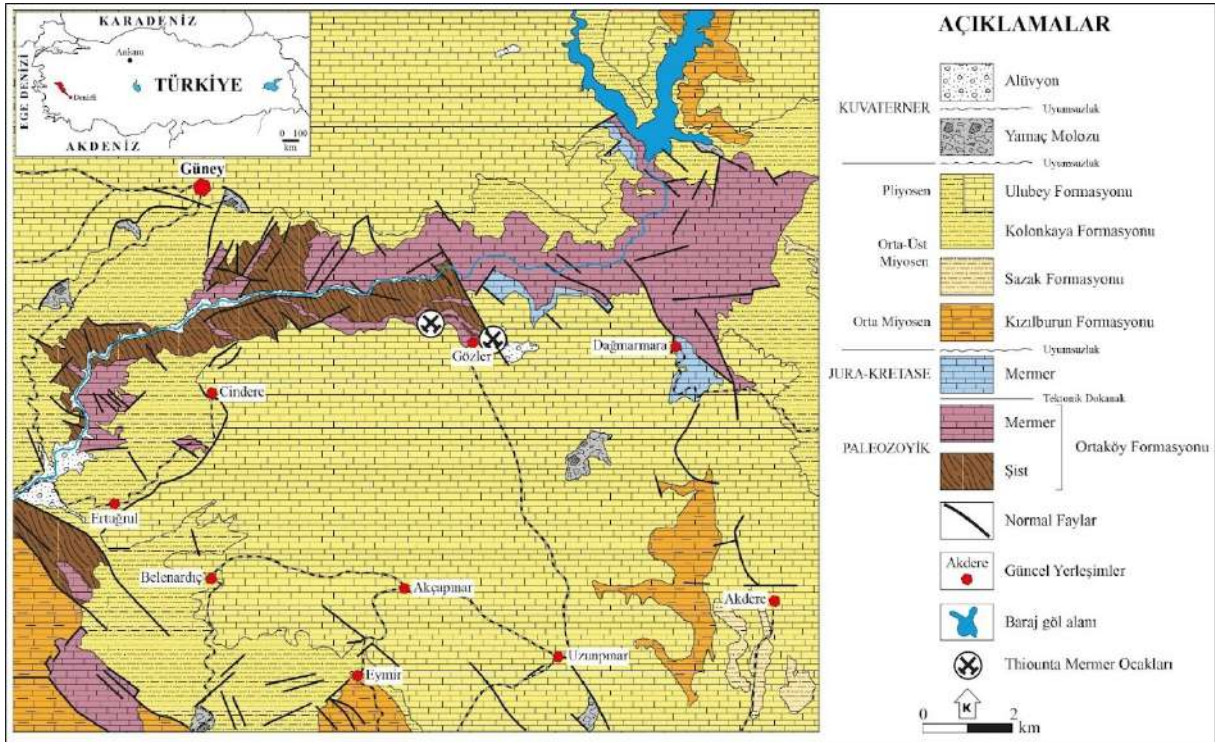
MATERYAL VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Ayrıntılı minero-petrografik, jeokimyasal ve C-O izotop analizleri için antik ve yakın dönem ocak aynalarından 12 mermer örneği alınmıştır. İnce kesitlerde mineralojik bileşim, kristal boyu, doku ve petrografik adlandırmalar belirlenmiş, fotoğraflar çekilmiştir. İncelemeler, Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde “Carl-Zeiss Primotech” polarize mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Mikroskobik olarak ayrımı yapılamayan karbonat minerallerini (kalsit, dolomit, aragonit vb.) ve daha küçük bileşenleri belirlemek için X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi uygulanmıştır. Bu amaçla mermer örnekleri, halkalı değirmende 150-200 mesh boyutuna kadar öğütülerek toz haline getirilmiş ve XRD analizleri, Ankara Üniversitesi YEBİM Laboratuvarında “Inel Equinox 1000” cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Mermer örneklerinin jeokimyasal özelliklerini belirlemek için X-Işını Floresans (XRF) analizi yapılmıştır. Örnekler, halkalı değirmende 150-200 mesh boyutuna kadar öğütüldükten sonra, her birinden 6,25 g alınarak 1,4 g bağlayıcı wax ile homojen şekilde karıştırılmıştır. Karışım, 15-20 N/m basınç altında 40 mm çapında tablet haline getirilerek analiz için hazırlanmıştır. XRF analizleri, Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde “Spectro XEPOS PEDXRF” cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 10 adet mermer örneğinin C ve O izotop oranları İngiltere’deki Iso-Analytical Limited laboratuvarında Sürekli Akış-İzotop Oranı Kütle Spektroskopisi (CF-IRMS) ile ölçülmüştür. Analiz sonuçları IA-R022 (Iso-Analitik çalışma standardı kalsiyum karbonat, $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = \text{‰} -28.63$ ve $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} = \text{‰} -22.69$), NBS-18 (karbonatit, $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = \text{‰} -5.01$ ve $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} = \text{‰} -23.2$) ve NBS-19 (kireçtaşı, $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = \text{‰} +1.95$ ve $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} = \text{‰} -2.2$) standartları kullanılarak kalibre edilmiştir.

THIOUNTA MERMER OCAKLARI VE ÇEVRESİNİN JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

Thiounta antik mermer ocakları, Denizli il merkezinin 45 km kuzeyinde, Gözler Kasabası yakınlarında bulunmaktadır (Şekil 1). Antik ocaklara ilişkin sınırlı bilgiler, Monna ve Pensabene (1977) ile Attanasio (2003) tarafından verilmiştir. Günümüzde bölgenin Gözler yerleşimi içinde kalması ve antik ocakların bulunduğu alanlarda geçen yıllar içinde modern mermer işletmelerinin faaliyet göstermesi nedeniyle, ocakların tahrip edildiği ve antik döneme ait işletme izlerinin yok olduğu belirlenmiştir. Çalışma alanında görülen jeolojik birimler yaşlıdan gence doğru;

1. Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalar (Ortaköy Formasyonu),
2. Jura-Kretase yaşlı mermerler,
3. Orta Miyosen yaşlı Kızılburun formasyonu,
4. Orta-Üst Miyosen yaşlı Sazak ve Kolokaya formasyonları,
5. Üst-Miyosen-Pliyosen yaşlı Ulubey formasyonu,
6. Kuvaterner yaşlı alüvyon ve yamaç molozu’ndan oluşmaktadır (Şekil 1) (Şimşek, 1984; Sun, 1990; Koralay and Özkul, 2017; Semiz et al., 2018)



Şekil 1. Thiounta antik mermer ocakları ve çevresinin jeoloji haritası (MTA 1:100000 ölçekli Uşak L-22 paftasından değiştirilerek alınmıştır.)

Bölgedeki bu kayaç toplulukları arasında uyumsuzluklar ve stratigrafik boşluklar bulunmaktadır. Thiounta antik mermer ocakları Menderes masifine ait metamorfik kayaçlar içerisinde görülmektedir (Şekil 1). Metamorfik kayaçlar Konak vd. (1987) tarafından “Ortaköy formasyonu” olarak adlandırılmıştır. Ortaköy formasyonu Menderes masifinin örtü serileri olarak adlandırılan düşük dereceli metamorfik kayaçlardan (granat mikaşist, grafit mikaşist, klorit şist, kuvars-muskovit şist, kalkışist ve mermer) oluşmakta olup kalınlığı 500 m’yi aşmaktadır (Şimşek, 1984; Sun, 1990). Ortaköy formasyonunun alt seviyesinde granat mikaşistler egemen olup 1-2 metre kalınlığında kuvarsit, kuvars şist, fillit, grafit şist ve mermer bant ve mercikleri görülmektedir. Formasyonun üst seviyelerinde kalkışist, kuvarsit ve mermerler bulunmaktadır. Mermerler orta-iri kristalli yapıda olup beyaz, mavimsi gri bantlı ve mavimsi gri renklerde görülürler. Mermer seviyeleri içerisinde gri, yeşilimsi kahverengi renkli şist mercikleri bulunmaktadır. Şist mercikleri ile mermerler arasında dokanak ilişkisi keskindir (Sun, 1990).

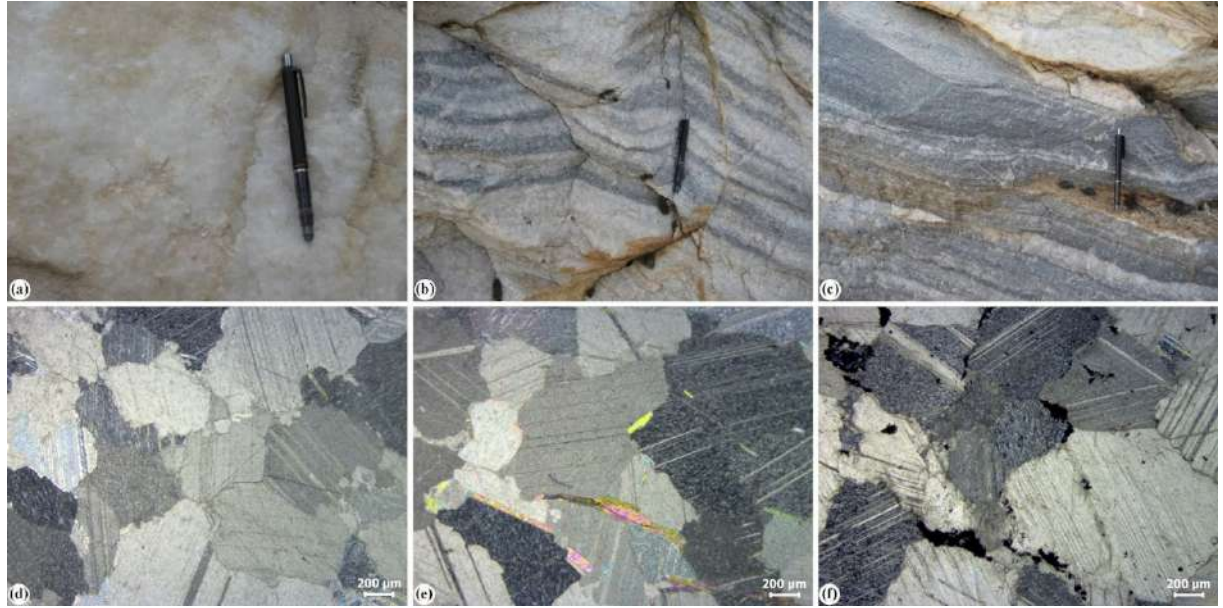
MERMERLERİN MİNERO-PETROGRAFİK ÖZELLİKLERİ

Thiounta mermer ocakları Uşak L22-d3 topografik haritasında yer almaktadır. Antik döneme ait olduğu düşünülen ocaklar Gölçü yerleşim sınırları içerisinde yer almakta olup yalnız bir ocakta molozlar içerisinde yarı işlenmiş silindirik mermer bloğu (şaft), bazı yüzeylerinde kazma ve sivri uçlu keski izleri bulunan mermer blokları ve kesme izleri görülen bir ocak aynası belirlenmiştir (Şekil 2a, b, c). Bunun dışında, alanda bulunan ve antik dönem işletmesi olabileceği düşünülen açmalarda belirgin kanıtlar tespit edilememiştir (Şekil 2d, e, f). Bu durumun başlıca nedenlerinden birinin, yakın döneme kadar bölgede faaliyet gösteren modern mermer işletmelerinin, antik dönem izlerini zamanla ortadan kaldırmış olabileceği değerlendirilmektedir.



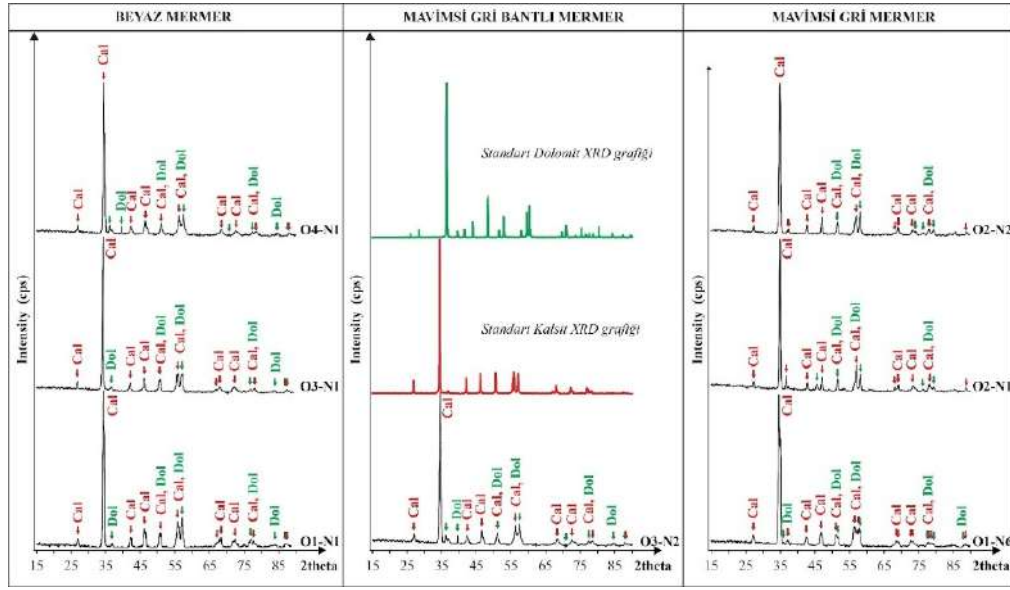
Şekil 2. a) Thiounta antik mermer ocağında görülen keski izleri, yarı işlenmiş b) silindirik mermer bloğu, c) dikdörtgen şekilli mermer bloğu, d, e) Antik dönemde işletildiği düşünülen ocak yüzeyleri, f) günümüz mermer işletmesine ait ocak aynası

Beyaz renkli mermerlerin atmosfer ile etkileşim halinde bulunan yüzeyleri kahverengimsi siyah renklerde olup taze kırık yüzeyleri beyaz renklidir (Şekil 3a). Beyaz renkli mermer örnekleri renk olarak homojen bir görünümde olup kristal yüzeyleri gün ışığında camı parlaklık göstermektedir. Yapısal bozunmaya uğramış örneklerin kolaylıkla ufalandıkları ve dağıldıkları görülmektedir. Beyaz renkli mermer örnekleri homoblastik/heteroblastik mozaik doku özelliği göstermektedir (Şekil 3d). Kristal sınır şekilleri kısmen düzgün olup küçük boyutlu kristallerde mozaik doku belirgindir. Mermer örnekleri baskın olarak karbonat (kalsit, dolomit) minerallerinden oluşmakta olup rombohedral dilinim izleri ve polisentetik ikizlenmeler belirgindir. Kristal boyutları 245.5-1517 (ortalama $780.3 \pm 250.7 \mu\text{m}$) arasında değişmektedir. Beyaz renkli mermerler ile ardalanmalı olarak görülen mavimsi gri bantlı mermer örneklerinin en tipik özelliği birbirine paralel bantlar şeklinde görülen bantlı bir yapıya sahip olmasıdır (Şekil 3b). Bantlar mavimsi gri renkli olup genişlikleri 0.5-5 cm arasında değişmektedir. Mavimsi gri bantlı mermer örnekleri homoblastik/heteroblastik mozaik dokuya sahiptir. Örnekler karbonat (kalsit, dolomit) mineralleri haricinde yuvarlaklaşmış taneler şeklinde kuvars, opak mineraller ile iğnemsî kristaller halinde görülen muskovit minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 3e). Karbonat mineralleri çoğunlukla özşekilli-yarı özşekilli kristaller halinde olup kristal boyutları 317.4-1399.2 (ortalama $745.1 \pm 243.7 \mu\text{m}$) arasında değişmektedir.



Şekil 3. Thiounta mermer örneklerinin el örnekleri ile mikroskop görüntüleri a, d) beyaz renkli mermerler, b, e) mavisimsi-gri bantlı mermerler, c, f) mavimsi gri renkli mermerler

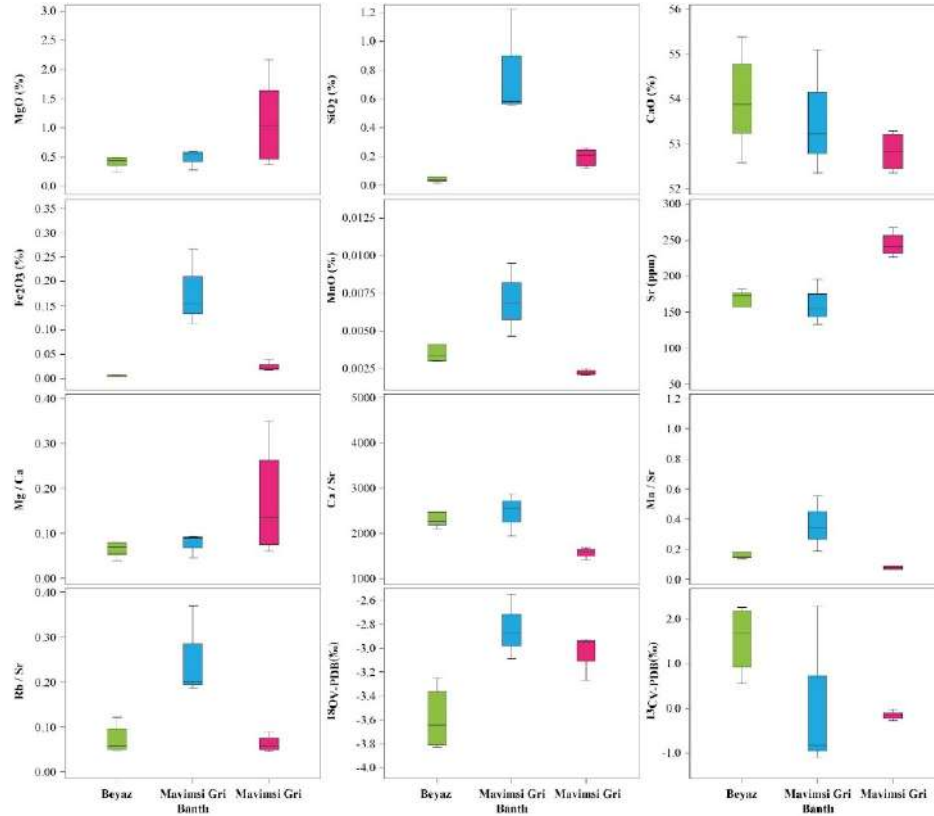
Mermerlerin alt seviyelerini oluşturan mavimsi gri renkli mermer örnekleri diğer örneklere göre nispeten daha küçük boyutlu kristal yapıya sahiptir. Mavimsi gri renkli mermer örnekleri içerisinde beyaz renkli, iri kalsit kristallerinden oluşan damar/mercek yapıları görülmektedir (Şekil 3c). Mavimsi gri renkli mermerler heteroblastik mozaik dokuda olup egemen olarak karbonat mineralleri (kalsit, dolomit) ve opak minerallerden oluşmaktadır (Şekil 3f). Bazı örneklerde yuvarlaklaşmış kuvars mineralleri ve iğnemi muskovit mineralleri ile birlikte bileşenlerin tipik olarak yönelme gösterdiği görülmüştür. Karbonat mineralleri çoğunlukla özşekilsiz kristaller halinde olup kristal boyutları 243,6-1590,6 (ortalama $669,6 \pm 240$ µm) arasında değişmektedir. Tüm kayaç toz XRD sonuçlarına göre; beyaz renkli mermer örneklerinde kalsit (daha az oranda dolomit), mavimsi gri bantlı ve mavimsi gri renkli mermer örneklerinde baskın olarak kalsit, daha az miktarda dolomit piklerinin varlığı belirlenmiştir (Şekil 4). Mermer örneklerini oluşturan bileşenlerin büyük oranda karbonat minerallerinden oluştuğu düşünüldüğünde daha az miktarda bulunan farklı minerallere (kuvars, muskovit gibi) ait piklerin maskelenmiş olması doğal bir sonuçtur.



Şekil 4. Thiounta mermer örneklerine ait tüm kayaç toz XRD grafikleri (Cal: Kalsit, Dol: Dolomit)

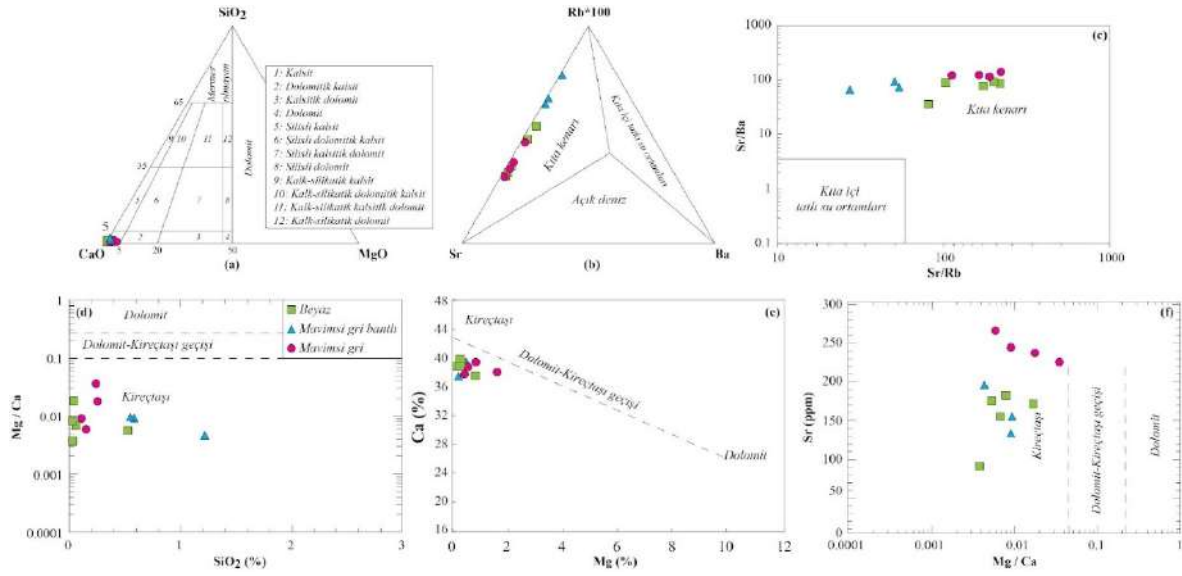
MERMERLERİN JEOKİMYASAL VE C-O DURAYLI İZOTOP BİLEŞİMLERİ

Petrografik ve XRD çalışmalarında farklılıkları belirlenen mermer örneklerinin jeokimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla ana ve iz element analizleri yapılmıştır. Mermer bileşimli karbonat kayaçlarının sınıflandırmasında önemli olan MgO , SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 ve MnO gibi ana oksit elementleri ile Sr iz elementinin Thiounta mermer örneklerindeki dağılımları Şekil 5'te gösterilmiştir. Beyaz renkli mermerlerin MgO içerikleri %0,25-1,10 (ortalama %0,53±0,33), mavimsi gri bantlı mermerlerde %0,28-0,61 (ortalama %0,49±0,18), mavimsi gri renkli mermerlerde %0,37-2,17 (ortalama %1,05±0,81) arasında değişirken, SiO_2 içerikleri sırasıyla %0,01-0,53 (ortalama %0,13±0,22), %0,55-1,23 (ortalama %0,79±0,38) ve %0,12-0,26 (ortalama %0,20±0,07) arasında değişmektedir. Beyaz renkli mermerlerin CaO içerikleri %52,59-55,38 (ortalama %53,97±1,13), mavimsi gri bantlı mermerlerde %52,36-55,10 (ortalama %53,56±1,40), mavimsi gri renkli mermerlerde %52,36-53,29 (ortalama %52,84±0,45) arasında değişirken, Fe_2O_3 içerikleri sırasıyla %0,0014-0,011 (ortalama %0,005±0,004), %0,11-0,27 (ortalama %0,18±0,08) ve %0,02-0,04 (ortalama %0,02±0,01) arasında değişmektedir. MnO içeriği beyaz renkli mermerlerde %0,003-0,012 (ortalama %0,005±0,004), mavimsi gri bantlı mermerlerde %0,005-0,010 (ortalama %0,007±0,002), mavimsi gri renkli mermerlerde %0,0021-0,0024 (ortalama %0,0022±0,0002) arasında değişirken, Sr içerikleri sırasıyla 91,1-182,9 ppm (ortalama 156,4±37,7 ppm), 132,9-195,5 ppm (ortalama 161,3±31,7 ppm) ve 226,9-267,9 ppm (ortalama 244,5±17,5 ppm) arasında değişmektedir.



Şekil 5. Thiounta mermer örneklerine ait bazı ana oksit, iz element ve C-O duraylı izotop içerikleri

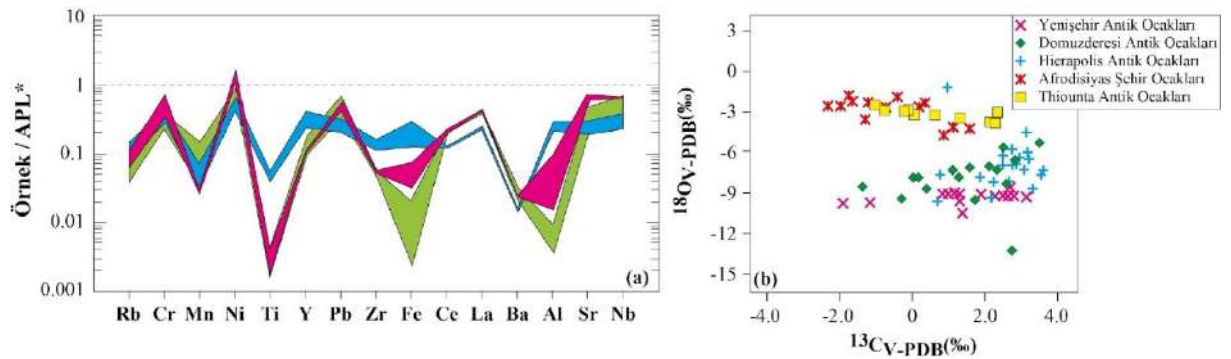
Goldschmidt vd., (1955) kalsit bileşimli mermerlerde CaO içeriğinin %50-54, MgO içeriğinin %15'den az olduğunu ifade etmişlerdir. Buna göre Thiounta mermer örneklerinin kalsitin baskın olduğu, nispeten saf kireçtaşlarının metamorfizması sonucu oluştuğu söylenebilir (Şekil 6a). Bununla birlikte, CaO içeriği yüksek olan mermerlerde Kızdırma Kaybı (KK) değerlerinin de yüksek olması beklenir. Bu durum, mermerleri oluşturan karbonat minerallerinin (kalsit, dolomit) kimyasal yapılarında bulunan CO₂'nin ısıtma sırasında açığa çıkması toplam kütle kaybına yol açar ve bu da KK değerinin artmasına neden olur. Thiounta mermer örneklerinin KK değerleri %42,83-46,83 (ortalama %44,81±0,32) arasında değişmektedir. Mermerlerin Sr, Ba ve Rb içerikleri, köken kayacın çökeltme ortamı hakkında önemli bilgiler sağlayabilir (Zhang et al., 2017; Mirza et al., 2021; Koralay et al., 2025). Zhang vd. (2017) tarafından önerilen Rb*100-Sr-Ba üçgen diyagramında, Thiounta antik taş ocaklarına ait örneklerin kıta kenarlarında çökelmiş kireçtaşları alanına düştüğü belirlenmiştir (Şekil 6b). Sr/Ba ve Sr/Rb oranları, denizel kıta kenarı kireçtaşlarını kıta içi tatlı su (göl) kireçtaşlarından ayırt etmek için kullanılabilir (Koralay et al., 2025). Sr/Rb-Sr/Ba diyagramında incelenen mermer örnekleri kıta kenarı ortamını işaret etmektedir (Şekil 6c). İncelenen mermer örneklerinin köken kayalarını belirlemek amacıyla Melezhik vd., (2001) tarafından geliştirilmiş ayırım diyagramları kullanılmıştır. Mg/Ca-SiO₂ diyagramına yerleştirilen mermer örneklerinin kireçtaşı alanına düştükleri belirlenmiştir (Şekil 6d). Mg/Ca oranı beyaz renkli mermerlerde 0,0039-0,0176 (ortalama 0,0083±0,0024), mavimsi gri bantlı mermerlerde 0,0045-0,0093 (ortalama 0,0076±0,0015) ve mavimsi gri renkli mermerlerde 0,0060-0,0348 (ortalama 0,017±0,007) arasında değişmektedir. Ca-Mg diyagramında mermer örneklerinin kireçtaşı-dolomit geçiş çizgisine yakın, kireçtaşı tarafında yoğunlaşmış oldukları görülmektedir (Şekil 6e). Sr-Mg/Ca diyagramına yerleştirilen mermer örnekleri çoğunlukla kireçtaşı alanında toplanmışlardır (Şekil 6f). Bu diyagramlara göre, mermer örnekleri kıta kenarı ortamlarında çökelmiş, yüksek CaO içeren kireçtaşlarının metamorfizması sonucu oluştuğu değerlendirilmiştir.



Şekil 6. Thiounta antik taş ocağı mermerlerinin a) CaO-SiO₂-MgO (Goldschmidt vd., 1955), b) Sr-Rb*100-Ba (Zhang vd., 2017) üçgen diyagramlarındaki konumları. c) Sr/Rb-Sr/Ba (Zhang vd., 2017), d) (Mg/Ca)-SiO₂, e) Ca-Mg, f) Sr-Mg/Ca (Melezhik vd., 2008) ikili diyagramlarındaki konumları

Thiounta antik ocakları mermer örneklerinin, Ortalama Fanerozoik Kireçtaşı (Average Phanerozoic Limestone-APL) bileşimine göre normalleştirilmiş olduğu çoklu element dağılım diyagramında birbirlerine benzer dağılım desenlerine sahip oldukları, iz element içeriklerinde APL'ye oranla 5 ile 100 kata kadar tüketilmeler gösterdikleri belirlenmiştir (Şekil 7a). APL değerlerine göre Ti, Fe, Ba ve Al elementlerindeki tüketilmeler daha belirgindir. Bununla birlikte, mavimsi gri bantlı mermer örnekleri Ti ve Fe içerikleri açısından diğer mermer gruplarından farklılık göstermektedir. Bu farklılaşmanın, mermerlerin az miktarda kuvars ve muskovit içermesinden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir.

Monomineralli (baskın olarak kalsit) bir kayaç olan mermerlerin ayrımında yalnızca element içeriklerine dayanan değerlendirmeler çoğu zaman sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle, antik dönem sanat eserlerinin ve yapı taşlarının karakterizasyon çalışmalarında C ve O duraylı izotop bileşimleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Thiounta mermerlerine ait C ve O duraylı izotop değerlerinin mermer gruplarına göre dağılım grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Duraylı izotop analizleri sonucunda $\delta^{13}\text{C}$ izotop değerlerinin beyaz renkli mermer örneklerinde ‰0,55-2,24 (ortalama ‰1,53±0,39), mavimsi gri bantlı mermer örneklerinde ‰(-1,09)-2,26 (ortalama ‰0,11±1,07) ve mavimsi gri renkli mermer örneklerinde ‰(-0,28)-(-0,04) (ortalama ‰(-0,17)±0,70) arasında değişirken, $\delta^{18}\text{O}$ izotop değerleri beyaz renkli mermerlerde ‰(-3,82)-(-3,24) (ortalama ‰(-3,59)±0,14), mavimsi gri bantlı mermer örneklerinde ‰(-3,09)-(-2,55) (ortalama ‰(-2,84)±0,16), ve gri renkli mermer örneklerinde ‰(-3,27)-(-2,93) (ortalama ‰(-3,05)±0,11) arasında değiştiği belirlenmiştir. $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ izotop diyagramında, Thiounta mermer örneklerinin $\delta^{13}\text{C}$ içeriklerinin artışına bağlı olarak $\delta^{18}\text{O}$ içeriklerinde azalma eğilimi gözlenmektedir (Şekil 7b). Aynı diyagrama renk/doku farklılıklarını gözetmeksizin Lykos Vadisi ve yakın çevresindeki antik dönem mermer ocaklarına ait C ve O duraylı izotop bileşimleri de yerleştirildiğinde Thiounta mermerlerinin Afrodisiyan mermerleri ile birbirine yakın ve benzer C ve O izotop bileşimlerine sahip oldukları, Yenişehir, Domuzderesi ve Hierapolis antik ocaklarındaki mermer örnekleriyle farklı alanlarda kümelandikleri belirlenmiştir (Şekil 7b).



Şekil 7. Thiounta mermer örneklerinin a) APL bileşimine göre normalize edilmiş (Condie vd., 1991) çoklu element değişim diyagramı, b) geleneksel $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramındaki konumları (Antik ocaklara ait C-O izotop verileri Kılınçarslan (2013); Koralay ve Kılınçarslan (2015); Koralay (2017) ve Koralay ve Özkul (2017)'den alınmıştır)

SONUÇLAR

Türkiye'nin batısında bulunan ve arkeologlar tarafından "Frigya bölgesi" olarak adlandırılan bölgede yer alan Thiounta antik yerleşimi Roma döneminde, Hierapolis'te lahit yapımında kullanılan, Bizans döneminde ise "Thiounta'nın Sandıkları" adıyla Konstantinopolis'e gönderilen mermerleriyle ünlüdür. Bu çalışmada Thiounta mermerlerinin minero-petrografik, jeokimyasal ve C-O izotop bileşimleri hakkında yeni ve ayrıntılı bilgiler elde edilmiştir. Çalışmanın önemli bulguları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Arazi ve optik mikroskop çalışmaları sonucu elde edilen minero-petrografik verilere göre Thiounta mermerleri beyaz, mavimsi-gri bantlı ve mavimsi gri renkli olarak üç gruba ayrılmıştır. Beyaz renkli ve mavimsi gri bantlı mermerler homoblastik/heteroblastik mozaik doku, Mavimsi gri bantlı mermer örnekleri homoblastik/heteroblastik mozaik doku gösterirken, mavimsi gri renkli mermerler heteroblastik mozaik doku göstermektedir. Mineral bileşimi açısından, mermer grupları başlıca olarak karbonat minerallerinden (çoğunlukla kalsit daha az oranda dolomit) oluşmakta olup aksesuar mineraller olarak kuvars, muskovit ve opak mineraller içermektedir. Bu mineral bileşimleri XRD araştırmalarıyla da desteklenmiştir. Özellikle beyaz ve mavimsi gri renkli mermerler, tamamen kalsit ve $\pm$ dolomit minerallerinden oluşurken, mavimsi gri bantlı mermerler karbonat mineralleriyle birlikte kuvars, muskovit ve opak minerallerden oluşmaktadır.

2. Mermerler, ana oksit ve iz element içerikleri açısından benzer ve sınırlı bir bileşime sahiptir. Ortalama Fanerozoik Kireçtaşı (APL) değerlerine göre normalize edilmiş çoklu-element değişim diyagramında, iz elementlerin APL'ye kıyasla 5 ila 100 kat arasında tüketilmiş oldukları görülmektedir. Bu tüketilme Ti, Fe, Ba ve Al elementlerinde daha belirgindir. Ayrıca, mavimsi gri bantlı mermerler, Ti ve Fe içerikleri bakımından diğer mermer gruplarından ayrılmaktadır.

3. Karbonatlı kayaçların köken kayacı ve çökeltme ortamı hakkında bilgiler veren Ca, Mg, Sr, Ba ve Rb içeriklerine göre oluşturulan ayrım diyagramlarında, Thiounta mermer örneklerinin kıta kenarı ortamında çökelmiş, yüksek CaO içeren kireçtaşlarının metamorfizması sonucu oluştukları belirlenmiştir.

4. Thiounta mermer gruplarının C ve O izotop değerleri birbirine benzer olup $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında negatif oksijen izotop oranıyla karakteristiktir. Bu izotop bileşimleri dikkate alındığında, Thiounta mermerleri Yenisehir, Domuzderesi ve Hierapolis antik ocaklarından ayrışırken, Afrodisiyas şehir ocaklarına ait örnekler ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir.

5. Frigya bölgesinde Hierapolis, Laodikya, Tripolis, Attuda ve Colossae gibi birçok antik yerleşimin kalıntıları bulunmaktadır. Bu yerleşimlerde tapınak, tiyatro, stadyum, anıtsal çeşme gibi yapılar ile heykel ve lahit gibi sanat eserlerinde yaygın olarak mermer ve traverten kullanılmıştır. Tektonik olarak oldukça aktif olan bölgede, depremler nedeniyle bu yapılar hasar görmüş veya

yıkılmıştır. Ancak insanlar, zamanla depremle yaşamayı kabul ederek şehirlerini terk etmek yerine onarmayı tercih etmiş ve bu süreçte hem mevcut hem de yeni ocaklardan yapı taşları temin etmişlerdir.

KAYNAKLAR

Al-Bashaireh, K. (2021). Ancient white marble trade and its provenance determination. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 35, 102777.

Antonelli, F., Nestola, F. (2021). An innovative approach for provenancing ancient white marbles: the contribution of x-ray diffraction to disentangling the origins of Göktepe and Carrara marbles. *Scientific Reports*, 11(22312).

Asgari, N. (1979). Anadolu'da antik mermer ocakları. VIII. Türk Tarih Kongresi (ss. 451–456). Ankara.

Asgari, N., Matthews, K. J. (1995). The stable isotope analysis of marble from Proconnesos. In *Interdisciplinary studies on ancient stone. Proceedings of the 3rd International Conference of Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity (ASMOSIA III)* (ss. 123–129).

Attanasio, D. (2003). Ancient white marbles: analysis and identification by paramagnetic resonance spectroscopy. *L'Erma di Bretschneider*.

Attanasio, D., Bruno, M., Prochaska, W., Yavuz, A. B. (2015). A multi-method database of the black and white marbles of Goktepe (Aphrodisias), including isotopic EPR trace and petrographic data. *Archaeometry*, 57(2), 217–245.

Bağcı, M. (2020). Mineralogical, petrographic, and geochemical characterization of colored İncehisar marbles (Afyonkarahisar, W-Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29(6), 946–975.

Bingöl, O. (2012). Bu Koca Taşları Nasıl İşlediler, Nasıl Kaldırdılar. Bilgin Kültür Sanat Yayınları.

Brilli, M., Cavazzini, G., Turi, B. (2005). New data of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in classical marble: an initial database for marble provenance determination. *Journal of Archaeological Science*, 32(10), 1543–1551.

Bruno, M., Elçi, H., Yavuz, A. B., Attanasio, D. (2012). Unknown ancient marble quarries of Western Asia Minor. In *Interdisciplinary studies on ancient stone. Proceedings of the 9th International Conference of Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity (ASMOSIA IX)* (pp. 562–572).

Cantisani, E., Scardozzi, G. (2016). The polychromatic breccia of Hierapolis: quarries use in construction sites alteration phenomena. In T. Ismaelli G. Scardozzi (Eds.), *Ancient Quarries and Building Sites in Asia Minor. Research on Hierapolis in Phrygia and Other Cities in South-Western Anatolia: Archaeology, Archaeometry, Conservation* (ss. 167–180). Edipuglia.

Condie, K. C., Wilk, M., Rosen, D. M., Zlobin, V. (1991). Geochemistry of metasediments from the Precambrian Hapschan Series, Eastern Anabar Shield, Siberia. *Precambrian Research*, 50, 37–47.

Dodge, H. (1991). Ancient marble studies: recent research. *Journal of Roman Archaeology*, 4, 28–50.

Fernández, T. P., Carneiro, A., Moreira, N. (2023). Transport and distribution of heavy loads in ancient times: Estremoz Marbles in the Roman province of Lusitania. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 49, 103962.

Goldschmidt, J. R., Graff, L., Joensu, O. I. (1955). The occurrence of magnesium calcite in nature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 7(5-6), 212–228.

Gorgoni, C., Lazzarini, L., Pallante, P., Turi, B. (2002). An updated and detailed minero-petrographic and C-O stable isotopic reference database for the main Mediterranean marbles used in antiquity. In *Interdisciplinary studies on ancient stone. Proceedings of the 5th International Conference of Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity (ASMOSIA V)* (pp. 115–131).

Herz, N. (1992). Provenance determination of Neolithic to classical Mediterranean marbles by stable isotopes. *Archaeometry*, 34(2), 185–194.

Hirt, A. M. (2010). *Imperial mines and quarries in the Roman world: organizational aspects 27 BC-AD 235*. Oxford University Press.

Kılınçarslan, S. (2013). Laodikeia (Denizli-GB Türkiye) antik kenti tapınak-a (sebasteion) yapısında kullanılan mermerlerin mineralojik petrografik jeokimyasal özellikleri ve kaynak alanlarının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Klemm, R., Klemm, D. (2008). *Stones and quarries in Ancient Egypt*. The British Museum Press.

Konak, N., Akdeniz, N., Öztürk, E. M. (1987). *Geology of the south of Menderes Massif*.

I.G.C.P. project no:5, Correlation of Variscan and pre-Variscan events of the Alpine Mediterranean mountain belt, field meeting (pp. 42–53). Mineral Research and Explorations Institute Turkey.

Koralay, T., Kılınçarslan, S. (2015). Minero-petrographic and isotopic characterization of two antique marble quarries in western Turkey. *Periodico di Mineralogia*, 84(2), 579–592.

Koralay, T., Kılınçarslan, S. (2016). A multi-analytical approach for determining the origin of the marbles in Temple-A from Laodicea ad Lycum (Denizli-Western Anatolia, Turkey). *Journal of Cultural Heritage*, 17, 42–52.

Koralay, T. (2017). Archaeometric characterization of the recently discovered Yenişehir Marble Quarry in the Denizli region. In T. Ismaelli G. Scardozzi (Eds.), *Ancient Quarries and Building Sites in Asia Minor, Research on Hierapolis in Phrygia and other cities in south-western Anatolia: archaeology, archaeometry, conservation* (ss. 119–130). *Bibliotheca Archaeologica*.

Koralay, T., Özkul, M. (2017). Geochemical and C-O isotopic signature of thionta antique marbles (Denizli-SW Turkey). *International Meeting of Sedimentology 2017* (s. 470). Toulouse.

Koralay, T., Şahiner, E., Söğüt, B., Sezgin, T., Kadioglu, Y. (2025). Characterization and provenance analysis of the architectural building stones at the Stratonikeia theater in Yatagan-Muğla, Southwest Turkey, with determination of construction history through OSL method. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 34, 98–125.

Lapuente Mercadal, M. P., Gutiérrez García, A., Noguera Celdrán, J. M., Ruiz Molina, L. (2024). Göktepe marble identification in the Hadrian portrait of Los Torrejones (Yecla, Murcia) and some considerations on the presence of this marble in Hispania. *Zephyrus*, 93, 151–170.

Malacrino, C. G. (2010). *Constructing the Ancient World: Architectural Techniques of the Greeks and Romans* (J. Hyams, trans.). Getty Publ.

Melezhik, V. A., Bingen, B., Fallick, A. E., Gorokhov, I. M., Kuznetsov, A. B., Sandstad, J. S., Solli, A., Bjerkgård, T., Henderson, I., Boyd, R., Jamal, D., Moniz, A. (2008). Isotope chemostratigraphy of marbles in northeastern Mozambique: apparent depositional ages and tectonostratigraphic implications. *Precambrian Research*, 162(3-4), 540–558.

Melezhik, V. A., Gorokhov, I. M., Kuznetsov, A. B., Fallick, A. E. (2001). Chemostratigraphy of Neoproterozoic carbonates: implications for blind dating. *Terra Nova*, 13(1), 1–11.

Mirza, T. A., Kalaitzidis, S. P., Fatah, S. S., Tsiotou, S. (2021). Petrographic and geochemical features of Gimo marble, Gole area, Kurdistan Region, Iraq: constraints on its protolith's origin and depositional environment. *Earth Sciences Research Journal*, 25(3), 285–295.

Monna, D., Pensabene, P. (1977). *Marmi Dell'asia Minore*. Consiglio Nazionale Delle Ricerche.

Pensabene, P. (1985). *Marmi Antichi: Problemi D'Impiego, Di Restauro E D'Identificazione*. L'erma di Bretschneider.

Prochaska, W., Attanasio, D. (2022). The challenge of a successful discrimination of ancient marbles (part III): A databank for Aphrodisias, Carrara, Dokimeion, Göktepe, Hymettos, Parian, Lychnites, and Pentelikon. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 45, 103582.

Semiz, B., Abay, E., Dedeoğlu, F., Konakçı, E., Ozan, A. (2018). An archaeometric investigation of Early and Middle Bronze Age pottery from the Upper Meander Basin in southwestern Anatolia. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 18(3), 83–93.

Sun, S. (1990). Denizli-Uşak arasının jeolojisi ve linyit olanakları. *Bulletin of Mineral Research and Exploration Institute of Turkey (MTA)*, (9985).

Şimşek, Ş. (1984). Denizli-Kızıldere-Tekkehamam-Tosunlar-Buldan-Yenice Alanının Jeolojisi ve Jeotermal Enerji Olanakları (MTA Raporu No. 7846). (Yayınlanmamış).

Zhang, K. J., Li, Q. H., Yan, L. L., Zeng, L., Lu, L., Zhang, Y. X., Hui, J., Tang, X. C. (2017). Geochemistry of limestones deposited in various plate tectonic settings. *Earth Sciences Reviews*, 167, 27–46.

FOSİLLİ MERMERLER VE FOSİLLERİN, MERMERLER İÇİNDEKİ OLUMLU VE OLUMSUZ ETKİLERİ

FOSSILLED MARBLES AND THE POSITIVE AND NEGATIVE EFFECTS OF FOSSILS IN MARBLES

A. Karabaşoğlu

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Sorumlu yazar: aslik@aku.edu.tr

ÖZ

Mermerler ana bileşeni kalsiyum karbonat olan kireçtaşı veya dolomitin metamorfizmaya uğraması sonucu oluşurlar. Kireçtaşları deniz ve göllerde çökler ve deniz canlılarının kabukları ve iskeletleri bu kayaların ana bileşenlerini oluşturur. Metamorfizma olayında kireçtaşı veya dolomit kayacı yer kabuğunun hareketleri nedeniyle derinlere gömülür, yüksek sıcaklık ve basınçta maruz kalır. Metamorfizma tamamlandığında tamamen kristalli mermer haline gelir. Fosil içeren kayalarda metamorfizmanın derecesi önemlidir. Düşük dereceli metamorfizmada fosiller korunabilirken, yüksek sıcaklık metamorfizmasında fosiller tamamen kaybolur. Hafif basınç ve sıcaklık altında kireçtaşı tamamen kristalleşmeden metamorfik bir yapı kazanabilir bu tip mermerler yarı metamorfik olarak adlandırılır. Kontak metamorfizma zonlarında, rekristalizasyon sürecinin tamamlanmaması durumunda da fosillerin yapısı kristalleşmeden korunabilir. Bunun yanı sıra sert mineralli, silisli fosiller de mermer içinde korunarak kalabilir. İç ve dış mekan dekorasyonunda önemli bir yeri olan fosilli mermerlerin Türkiye'nin birçok yerinde ocakları bulunur ve yurt dışına ihracatı yapılmaktadır. Fosilli mermerler estetik ve doğal olduklarından benzersiz ve farklı bir yapıya sahiptir ancak bazen içindeki fosilin yapısı nedeniyle mermer yüzeyinde bozulmalar ve lekelenmeler söz konusu olabilir. Fosilleşmiş organizma kalıntıları bazen asidik veya alkali özellikler gösterebilir, bu nedenle mermerdeki kalsiyum karbonatla reaksiyona girerek taşın yüzeyinde aşındırma, renk değişikliği ve çatlamlara yol açabilir. Fosillerin farklı yoğunluk ve sertlikte olması, mermer içinde homojen bir dağılımda olmaması, taşın yapısal bütünlüğünü bozabilir. Fosil içeren kısımlar zamanla aşınırsa, yüzeyde boşluklar ve çukurlar oluşabilir. Bu da mermerin dayanıklılığını azaltan bir faktördür. Büyük fosillerin yer aldığı mermerler içinde fosil etrafında zayıflık zonları gelişebilir ve bu alanlarda çatlaklar oluşabilir. Sonuç olarak fosilli mermerler ticari olarak büyük öneme sahiptir ancak fosilin türü ve mermerin renk ve deseni, mermerin kullanım alanını ve değerini etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler: Mermer, Fosil, dekorasyon, aşınma, çatlak

ABSTRACT

Marbles are formed as a result of metamorphism of limestone or dolomite, the main component of which is calcium carbonate. Limestones are deposited in seas and lakes, and the shells and skeletons of marine creatures constitute the main components of these rocks. In the event of metamorphism, limestone or dolomite rock is buried deep due to the movements of the earth's crust and is exposed to high temperature and pressure. When metamorphism is completed, it becomes completely crystalline marble. The degree of metamorphism is important in fossil-bearing rocks. While fossils can be preserved in low-temperature metamorphism, fossils are completely lost in high-temperature metamorphism. Under light pressure and temperature, limestone can gain a metamorphic structure without completely crystallizing. This type of marble is called semi-metamorphic. In contact metamorphism zones, the

structure of fossils can be preserved from crystallization even if the recrystallization process is not completed. In addition, hard mineral and siliceous fossils can also remain preserved in marble. Fossil marbles, which have an important place in interior and exterior decoration, have quarries in many parts of Turkey and are exported abroad. Fossil marbles have a unique and different structure because they are aesthetic and natural, but sometimes due to the structure of the fossil inside, distortions and stains may occur on the marble surface. Fossilized organism residues can sometimes show acidic or alkaline properties, so they can react with the calcium carbonate in the marble, causing abrasion, discoloration and cracking on the surface of the stone. The fact that the fossils have different densities and hardness and are not distributed homogeneously within the marble may disrupt the structural integrity of the stone. If parts containing fossils are eroded over time, cavities and pits may form on the surface. This is a factor that reduces the durability of marble. In marbles containing large fossils, zones of weakness may develop around the fossil and cracks may form in these areas. As a result, fossil marbles are of great commercial importance, but the type of fossil and the color and pattern of the marble affect the usage area and value of the marble.

Keywords: Marble, Fossil, decoration, corrosion, fracture

1. GİRİŞ

Mermer doğaltaş endüstrisinde estetik görünümü ve dayanıklılığı ile öne çıkan bir malzemedir. Kolayca cilalanan ve kolayca parlayan taşlar mermer olarak tanımlanır (Doğanay, 2002). Bununla birlikte, fosilli mermerler, içerdikleri eski deniz yaşamına ait fosiller sayesinde doğanın milyonlarca yıllık tarihi hakkında bilgiler verirken benzersiz bir güzelliğe sahiptir. Fosilli mermerler, kireçtaşı ya da dolomitin uzun süreli jeolojik süreçler sonucunda metamorfizmaya uğramış bir türüdür. Mermerler, içerdikleri deniz kabukluları, mercanlar ve diğer organizmaların kalıntıları nedeniyle dikkat çeker. Bu fosiller, zaman içerisinde kalsiyum karbonat mineralleriyle birleşerek kayalık içinde korunur. Bu durum, fosilli mermerlerin benzersiz desenlere ve dokuya sahip olmasını sağlar.

Mermerlerde renk en belirleyici özelliklerden biridir. Fosilli mermerler, genellikle açık ve orta tonlarda renklere sahip olup gri, bej, kahverengi ve krem tonları en yaygın olanlarıdır. Parlak ve cilalanabilir yüzeyi, içindeki fosil kalıntılarının belirginleşmesini sağlar. Koyu renkler gri ve siyah renkler grafit ve karbonlu bileşiklerden gelirken, kırmızı pembe renkler hematit ve mangan bileşiklerinden, sarımsı tonlar ise limonitten kaynaklanır.

Mekanik dayanıklılığı orta seviyede olup genellikle dekoratif ama çok yoğun kullanıma maruz kalmayan alanlarda tercih edilir. Fosilli mermerler, hem iç mekan hem de dış mekan uygulamalarında kullanılmaktadır. Zemin kaplamaları, duvar kaplamaları, mutfak ve banyo tezgahları, sanatsal ve dekoratif objeler kullanım alanlarından bazılarıdır.

Ülkemizde mermer yatakları genellikle Paleozoyik yaşlı masiflerin bulunduğu alanlarda yer alır. Bu masifler, Menderes, İstiranca, Menteşe, Kazdağ, Kırşehir, Ilgaz ve Bitlis masifleridir (Ketin, 1984).

Dünyanın en zengin mermer yataklarının bulunduğu Alp kuşağında yer alan Türkiye, 5,1 milyar m³–13,9 milyar ton muhtemel mermer rezervine sahiptir. Bu değer 15 milyar m³ olduğu tahmin edilen dünya rezerv toplamının %33'üne karşılık gelmektedir. Türk doğaltaş sektörü; çeşit ve rezerv zenginliği, sektör deneyimi, hammadde bolluğu, deniz ulaşımında nakliye kolaylığı, dinamik sektör yapısı, kullanılan yeni teknolojiler ve geniş renk skalası ile dünya doğaltaş piyasasında önemli bir yere sahiptir. Ülkemizde 80'nin üzerinde değişik yapıda, 120'nin üzerinde değişik renk ve desende mermer rezervi belirlenmiştir. Uluslararası piyasada en tanınmış mermer çeşitleri; Süpren, Elazığ Vişne, Akşehir Siyah, Manyas Beyaz, Bilecik Bej, Kaplan Postu, Denizli Traverten, Ege Bordo, Milas Leylak, Gemlik Dişabaz ve Afyon Şeker'dir. (Doğaltaşlar Sektör Raporu, 2021).

2. FOSİLLİ TİCARİ MERMER TÜRLERİ

2.1. Siyah Fosil Mermer

Fas'ta çıkarılan siyah fosil mermer, taş yapısı içinde gömülü antik deniz yaşamının veya diğer organizmaların fosilleşmiş kalıntılarını içeren bir mermer türüdür. Genellikle Ammonit ve Orthoceras fosilleri mermerin içinde karmaşık desenler veya şekiller olarak görünebilir ve ona benzersiz, doğal bir tasarım kazandırır. Mermerin kendisi genellikle koyu renktedir, koyu siyahtan koyu griye kadar değişir ve fosiller, mineral içeriğine bağlı olarak genellikle daha açık veya daha soluk tonlarda kontrast oluşturarak öne çıkar (Şekil 1).



Şekil 1. Siyah Fosil Mermer

2.2. Marston Mermeri

Marston Mermeri benzersiz ve son derece dekoratif bir fosil türüdür. Sanatsal ve estetik nitelikleri nedeniyle değerlidir. Çok yoğun beyaz ve krem rengi ile karakterizedir. Ammonite planicosta, Promicroceras, Asterocheras fosillerinden oluşur. Canlı siyah bir arka planı vardır. Fosiller iyi korunmuş durumdalar, bu nedenle onları masa üstleri ve mücevherler gibi süs örnekleri ve diğer sanat yaratımları için kullanma çekiciliği vardır. Yaklaşık 200-175 milyon yıl öncesi alt Jura dönemine ait fosiller içerir. İngiltere dışında hiçbir yerde bu mermer türü çıkarılmaz hatta Somersat bu eşsiz mermerin çıkarıldığı tek yerdir. Metamorfik mermerler kadar dayanıklı değildir çünkü sedimentasyon süreci kristal yapısını bozmuştur.



Şekil 2. Marston mermeri (Marston magna)

2.3. Frosterley Mermeri

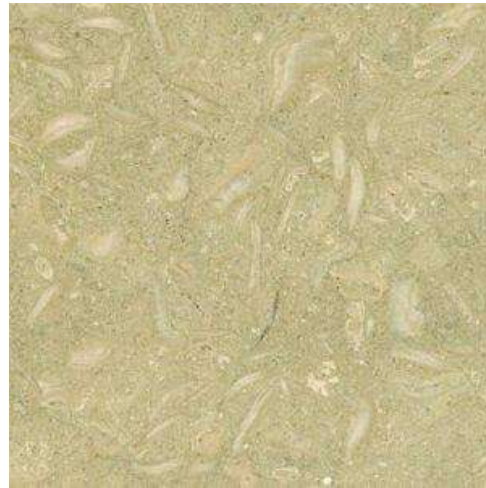
Frosterley mermeri olarak bilinen koyu griden siyaha rengi olan mermer, cilalandığında canlanan bir İngiliz taşıdır. Yaklaşık 325 milyon yıl önce (Alt Karbonifer) tropikal bir deniz yatağından çıkan taşın her yerinde beyaz fosiller bulunur. Bu fosiller, onu dekoratif bir taş haline getirmek için koyu damarlı mermerin içinde dağılmıştır. Deniz laleleri, mercan, brakiyopod gibi fosiller içerir. Bilinen tek yatağı İngiltere'dedir. Vatikan Taşı olarak bilinen bu taş Vatikan şehrindeki çeşitli binalarda, kilise, resmi binalardaki sunaklarda, sütunlarda, basamaklarda, fayanslarda ve çeşitli dini eserlerde kullanılmıştır.



Şekil 3. Frosterley Mermeri

2.4. Afyon Rustik Yeşil Mermer

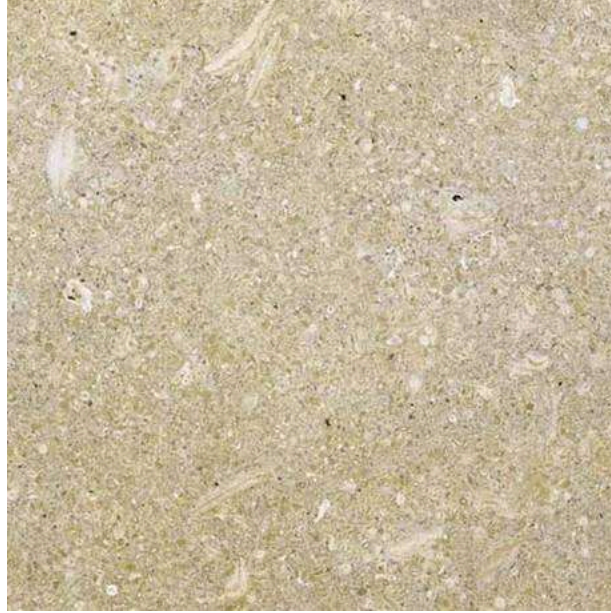
Rustik yeşil mermer, genellikle Türkiye'nin Afyonkarahisar ilinde işlenen bir tür mermer çeşididir. Afyonkarahisar, Türkiye'nin mermer üretiminin yoğun olduğu bölgelerden biridir ve birçok farklı mermer çeşidi bu bölgeden elde edilir. Rustik yeşil mermer Batı Karadeniz bölgesindeki mermer ocaklarından birkaçında da çıkmaktadır. Bu mermer çeşidi barındırdığı mineral karışımları nedeniyle oldukça sert bir yapıya sahip olup iç ve dış mekanlar da kullanılır. Ayrıca içinde bulunan Nummulites fosilinin bolluğu ile göze çarpar. Bu fosiller yaklaşık 56-34 milyon yıl öncesi Eosen zamanında sığ kireçtaşlarının oluştuğu dönemi yansıtır.



Şekil 4. Afyon Rustik Yeşil Mermer

2.5. Bartın Bej Mermer

Sarımsı-bej renklerde, biyomikritik, nummulites ve miliolidea kavkılarında oluşan bu mermer az miktarda kil içerir. Safranbolu Formasyonu olarak adlandırılan, sığ denizel ortamda çökelmiş karbonat istifinin en üst kısımlarını oluşturan resifal kireçtaşlarına ait mermerlerdir. Çatlak dolgularında yer yer kuvars oluşumlarına rastlanan mermerin yaşı Erken Paleosen-Orta Eosen'dir (Özer, 2015).



Şekil 5. Bartın Bej Mermer (Özer, 2015)

3. FOSİLLİ MERMERLERİN ÖZELLİKLERİ

3.1. Fosillerin Mermerler Üzerindeki Olumlu Etkileri

Genellikle koyu siyah veya koyu gri, ancak tonlar belirli kaynağa ve mineral bileşimine bağlı olarak biraz değişebilir. En çarpıcı özellik, genellikle bej, krem veya kahverengi gibi daha açık tonlarda kabuklar (Örn: Nautilus), deniz canlıları veya bitki fosilleridir. Fosil desenleri parçadan parçaya büyük ölçüde değişir ve her levha için benzersiz bir görünüm elde edilir. Fosiller, mermerin koyu arka planıyla güzel bir kontrast oluşturan karmaşık, organik tasarımlar yaratır. Tüm mermerler gibi, esas olarak ona pürüzsüz, cilalı bir görünüm veren kalsiyum karbonattan (kalsit) oluşur. Cilalandığında pürüzsüz, parlak bir yüzeye sahip olur hem doğal damarları hem de fosil desenleri ön plana çıkar. Mermerin dokusu ince veya hafif granüllü olabilir, fosil boyutu ve dağılımında farklılıklar olabilir. Siyah Fosil Mermer'in her bir levhası farklı fosil desenlerine sahip olabilir ve bu da onu nadir ve eşsiz bir malzeme yapar. Hiçbir iki parça tam olarak aynı değildir.

Genellikle lüks konut ve ticari projelerde tezgah, döşeme, duvar panelleri, tezgah arası paneller ve hatta heykeller için kullanılır. Görsel açıdan dikkat çekici olması nedeniyle, masa tablaları, lavabo leğenleri ve banyo tezgahları gibi daha küçük dekoratif ürünlerde de kullanılır (İnt. Kyn. 1).

Genel olarak mermerde gözeneklilik oranının az olması hapsedilen nem açısından yararlı kabul edilir. Taşın iç bloklarına sızan nemin donup genleşerek iç yapısında oluşturacağı kılcal deformasyonlardan en az şekilde etkileneneğini gösterir.

Açık renkli mermerle koyu renkli olanların aksine UV etkilerine ve diğer dış etkenlere karşı daha dayanıklıdır.

Fosilli mermerler genellikle dayanıklı olduğundan heykeltıraşlık ve anıt yapımında kullanılır. Dolayısıyla geçmişin izlerini taşır, bu da mermerin bir tür tarihsel değer taşımasını sağlar.

3.2. Fosillerin Mermerler Üzerindeki Negatif Etkileri

Siyah Fosil Mermer nispeten dayanıklıdır, ancak metamorfik bir kaya olduğundan granitten daha yumuşaktır. Daha sert taşlardan daha kolay çizilebilir veya çatlayabilir, ancak düzgün bir şekilde bakıldığında tezgah, döşeme ve dekoratif elemanlar gibi uygulamalar için hala uygundur. Mermer gözenekli olduğundan lekelenmeyi ve aşınmayı önlemek için sızdırmazlık gerektirir. Yüzeyinin korunması için düzenli bakım ve temizlik önemlidir.

Fosillerin mermerler üzerindeki olumsuz etkisi, fosilli taşların kimyasal veya fiziksel özelliklerinin, mermerin yapısını değiştirebilmesinden kaynaklanır. Mermerler genellikle kalsiyum karbonat (CaCO_3) içerir ve bu madde organik maddeler nedeniyle, mermerin yüzeyinde bozulmalara lekelenmelere yol açabilir. Fosilleşmiş organizma kalıntıları bazen asidik ya da alkali özellikler gösterebilir. Bu maddeler, mermerdeki kalsiyum karbonatla reaksiyona girerek taşın yüzeyinde aşındırma, renk değişikliği ve çatlamalara yol açabilir.

Fosil kalıntıları genellikle mermerin daha yumuşak veya daha sert kısımlarında yer alabilir. Bu, mermerin homojen olmayan bir şekilde aşınmasına neden olabilir. Zamanla bu fosil kalıntıları, taşın yapısal bütünlüğünü zayıflatabilir.

Fosil içerikleri bazen minerallerin birikmesi nedeniyle mermerin yüzeyinde renk değişimlerine yol açabilir. Bu lekeler, taşın estetik görünümünü bozabilir.

Fosillerin içinde organik maddeler varsa, bu maddeler zamanla çürüyebilir. Bu çürüme, mermerin yüzeyinde kötü kokuya veya mikrobiyal büyümeye (örneğin, mantar veya yosun) yol açabilir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, mermerlerde bulunan fosiller, kayacın mekanik dayanımı üzerinde hem olumlu hem olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Fosillerin türü, boyutu, dağılımı ve yoğunluğu bu etkiyi belirleyen temel faktörleridir. Mikrosillerin homojen bir şekilde dağılmış olması, mermerlerin iç yapısında bağlayıcılık sağlayarak dayanımı artırabilir, ancak büyük boyutlu veya düzensiz şekilde dağılmış fosiller, yapısal boşluklar ve süreksizlikler oluşturarak dayanımı düşürebilir. Ayrıca fosil içeren bölgeler, çatlama ve kırılma gibi fiziksel zayıflıklara neden olabileceğinden işlenebilirliği de olumsuz etkileyebilir. Mermerlerin kullanım amacı göz önünde bulundurularak fosil içeriği detaylı şekilde değerlendirilmelidir. Ayrıca olumsuz etkilerin önlenmesi için mermerin düzenli bakımının yapılması ve doğru temizlik yöntemlerinin uygulanması önemlidir.

KAYNAKLAR

- Doğanay, H. (2002). Ekonomik Coğrafya 1: Doğal Kaynaklar (4. Baskı). Erzurum: Aktif Yayınları.
- Ketin, İ. (1984). Türkiye Jeolojisine Genel Bir Bakış. İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı, Yay. No:32.
- Özer, S. (2015). Fosil ve Mermer, Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ders Notları.

İnternet Kaynak 1: www.funshinestone.com. Alınma tarihi: 02.04.2025

DOĞALTAŞLARIN DIŞ CEPHE KAPLAMA MALZEMESİ OLARAK KULLANIMINDA DONMA-ÇÖZÜLME DÖNGÜLERİNİN ETKİLERİ

EFFECTS OF FREEZE-THAW CYCLES ON THE USAGE OF NATURAL STONES AS FACADE CLADDING MATERIALS

M. Kaptanlar ¹, F. Bayram ^{2,*}

¹ *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mermer ve Doğaltaş Teknolojisi Uygulama ve Araştırma Merkezi,
Doğaltaş Analiz Laboratuvarı (DAL)*

² *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü*

**Sorumlu yazar: bayramfatih@aku.edu.tr*

ÖZ

Doğaltaşlar, mimari yapılarda estetik ve dayanıklılık amaçlı yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bina dış cephe kaplamalarında kullanılan karbonatlı doğaltaşların soğuk bölgeler için don etkisinde fiziksel dayanıklılıkları değerlendirilmiştir. Bu amaçla, doğaltaşlar üzerinde TS EN 12371 "Dona Dayanım Tayini" ve TS EN 13364 "Saplama Deliğinde Kırılma Yüğü Tayini" standartlarına uygun deneyler gerçekleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Saplama deliğinde kırılma yüğü deneyine uygun şekilde numuneleri hazırlanmış üç farklı doğaltaş, 5 ile 40 döngü arasında sekiz farklı kategoride donma-çözölmeye maruz bırakılmıştır. Donma-çözölmeye döngülerinden önce ve sonra olmak üzere kırılma yükleri ve her döngü için kırılma yük kayıpları hesaplanmıştır. Deney sonuçlarının analizinde, kırılma yük kayıplarıyla donma-çözölmeye döngülerinin grafiksel ilişkileri incelenmiş ve ilişkilerin belirtme katsayılarının (R^2) 0,3600–0,9572 arasında değiştiğı bulunmuştur. Her doğaltaşın donma-çözölmeye döngülerine göre kırılma yüğü kayıpları yorumlanmış, kaplama malzemesi olarak kullanılabilirlikleri tartışılmıştır. Çalışma, doğaltaş kaplama malzemelerinin uzun vadeli dayanıklılığına ilişkin bir ön çalışma niteliğinde literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karbonatlı doğaltaşlar, dış cephe kaplama, donma-çözölmeye döngüleri, saplama deliğı kırılma yüğü, kırılma yük kaybı

ABSTRACT

Natural stones are widely used in architectural structures for aesthetic and durability purposes. This study evaluated the physical strength of carbonated natural stones used in facade cladding in cold regions under the frost effect. The experimental procedure was carried out by combining the TS EN 12371 'Determination of Frost Resistance' and TS EN 13364 'Determination of Breaking Load at Dowel Hole' standards. Specimens of three different natural stones prepared according to the breaking load at dowel hole test were subjected to freeze-thaw between 5 and 40 cycles in eight categories. The breaking loads were measured both before and after the freeze-thaw cycles, and the loss of breaking load for each cycle was calculated. In the analysis of the experimental results, the graphical relationships between the loss of breaking load and the freeze-thaw cycles were studied and the coefficients of determination (R^2) of the relationships were found to vary between 0,3600 – 0,9572. The loss of breaking load of each natural stone according to freeze-thaw cycles was discussed and their usability as cladding materials was evaluated. The study provides an important contribution to the literature as a preliminary study on the long-term durability of natural stone cladding materials.

Keywords: Carbonated natural stones, facade cladding, freeze-thaw cycles, breaking load at dowel hole, loss of breaking load

GİRİŞ

Doğaltaşlar, farklı üretim yöntemleriyle ocaklardan bloklar halinde çıkarılan ve ticari kullanım için son ürüne dönüştürülmek için işlenen, çeşitli jeolojik kökenlere (sedimanter, magmatik, metamorfik) sahip kayaçlar olarak tanımlanır. Bu kayaçlar ekonomik değere sahiptir ve çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Doğaltaşlar, eski çağlardan beri dekoratif ve yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Tarih boyunca farklı medeniyetlerde kullanılmış ve insanlığın ilerlemesine önemli katkılarda bulunmuştur. Bu tarihsel ilişki, insanlık tarihindeki iki dönemin doğaltaşların adını taşımasıyla vurgulanmaktadır (Hartman, 1987). Günümüzde doğaltaşlar, birçok alanda doğumdan ölüme kadar temel hammadde olarak hizmet vermeye devam etmektedir. Doğaltaşlar, ocaklardan bloklar halinde üretilir ve son ürün olarak kullanılmak üzere çeşitli tekniklerle işlenir. Kullanıma hazır hale gelmeden önce birçok işleme aşamasından geçerler. Doğaltaşların başlıca kullanım alanları; inşaat, sanatsal faaliyetler ve dekorasyondur. Merdivenler, şömineler, mutfak tezgâhları, sütunlar, banyolar, heykeller, binaların iç ve dış kaplamaları, yol ve kaldırım döşemeleri, duvar malzemeleri, bordür taşları, çatı kaplamaları, mendirekler ve baraj yapımı gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Çelik, 2003).

Doğaltaşların kullanım alanlarının belirlenmesinde veya kullanılacak alana göre doğaltaş seçiminde, kayaçların teknolojik özellikleri önem arz etmektedir. Bu kayaçların kullanımına yönelik teknolojik testlerin yapılması, kullanım ömürlerinin belirlenmesi açısından da faydalıdır. Özellikle dış cephe kaplamalarında, teknolojik özelliklerin ve kullanıma yönelik davranışlarının belirlenmesi önemlidir. Doğaltaş kaplamalarının bina cephelerine monte edilmesinde başlıca iki yöntem kullanılır: Mekanik montaj ve harç uygulaması. Yaygın olarak kullanılan ankrajlama yönteminde doğaltaşları kancada askıda tutan malzeme, kaplamalara yerleştirilen saplama adı verilen metal çubuklardır. Doğaltaş kaplamalarına yerleştirilen saplamaların kullanım ömürleri boyunca sağlam bir şekilde işlev görmesi ve doğaltaşın da saplamaların yerleştirildikleri deliklerde herhangi bir deformasyon ve yenilme olmadan ayakta kalması gerekmektedir. Dolayısıyla, özellikle dış cephe kaplamalarında saplama deliğindeki kırılma yükünün belirlenmesi kullanılan doğaltaşlar için önemlidir. Saplama deliğinde kırılma yükünün ölçülmesinde de TS EN 13364 Saplama Deliğinde Kırılma Yükünün Tayini (TSE, 2003) standardı kullanılmaktadır.

Dış cephe kaplamaları, yılın belli dönemlerinde farklı sıcaklıklar, donma-çözülme, asit yağmurları gibi dış faktörlere maruz kalmaktadır. Bu maruziyetler, özellikle dış cephe ankrajlama yöntemi kullanılan doğaltaşlarda bozulmalara, eğilmelere, deformasyonlara ve kırılmalara, aynı zamanda kullanılan saplamaların dayanımlarının düşmesine neden olmaktadır. Donma-çözülme olayının çok görüldüğü soğuk bölgelerde yapılan dış cephe kaplamaları, yıl içerisinde çeşitli donma-çözülme döngülerine uğradığından daha kısa sürelerde kullanım ömürlerini yitirmektedir.

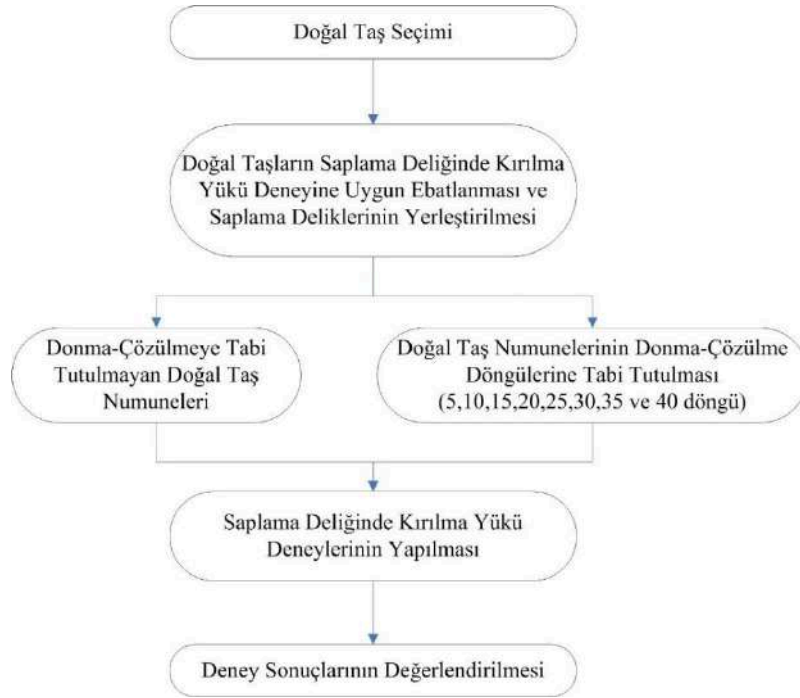
Çalışma kapsamındaki doğaltaşların donma-çözülme sonrası davranışları ve kayaç özelliklerine etkileri konularında literatürde oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. Son yıllarda bu konular dünyada kaya mekaniği ile uğraşan tüm araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bunun yanında, saplama deliğinde kırılma yükü ile ilgili çalışmalar ise kısıtlıdır. Donma-çözülme sonrası saplama deliğinde kırılma yükü ile ilgili çalışma ise bulunmamaktadır. Camposinhos vd. (2008), doğaltaş kaplama sistemlerinin tasarımına ve bu sistemlerde kullanılan saplama bağlantılarının önemine odaklanmışlardır. Çalışmada, taş kaplamalarının güvenli ve dayanıklı bir şekilde yerleştirilmesi için uygun bağlantı ve ankraj sistemlerinin seçilmesinin gerekliliği vurgulanmaktadır. Pires vd. (2011), doğal arduvaz taşlarının cephe kaplamalarında kullanımına yönelik mekanik performanslarını değerlendirmeyi amaçladıkları çalışmalarında, özellikle arduvazın eğilme dayanımı ile bağlantı elemanlarıyla olan etkileşimi üzerine

odaklanmışlardır. Camposinhos (2013), kökenlerine göre üç magmatik, iki sedimanter, bir metamorfik doğaltaşı bir dizi mekanik teste tabi tutmuştur. Sonlu eleman gerilme analizleri ve test sonuçları ile taşın saplama deliği kırılma yükünü tahmin etmek için kullanılabilecek eşitlik geliştirmiştir. Patronis vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, doğaltaşların konsantre yük altındaki kırılma yükleri incelenmiştir. Çalışmada, saplama deliğindeki kırılma yükünün (EN 13364) ve konsantre yük altında eğilme dayanımının (EN 12372) ilişkisi araştırılmıştır. Camposinhos (2014), dış cephe kaplamalarının estetik ve işlevsellik açısından gereksinimlerini karşılamaya yönelik yenilikçi teknolojileri ve yöntemleri ele almıştır. Emek (2015) cephe kaplamada kullanılan doğaltaşların montajında saplama deliğinde kırılma yükünün belirlenmesini araştırmış, 15 farklı doğaltaş numunesi üzerinde kalınlığı değişken olarak kullanmıştır. Artan kalınlık değerine bağlı olarak, kırılma yükü değerinin arttığını gözlemlemiştir. Huang vd. (2020) çalışmaları, doğaltaş kaplama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan granit panellerin çelik saplamalarla yapı elemanlarına bağlantısında ortaya çıkan mekanik davranışları, özellikle kırılma yükü kapasitesini deneysel yöntemlerle incelemiştir. Wang vd. (2021) çalışmalarında, 72 doğaltaş plaka üzerinde yapılan deneylerle, alttan kesme ankraj sisteminin performansını etkileyen temel faktörleri incelemiştir. Şengün (2021), karbonatlı kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini kullanarak, bu tür malzemelerin kaplama taşı olarak kullanıldığında ankraj kopma yük değerlerini tahmin etmeyi amaçlamıştır. Aghayeva (2022), Bakü Aqlay (Gülbağ) taşının yapı malzemesi olarak çevreyle uyumluluk performansını incelediği çalışmada, taşın saplama deliğinde kırılma yükü dahil olmak üzere bazı teknolojik özelliklerini analiz ederek çevresel etmenlere karşı dayanıklılığını değerlendirmiştir.

Yapılan araştırmaların, genel olarak doğaltaşlarda saplama deliğindeki kırılma yükü tayinleri, bu kırılma yüklerinin kayaç özellikleriyle ilişkilerinin incelenmesine yönelik çalışmaların olduğu görülmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, donma-çözülme döngülerinin saplama deliğindeki kırılma yüküne etkisinin araştırıldığı bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Dış cephe kaplaması olarak kullanılan doğaltaşların bu özelliklerinin araştırılması, kaplama malzemesi olarak kullanılan malzemenin kullanım ömrü açısından önemli bir konudur. Bu çalışmada da donma-çözülme döngülerinin dış cephe kaplamalarında saplama deliklerinin kırılma yüklerine etkisi incelenmiştir. Bu inceleme, literatürde önemli bir eksikliğin giderilmesine öncülük edecektir.

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, bina dış cephe kaplamalarında kullanılan karbonat kökenli sedimanter doğaltaşların, özellikle soğuk bölgelerde maruz kaldıkları don olayı etkisiyle saplama deliklerindeki kırılma yüklerinin değişimlerinin ve farklı donma-çözülme döngüleriyle kırılma yüklerinin ilişkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, farklı bölgelere ait karbonatlı doğaltaşlar TS EN 12371 Donma Dayanım Tayini (TSE, 2011) deney standardına göre farklı sayıda donma-çözülme döngülerine tabi tutulmuş ve farklı döngülerdeki doğaltaşlara TS EN 13364 Saplama Deliğinde Kırılma Yükü Tayini (TSE, 2003) deneyi döngü öncesi ve sonrasında uygulanmıştır. Elde edilen kırılma yüklerinin donma-çözülme döngüleriyle ilişkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar, akım şeması şeklinde Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada izlenen yöntem

Çalışmada Kullanılan Doğaltaşlar

Çalışmada bina dış cephe kaplamalarında kullanılan üç farklı sedimanter kökenli kireçtaşı tercih edilmiştir. Çizelge 1’de bu doğaltaşlarla ilgili genel bilgiler ve bazı fiziksel ve mekanik özellikler, Şekil 2’de ise kullanılan doğaltaşların görünümleri verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan doğaltaşlar ve bazı fiziksel ve mekanik özellikleri

Doğaltaş Ticari İsmi	Kayaç Türü	Örnek kodu	Görünür Yoğunluk (kg/m ³)	Açık Gözeneklilik (%)	Tek Eksenli Basma Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
Light Emperador	Kireçtaşı	LE	2722	1,2	122	6,4
Diana Royal	Kireçtaşı	DR	2638	1,5	149	11,1
Crema Bella	Kireçtaşı	CB	2667	0,3	142	8,6



LE



DR



CB

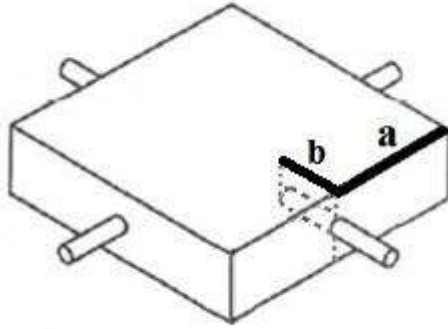
Şekil 2. Çalışmada kullanılan doğaltaşlara ait görünümler

Deneysel Çalışmalar

Deneyisel çalışmalar kapsamında, temel olarak Dona Dayanım Tayini (TS EN 12371) ve Saplama Deliğinde Kırılma Yüğü Tayini (TS EN 13364) standartları takip edilmiştir. Deneyler, belirlenen her bir doğaltaş için biri donma-çözölme öncesi, sekizi ise farklı donma-çözölme döngüleri sonrası olmak üzere toplam dokuz ayrı sette saplama deliğinde kırılma yüğü tayinlerini içermektedir.

İlk etapta seçilen üç doğaltaş numunesi, TS EN 13364 Saplama Deliğinde Kırılma Yüğü Tayini deneyinin standardına uygun olarak $20 \times 20 \times 3$ cm ölçülerine göre ebatlanmıştır. Belirlenen her bir deney seti için üçer numune, toplam dokuz set deney için her doğaltaştan 27 numune elde edilmiştir. Ebatlanan her bir numuneye Saplama Deliğinde Kırılma Yüğü Tayini (TS EN 13364) deney standardına uygun olarak dört saplama deliğı açılıp standartta belirtilen şekilde saplamlar yerleştirilmiştir. Bu şekilde her doğaltaş için toplam 108 saplama kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde kullanılan doğaltaşlarda anizotropi düzlemi gözlemlenmediğinden donma-çözölme döngü öncesi ve her bir döngü için üçer numune hazırlanmıştır. İlgili standarda göre, saplama deliklerinin yerleri, saplama boyutları-tolerans ve saplamanın oluşturulma yöntemi gibi özelliklerin üzerinde durulması gerekmektedir. Numunelere saplama deliğı açılırken deliğın merkezi 0,5 mm hassasiyetle ölçölmüş ve diğer kenarlardan 98 mm ile 102 mm arasında bir uzaklık seçilerek saplama deliğinin oluşturulacağı yer (a) belirlenmiştir. Delik çeperi ve iki yüzey arasındaki taşın kalınlığı, 0,5 mm hassasiyetle ölçölerek $10 \pm 2,0$ mm olması sağlanmıştır. Oluşturulan deliklerin çapları standart gereğı $10 \pm 0,5$ mm, derinlikleri (b) ise 30 ± 2 mm'dir (Şekil 3).



$$98 \text{ mm} \leq a \leq 102 \text{ mm}$$
$$b \sim 30 \pm 2 \text{ mm}$$

Şekil 3. Numunelerin saplama deliğı merkezlerinin belirlenmesi (TSE 2003)

Çapı $6,0 \pm 0,1$ mm, uzunluğu 50 mm olan saplamlar, EN 197-1' e göre CEM I 52,5 R çimentosuyla kütlece $0,6 \pm 0,1$ su/çimento oranı ile hazırlanan harçla birlikte deliklere yerleştirilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Saplama delikleri yerleştirilmiş numuneler

Saplama yerleştirilen doğaltaş numunelerine Dona Dayanım Tayini (TS EN 12371) standardına uygun olarak sırasıyla 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 donma-çözülme döngüsü uygulanmıştır. Bu kapsamda, standarda uygun şekilde ilk etapta numuneler $70\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta sabit kütleye erişinceye kadar kurutulmuştur. Etüvden alınan numuneler, birbirinden en az 15 mm uzaklıkta olacak şekilde su ilave edilecek kaba yerleştirilmiştir. Bu aşamada kademeli olarak numunelerin bulunduğu kaba su ilave edilerek örneklerin suya doymun hale gelmesi sağlanmıştır. Numuneler daha sonra başlangıç zamanına göre 48 ± 2 saat süreyle su içerisinde bırakılmıştır. Numuneler suya doymun hale geldikten sonra donma-çözülme döngülerine tabi tutulmuştur. Donma-çözülme deney standardında belirtildiği şekilde her bir döngü, havada 6 saatlik donma periyodunu ve bunu takip eden suya daldırılmış durumda 6 saatlik çözülme periyodunu içermektedir.

Donma-çözülme öncesi ve yapılan döngüler sonrasında doğaltaş numunelerinin saplama deliğinde kırılma yük deneyleri, TS EN 13364 Saplama Deliğinde Kırılma Yüğü Tayini deneyinin standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 5). Bu deneyde, numune kırılincaya kadar 50 ± 5 N/s hızla yük uygulanır.



Şekil 5. Saplama deliğinde kırılma yükü tayini cihazında sabitlenen numune görünümü

Çalışmada kullanılan doğaltaşlar için yapılan her donma-çözülme döngüsünde üçer numune kullanılmış ve bu numunelere yerleştirilen dörder saplama için kırılma yükü (BL) değerleri $BL_1, BL_2, \dots, BL_{12}$ şeklinde kaydedilmiştir. Her bir döngü için ortalama kırılma yükü (BL) değerleri, bu değerlerin standart sapması (s) ve varyasyon katsayıları (v) hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Deney sonuçlarının ortalama, standart sapma ve varyasyon katsayısı değerleri

	LE	DR	CB
Döngü	BL (kN)	BL (kN)	BL (kN)
0	1,477	1,911	1,524
5	1,259	1,839	1,430
10	1,091	1,812	1,332
15	1,092	1,784	1,326
20	1,131	1,727	1,326
25	1,131	1,697	1,324
30	1,042	1,692	1,311
35	1,137	1,666	1,290
40	1,156	1,644	1,248
BL	1,16	1,75	1,33
s	0,13	0,09	0,10

v 0,11 0,05 0,08

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde ilk etapta kırılma yük kayıpları hesaplanmıştır. Elde edilen kırılma yük kayıplarıyla donma-çözülme döngülerinin grafiksel ilişkileri incelenmiştir. Her bir doğaltaş için kırılma yükü kayıpları Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır. Donma-çözülme döngüleri sonrası kırılma yük kayıpları Çizelge 4’te verilmiştir.

$$L_{BL} = \frac{BL_0 - BL_C}{BL_0} \times 100 \quad (1)$$

Burada; L_{BL} : Kırılma yükü kaybı (%)

BL_0 : Donma-çözülme döngülerinden önce ölçülen kırılma yükü (kN)

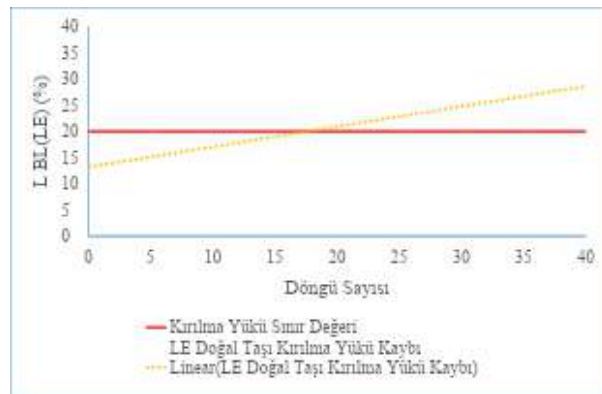
BL_C : Donma-çözülme döngülerinden sonra ölçülen kırılma yükü (kN)

(c= 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40)

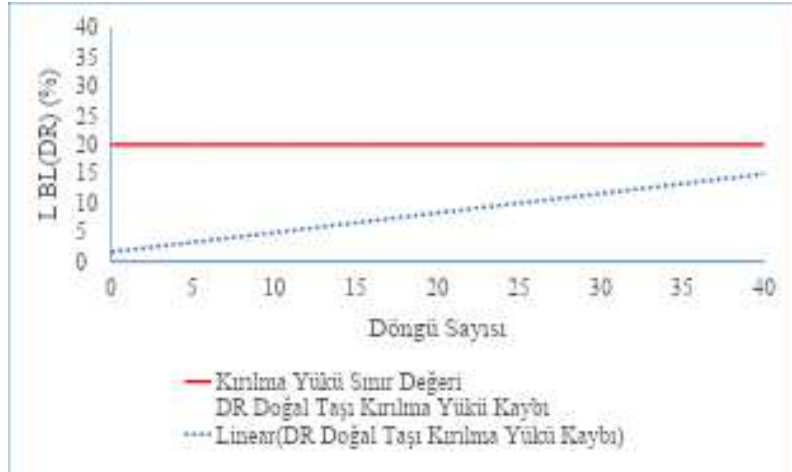
Çizelge 4. Kırılma yüklerinin yüzdesel kayıpları

	LE		DR		CB	
Döngü	BL (kN)	L_{BL} (%)	BL (kN)	L_{BL} (%)	BL (kN)	L_{BL} (%)
0	1,477	0	1,911	0	1,524	0,00
5	1,259	14,76	1,839	3,77	1,430	6,17
10	1,091	26,13	1,812	5,18	1,332	12,60
15	1,092	26,07	1,784	6,65	1,326	12,99
20	1,131	23,43	1,727	9,63	1,326	12,99
25	1,131	23,43	1,697	11,20	1,324	13,12
30	1,042	29,45	1,692	11,46	1,311	13,98
35	1,137	23,02	1,666	12,82	1,290	15,35
40	1,156	21,73	1,644	13,97	1,248	18,11

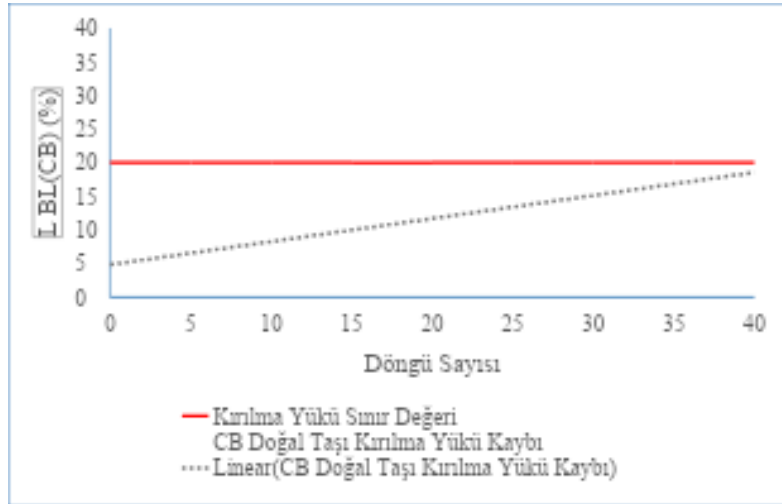
Çizelge 4’te verilen kırılma yük kayıplarıyla döngü sayıları arasında ilişkiler LE, DR ve CB doğaltaşları için sırasıyla Şekil 6, 7 ve 8’de verilmiştir. Erguvanlı (1995)’ya göre, donma-çözülme döngüleri sonrasında tek eksenli basma dayanımlarında kaybın %20’den fazla olması durumunda doğaltaşların donma-çözölmeye maruz kaldıkları soğuk bölgelerde kullanılmaması gerektiği belirtilmektedir. Camposinhos (2014)’e göre, don testinden önce ve sonra ölçülen eğilme dayanım kaybı %20 veya daha az olan bir doğaltaş, dona dayanıklı olarak kabul edilebilir. Saplama deliğinde kırılma yükündeki kaybın da kayaç dinamiği açısından benzer değerlendirmeye alınması uygun olacaktır.



Şekil 6. LE kırılma yük kayıpları ile donma-çözülme döngü sayıları ilişkileri



Şekil 7. DR kırılma yük kayıpları ile donma-çözülme döngü sayıları ilişkileri



Şekil 8. CB kırılma yük kayıpları ile donma-çözülme döngü sayıları ilişkileri

Şekil 6'ya bakıldığında LE doğaltaşının yaklaşık 7 döngüden sonra %20'lik kırılma yükü kaybını aştığı ve bu doğaltaşın donma-çözölmeye maruz kalacağı bölgelerde kaplama malzemesi olarak kullanımının ekonomik olmayacağı anlaşılmaktadır. LE doğaltaşının breşik yapıda bir kireçtaşı olması ve yapısında çatlak düzlemlerinin bulunması bu sonucu desteklemektedir. Şekil 7 ve 8'de verilen donma-çözölme döngüleri ve kırılma yükü kayıplarına bakıldığında DR ve CB doğaltaşlarının 40 döngü için de %20'lik kaybı aşmadığı ve yapılan döngüler sonrasında herhangi bir bozulmaya rastlanılmadığı için bu doğaltaşların soğuk bölgelerde de kaplama malzemesi olarak kullanılabileceği söylenebilir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada, dış cephe kaplama malzemesi olarak kullanılan bazı doğaltaşlar için saplama deliğinde kırılma yükü kayıplarının donma-çözölme döngüleri ile ilişkileri incelenmiştir. Buna göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Doğaltaşların kırılma yükü kayıplarıyla donma-çözölme döngü sayıları arasındaki grafiksel ilişkilerde, DR doğaltaşı için bu iki parametrenin $R^2 = 0,9572$ belirtme katsayısıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde CB ve LE doğaltaşları için belirtme katsayıları sırasıyla $R^2 = 0,7562$ ve $R^2 = 0,3600$ bulunmuştur.

2. DR ve CB doğaltaşları için yapılan donma-çözülme döngüleri sonrasında Erguvanlı (1995) ve Camposinhos (2014)'te belirtilen %20'lik kayıp aşılmamıştır. Ancak LE doğaltaşı için 7 donma-çözülme döngüsü sonrası belirtilen kayba ulaşılmıştır. Dolayısıyla bu kayacın soğuk bölgelerde kullanılması uygun değildir. Ancak diğer kayaçlar DR ve CB için soğuk bölgelerde kaplama malzemesi olarak kullanılması uygun olacaktır.

Dış cephe kaplamalarında özellikle soğuk bölgelerde kullanılacak doğaltaşlarla ilgili bu tür çalışmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Kırılma yükü kayıpları ve özellikle taşlarda oluşan eğilme miktarlarının belirlenmesi önemli bir konudur. Belirlenen kırılma yüklerine ve eğilme miktarlarına göre doğaltaşın kaplama malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağı belirlenebilir ve yapılması gereken bakım periyotları düzenlenebilir.

KAYNAKLAR

Aghayeva, A. (2022). Bakü Aqlay (Gülbağ) Taşı'nın yapılarda çevre ile uyum performansının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Camposinhos, R. S., Amaral, P. M., Rosa, L. G., & Pires, V. (2008). Dimension stone cladding design—Dowel anchorage design. In 2nd International Congress of Dimension Stones (ss. 203–207). Carrara.

Camposinhos, R. S. (2013). Undercut anchorage in dimension stone cladding. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 166(3), 158–174.

Camposinhos, R. (2014). Stone cladding engineering. Springer.

Çelik, M. Y. (2003). Dekoratif doğal yapı taşlarının kullanım alanları ve çeşitleri. Madencilik, 42(1), 3–15.

Emek, G. (2015). Cephe kaplamada kullanılan doğaltaşların montajında saplama deliğinde kırılma yükünün belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Erguvanlı, K. (1995). Mühendislik Jeolojisi. Seç Yayınları.

Huang, B., Fu, S., Lu, W., Günay, S. (2020). Experimental investigation of the breaking load of a dowel-pinned connection in granite cladding. Engineering Structures, 215, 110642.

Patronis, M., Laskaridis, K., Niaou, M. (2013). Relationship between breaking moments at the dowel hole and at flexure under concentrated load of ornamental stones. Key Engineering Materials, 548, 287–294.

Pires, V., Amaral, P. M., Rosa, L. G., Camposinhos, R. S. (2011). Slate flexural and anchorage strength considerations in cladding design. Construction and Building Materials, 25(8), 3966–3971.

Şengün, N. (2021). Estimation of anchor breaking load values using some physical and mechanical properties of carbonate rocks used as cladding stones. Arabian Journal of Geosciences, 14, 2177.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2003). TS EN 13364: Doğaltaşlar–Deney Metotları–Saplama Deliğinde Kırılma Yükünün Tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Türk Standartları Enstitüsü [TSE]. (2011). TS EN 12371: Doğaltaşlar–Deney Metotları–Dona Dayanım Tayini. Türk Standartları Enstitüsü.

Wang, Z., Shao, M., Gao, Z., Yao, Y. (2021). Connection strength of undercut anchorage stone cladding. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 719, No. 2, p. 22033). IOP Publishing.

ADINI MERMERİNDEN ALAN BİR İLÇE: GÖLMARMARA

A DISTRICT NAMED AFTER ITS MARBLE: GÖLMARMARA

Ö. Bostancı^{1,*}

¹ *İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türk-İslam Arkeolojisi Anabilim Dalı*

* *Özlem Bostancı: ozlembostancisefa@gmail.com)*

ÖZ

1987 yılında ilçe olan Gölarmara, günümüzde Manisa il sınırları içerisinde yer almaktadır. İsmiini çok yakınındaki gölü ve mermer ocaklarından almıştır. Evliya Çelebi Seyahatnamesinde bölgeden “Mermerecik (Marmaracık)” olarak bahsetmektedir. Bir süre Gölmermere olarak geçen isim dile daha kolay gelmesi açısından Gölarmara olmuştur. Halen yerel halk tarafından “Mermere” olarak telaffuzu yaygındır. Gölarmara’nın tarihi ve coğrafi açıdan mermeri ile bu mermerin malzeme olarak kullanımı organik ilişkilidir. İlçenin günümüz sınırlarında bölgesel malzeme olarak değerlendirmeye alınabilecek mermer ürünlerin başında, Antik Dönem kalıntıları, çeşmeler, bazı mezar taşları, Şahuban Cami (15. yy) son cemaat yeri giriş kapısı ve kilit taşı, Halime Hatun Cami’nin (17. yy) kısmen mermer şadırvanı ile tasarım ve malzeme kompozisyonu açısından ünik bir örnek sayılabilecek mermer minberi gelmektedir. Yakın zamanda ilçenin isminin diğer kaynağı olan Marmara Gölü’nün büyük kısmı tamamen kurumuş bulunmaktadır. İlçenin var olan mermer yatakları ise halen büyük bir potansiyel barındırmaktadır. Bu potansiyel günümüzde mermerin kullanım alanlarının sınırlarını genişletebilecek anlamlar barındırmaktadır. Bu anlamlar ise kentin tarih okuması ve dahi kültürel kimliği açısından beslenebilecek bir ortamı ifade etmektedir. Araştırmamızda konumuz özelinde mermerin, Gölarmara ilçesinin kültürel kimliğine ve kentin tarihsel okumasına mimari ve dekorasyon malzemesi olarak büyük katkısı ve potansiyeli değerlendirilecektir. Ayrıca bu potansiyelin günümüzdeki kullanım alanları üzerinden anlamlı yorumlar bulundurulması hususuna değinilecektir.

Anahtar Kelimeler: Gölarmara, mermer, malzeme

ABSTRACT

In 1987, Gölarmara, which became a district, is located within the borders of Manisa province today. It was named after the nearby lake and marble quarries. Evliya Çelebi mentions the region as ‘Mermerecik (Marmaracık)’ in his travelogue. For a while, the name Gölmermere became Gölarmara in order to make it easier to speak. It is still commonly pronounced as ‘Mermere’ by the local people. Gölarmara’s historical and geographical marble and the use of this marble as a material are organically related. The main marble products that can be considered as regional materials within the present borders of the district are the ancient ruins, fountains, some tombstones, the entrance door and keystone of the last congregation place of Şahuban Mosque (15th century), the partially marble fountain of Halime Hatun Mosque (17th century) and the marble pulpit, which can be considered a unique example in terms of design and material. Recently, Marmara Lake, the other source of the name of the district, has completely dried up. The existing marble deposits of the district still harbour a great potential. This potential contains meanings that can expand the boundaries of the usage areas of marble today. These meanings express an environment that can be fed in terms of the city’s historical reading and even cultural identity. In our research, the great contribution and potential of marble as an architectural and decoration material to the cultural identity of Gölarmara district and the historical reading of the city

will be evaluated. In addition, the issue of meaningful interpretations of this potential through its current usage areas will be addressed.

Keywords: Gölarmara, marble, material

GİRİŞ

1987 yılında ilçe olan Gölarmara, günümüzde Manisa il sınırları içerisinde yer almaktadır. İsmi çok yakınındaki gölü ve mermer ocaklarından almıştır. Evliya Çelebi Seyahatnamesinde bölgeden “Mermerecik (Marmaracık)” olarak bahsetmektedir (Kahraman, 2011). Bir süre Gölmermere olarak geçen isim dile daha kolay gelmesi açısından Gölarmara olmuştur. Halen yerel halk tarafından “Mermere” olarak telaffuzu yaygındır.

Bahse konu Marmara Kazâsı, günümüzde Gölarmara ilçesi olarak Manisa’ya bağlıdır (Şekil 1). Şehir, Manisa’ya 60 km mesafede olup Marmara Dağı’nın doğusuna kurulmuştur. Güneyindeki Marmara Gölü 12 km uzaklıkta olup göl, Kumçay ve Gediz nehirlerinden beslenmektedir. Marmara Kazâsı sırasıyla, 1867’de Aydın Vilâyeti-Saruhan Sancağı-Akhisar Kazâsına bağlı nahiye; 1924 yılında Manisa-Akhisar’a bağlı nahiye (Bucak) iken, 1987 yılında da müstakil ilçe haline getirilmiştir.



Şekil 1. Gölarmara ilçesinin coğrafi konumu

Gölarmara sınırları içerisinde, Koç Üniversitesi’nde görevli Chris Roosevelt tarafından 2005 yılında yüzey araştırması çalışmalarına başlanmıştır. Bu araştırmalar Bintepler olarak bilinen bölgedeki 72 km’lik bir alanda gerçekleştirilmiştir. Bintepler, Marmara Gölü’nün güneyinde yer almakta olup Lydia’nın başkenti Sardes’in kralı Tümülüs gömülerinin yapıldığı alanlardır. Yerleşimlerde İlk Tunç Çağı’ndan başlayarak Osmanlı dönemine kadar iskânın devam ettiği saptanmıştır (Roosevelt-Luke, 2011).

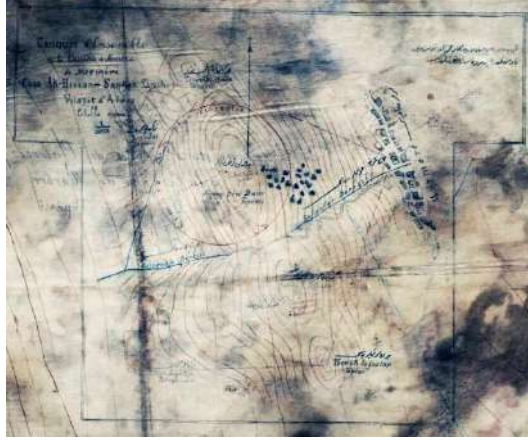
Söz konusu ilçeye ismini veren, çeşitliliği ve oluşumu açısından birçok araştırmaya konu olan Marmara Gölü ve mermeridir. Marmara Gölü, önlenemeyen kuraklık ve sulama hataları sebebiyle yok olmaya başlamış, gölün akıbeti hakkında da Kasım 2022 tarihinde yaklaşık üçte birlik kısmının sulak alan olarak kalacağı geri kalan kısmının tarıma açılacağı bir protokol imzalanmıştır.

Hali hazırda küçük bir ilçe olan Gölarmara’nın elinde kalan ve ismini aldığı ve halen daha yerel halkın ifadelerinde “mermer”ini vurguladığı ve bildiği mermeri kalmıştır.

Konumuz tekelinde bölgesel malzeme kültürüne etkili bir hizmet vermiş olan mermerin, tarihi eserlerde kullanımı, bir ilçenin yerel kültürüne sağlığını servisi, kent kimliğine etkisi ve taşıdığı potansiyeli, görseller ve tarihi haritalar ile değerlendirmeyi amaçlamaktayız. Bu amaç doğrultusunda öncelikle ilçenin mermer yataklarını veren bazı haritalar ile başlamak önem arz etmektedir. Haritalar

dışında kullanılan görsel malzeme ilçede gerçekleştirilen keşif gezisinde çekilmiş ve metin içerisinde kullanılmışlardır.

Hicri 29 Aralık 1341 (Miladi Ağustos 1923) yılına tarihlenen, o zaman Aydın vilayeti Saruhan sancağına bağlı Akhisar kazasının Marmaracık (Marmara) nahiyesinde mermer taşı ocakları haritalarında siyah noktalar mermer yataklarını belirtmek için kullanılmışlardır (Resim 1).

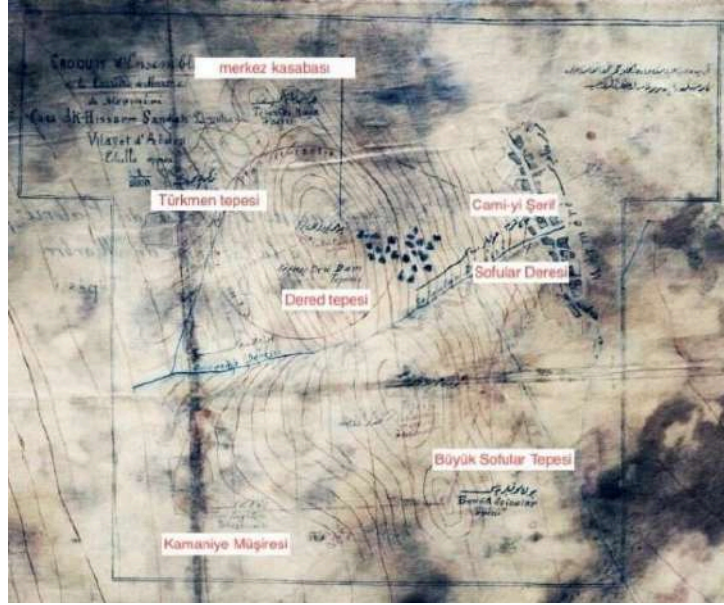


Resim 1. BOA. HRT. h. 1507, a.g.y.tt, EHT, Fr. (Ölçek 1/5000)

Haritalar üzerinde inceleme, uydu görüntüsü (Resim 2), uydu görüntüsü ile 1923 yılı haritası karşılaştırması (Resim 3) ve Osmanlıcadan çeviri yaparak (Resim 4) bölgenin Deve Damı Tepesi olduğunu tespit edebilmiş bulunmaktayız. Günümüzde ikisi de Gölarmara sınırları içinde Dedeveli ve Develi diye 2 tepe bulunmaktadır. Ayrıca Deveyolu Tepesi de bulunmaktadır.



Resim 2 ve 3. Gölarmara uydu görüntüsü ve 1923 yılı haritası ile birleştirilmesi



Resim 4. 1923 yılı haritasındaki yer isimlerinin Türkçe transkripsiyonu

Sağ üst köşeye baktığımızda, bugün merkeze bağlı mahalle olan Sofuların iki yanındaki tepe bulunmaktadır. Sağa doğru Mermere'nin merkezi ve yerleşimin olduğunu gösteren evler vs. görülmektedir. Merkezden Sofular mahallesine doğru bakılınca, ikinci solundaki tepe Deve Dami Tepesi'dir.

Haritalar üzerinde yapılan değerlendirmeler sayesinde günümüzde artık kullanılmayan mermer yataklarının, günümüz teknolojisini de kullanarak tekrar bulunması mümkün olabilmektedir. Haritalar ve yerel halk sayesinde artık kullanılmayan ve günümüzde NATO Tepesi olarak adlandırılan bölgede bazı mermer yataklarını bulunabilmiştir (Resim 5, Resim 6 ve Resim 7).



Resim 5, 6 ve 7. NATO Tepesi mermer yatakları

Zamanında çok da popüler olan ve bahsedilen yataklardan çıkan mermerlerin bölgede kullanımı çok yaygındır. Gölarmara'nın tarihi ve coğrafi açıdan mermeri ile bu mermerin malzeme olarak kullanımı organik ilişkilidir. İlçenin günümüz sınırlarında bölgesel malzeme olarak değerlendirmeye alınabilecek mermer ürünlerin başında, Antik Dönem kalıntıları, çeşmeler, bazı mezar taşları, Şahuban

Cami (15. yy) son cemaat yeri giriş kapısı ve kilit taşı, Halime Hatun Cami'nin (17. yy) kısmen mermer şadırvanı ile tasarım ve malzeme kompozisyonu açısından ünik bir örnek sayılabilecek mermer minberi gelmektedir. Ayrıca çok fazla yapıda erken döneme ve farklı yer/yapıya ait olan fakat daha sonra farklı yapılarda kullanılan devşirme mermer malzeme görülmektedir.

Şahuban Cami

Cami, Sarı İbrahim Paşa'nın kızı Şâhuban Hatun tarafından Şâhuban Kadın Külliyesi'nin bir bölümü olarak 15. yüzyılda yaptırılmıştır (Resim 8). Yapan kişi bilinmemektedir ve kitabesi bulunmamaktadır. Erken Osmanlı Dönemi yapısı olarak İzmir 2 Nolu KTVKK 23.10.1991/2221 kararı ile tescillenmiştir.



Resim 8. Şahuban Cami

Şahuban Cami'nin genelinde mermer, ana yapı malzemesi olmaktan ziyade dekoratif malzeme olarak kullanılmıştır. Cami bahçesinde sonrasında devşirme malzeme örneklerinde de açıklayacağımız antik dönem sütunlar, sütun başlıkları ve parçalar bulunmaktadır. Bunun yanı sıra yapının dikdörtgen tasarımlı pencere çerçevelerinde (Resim 9), son cemaat yeri giriş kapısı çerçevesi (Resim 10) ve merdivenlerinde (Resim 11) mermer kullanımı söz konusudur. Ayrıca caminin avlusunda bulunan şadırvanın tamamı mermer malzemeden yapılmıştır (Resim 12).



Resim 9, 10, 11 ve 12. Şahuban Cami'de mermer kullanımı

Halime Hatun Cami ve Külliyesi

Vakfiyesinden, III. Mehmed'in (1595-1603) dayesi Halime Hatun tarafından yaptırıldığı ve cami, medrese, darülhadis, sıbyan mektebi, kütüphane, imaret ve misafirhaneden meydana geldiği öğrenilmektedir. Erken Osmanlı Dönemi yapısı olarak İzmir 2 Nolu KTVKK 17.11.1999/8896 kararı

ile tescillenmiştir. Bugüne kalan birimler cami, medrese ve imaretle aynı yüzyılın sonlarında gelir sağlamak amacıyla külliye eklenen çifte hamamdır. Cami ve külliye genelinde yaygın mermer kullanımı söz konusudur. Son cemaat yeri (Resim 13) ve harim (Resim 14) kısmı antik mermer sütunlar üzerine oturtulmuştur. Şadırvanda (Resim 15) mermer kullanımı mevcuttur. Pencere ve kapı açıklıkları mermer malzeme tasarımıdır (Resim 16). Genel kullanımın yanında özellikle mermer malzemeden mihrap sütunçeleri (Resim 17) ve ünik bir mermer eser olan minberi (Resim 18) dikkat çekmektedir.



Resim 13, 14, 15, 16. Halime Hatun Cami'de (Yeni Cami) mermer kullanımı



Resim 17 ve 18. Halime Hatun Cami mihrap ve minberi

Mezar Taşları

Gölmarmara ilçe merkezi ve köylerinde bulunan mezarlıklarda, türbelerde ve camilerin bahçelerinde çok sayıda mermer mezar taşı bulunmaktadır (Resim 19 ve 20). Tarihi mezar taşları çok zengin tasarımlara sahiptir (Resim 21).



Resim 19, 20 ve 21. Gölarmara'dan mezar taşları

Çeşmeler

Gölarmara ilçesinde çok sayıda tarihi çeşme bulunmaktadır ve bu çeşmelerde çoğunlukta güçlü bir malzeme olan mermer kullanılmıştır. Çeşmelerin bazıları bağımsız tek başına yapılmışken kimi çeşme ise külliye'nin bir parçası olarak tasarlanmışlardır.

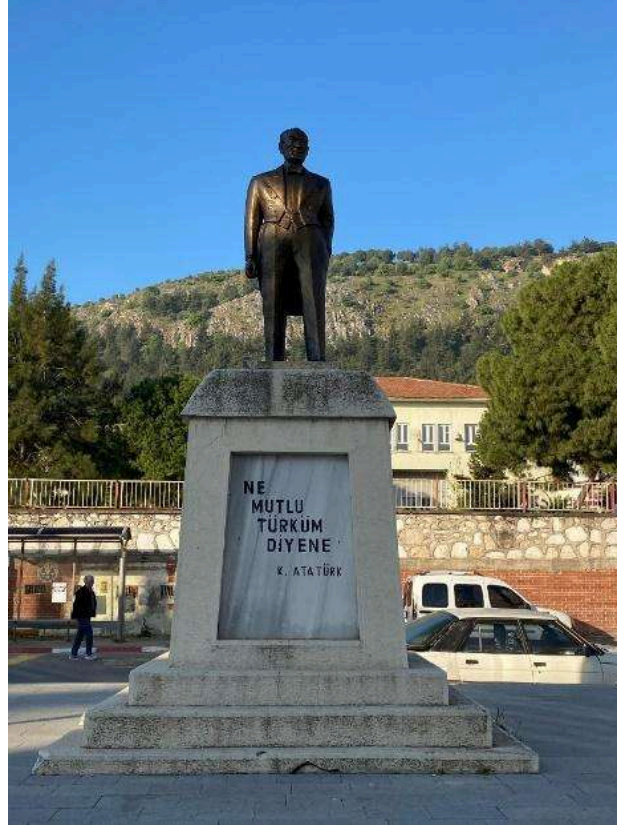
İlçede eski belediye binasının üst kısmında devşirme malzeme kullanılmış bir çeşme (Resim 22) bulunmaktadır ve adı bilinmemektedir. Yine ilçenin farklı mahallerinde bulunan Harlak Çeşmesi (Resim 23) ve Ortalık Çeşmesi (Resim 24) ile Halime Hatun Külliyesi Çeşmesi (Resim 25) mermer malzeme kullanımına örnek teşkil etmektedirler.



Resim 22, 23, 24 ve 25. Gölarmara'da bulunan tarihi çeşmeler

Atatürk Heykeli ve Mermerin Devşirme Malzeme Olarak Kullanımı

Gölarmara ilçesinde çok özel bir eser bulunmaktadır. Türkiye Cumhuriyeti'nin kurucusu Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal Atatürk ile tanışma şerefine ulaşmış heykeltıraş Cevdet Sevil tarafından yapılmış ve ilçe merkezini ifade eden bir alana yerleştirilmiş Atatürk Heykeli mevcuttur (Resim 26). Bu heykel 1936 yılına tarihlidir ve Gazi Mustafa Kemal'in hayattayken yapılan nadir heykellerinden biridir. Heykelin kaidesi mermerdir ve halkın ifadesine göre Mermere Dağı'ndan getirilmiştir olan bölgenin kendi mermerinden yapılmıştır.



Resim 26. Türkiye Cumhuriyeti'nin kurucusu Gazi Mustafa Kemal Atatürk'ün heykeli

Gölmarmara genelinde bulunan yapılar ve mekânlarda bir devşirme malzeme kullanımı söz konusu olup bu kültüre hizmet eden materyallerin çoğunluğu mermer malzemedir. Örneğin, Şahuban Cami'nin son cemaat yeri tabanında antik dönemden kalma levhalar kullanılmıştır (Resim 27) ve bahçesinde çok sayıda antik dönem sütun başlığı (Resim 28) bulunmaktadır. Ayrıca ilçede antik dönem sütunları belli başlı köşelere araç kullananların dikkati hususunda yerleştirilmiştir (Resim 29).



Resim 27, 28 ve 29. Gölmarmara'da devşirme malzeme kullanımı

SONUÇ

Yakın zamanda ilçenin isminin diğer kaynağı olan Marmara Gölü'nün büyük kısmı tamamen kurumuş bulunmaktadır. İlçenin var olan mermer yatakları ise halen büyük bir potansiyel barındırmaktadır. Bu potansiyel günümüzde mermerin kullanım alanlarının sınırlarını genişletebilecek

anlamlar barındırmaktadır. Bu anlamlar ise kentin tarih okuması ve dahi kültürel kimliği açısından beslenebilecek bir ortamı ifade etmektedir.

Gölmarmara'nın tarihi ve coğrafi açıdan mermeri ile bu mermerin malzeme olarak kullanımı organik ilişkilidir. Yapı ve dekorasyon malzemeleri Anadolu'nun her bölgesinde lokal malzemeyle paralellik göstermektedir. Örneğin güneyinde taş ana malzeme iken kuzey bölgelerde ahşaptır. Gölmarmara yerel kaynağı olan mermer ile malzeme geleneğine hem sadık kalmış hem de gerek dekorasyon malzemesi hem de mermerinin, mimarisinde sıkça kullanılmasıyla çok güzel örneklerle ev sahipliği yapmaktadır.

Gölmarmara ve mermeri ile olan iş birliği veya ilişkisi, aslında muazzam bir geleneği temsil etmektedir ve çok popüler olmasa da aslında bir bütünü ve kültürü oluşturmaktadır. Bu gelenek aslında kent kimliği oluşturmak, bölgenin tarihini okumak ve yorumlamakta bize önemli rota belirlemede ve yol göstermektedir.

KAYNAKLAR

Alaca, H. (2020). Gölmarmara Halime Hatun Vakfı. Gaziantep University Journal of Social Sciences, 19(3), 1373–1385.

Çakmak, Ş. (2009). Gölmarmara Halime Hatun İmareti restitüsyon ve restorasyon önerileri. Sanat Tarihi Dergisi, 18(1), 25–49.

Kahraman, S. A. (2011). Günümüz Türkçesiyle Evliyâ Çelebi Seyahatnâmesi: Kütahya, Manisa, İzmir, Antalya, Karaman, Adana, Halep, Şam, Kudüs, Mekke, Medine (Cilt 1, Kitap 9, ss. 69–70). İstanbul.

Roosevelt, C. H., Luke, C. (2011). Asartepe yüzey araştırma raporu.

Sezen, T. (2006). Osmanlı Yer Adları. Başbakanlık Devlet Arşivleri Genel Müdürlüğü.

Ünalın, S. (1998). Akhisar ve Gölmarmara'daki Türk Anıtları. Yüksek Lisans Tezi (Yayınlanmamış), Ege Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sanat Tarihi Ana Bilim Dalı.

İSCEHİSAR (DOKİMEİON) MENEKŞE (PAVONAZZETTO) MERMERLERİNİN PARMAK İZİ (FINGERPRINT) ÖZELİKLERİNİN, ÇOKLU ANALİZ YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF FINGERPRINT FEATURES OF İSCEHİSAR (DOKİMEİON) VIOLET (PAVONAZZETTO) MARBLES WITH MULTIPLE ANALYSIS METHODS

M. Bağcı^{1*}, A. Yıldız¹, Z. Hüseyinağa¹

¹*Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.*

Sorumlu yazar: mbagci@aku.edu.tr

ÖZ

Mermerler saf karbonatlı kristalin kayalardır. Ocaktan ilk çıkarıldığında, fazla ilgi çekmeyen bu taşlar, değişik teknikler kullanılarak şekillendirilip işlendiğinde, yüksek albeniye sahip sanat eserlerine dönüşebilmektedir. Mermerler değişik tarihi dönemlerde arkeologlar, sanat tarihçileri, mimarlar ve heykeltıraşların oldukça ilgisini çekmiş, bu nedenle Bizans, Ortaçağ ve Rönesans dönemine ait tarihi yapıtlarda oldukça fazla miktarda kullanılmıştır. Güzel renkli ve kendine has dokuya sahip mermerler, ülkemizde, özellikle Batı-Orta Anadolu Bölgesi'nde yaygın bir biçimde bulunmakta olup bunlar içerisinde en önemlileri, Marmara Adası (Proconnesian), İscehisar (Dokimeion), Göktepe (Aphrodisian) ve Selçuk (Ephesian) bölgeleridir. Yunan, Roma Bizans ve daha sonraki dönemlerde bu bölgelerdeki ocaklardan çıkartılan mermerler çok geniş bir bölgede oldukça fazla miktarlarda kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, İscehisar (Afyonkarahisar) menekşe renkli mermerlerinin çoklu analitik yaklaşımlar kullanarak, mineralojik, petrografik, kimyasal ve izotopik analizleri ile birlikte mermerlerin parmak izlerinin tanımlanması ve belirlenmesidir.

Anahtar kelimeler: Mermer, Parmak izi, Duraylı izotop, Mineraloji, İscehisar

ABSTRACT

Marbles are pure carbonate crystalline rocks. When first extracted from the quarry, these stones do not attract much attention; however, when shaped and processed using various techniques, they can be transformed into highly attractive works of art. Marbles have attracted the attention of archaeologists, art historians, architects and sculptors in different historical periods, and for this reason, they have been used in large quantities in historical structures from the Byzantine, Middle Ages and Renaissance periods. Marbles with beautiful colors and unique textures are widely found in our country, especially in the Western-Central Anatolia Region, the most important of which are the Marmara Island (Proconnesian), Iscehisar (Dokimeion), Goktepe (Aphrodisian) and Seljuk (Ephesian) regions. In the Greek, Roman, Byzantine and later periods, the marbles extracted from the quarries in these regions were used in large quantities in a very wide area. This study aims to identify and determine the fingerprints of İscehisar (Afyonkarahisar) violet marbles using multiple analytical approaches, along with mineralogical, petrographic, chemical and isotopic analyses.

Keywords: Marble, Fingerprint, Stable isotope, Mineralogy, İscehisar

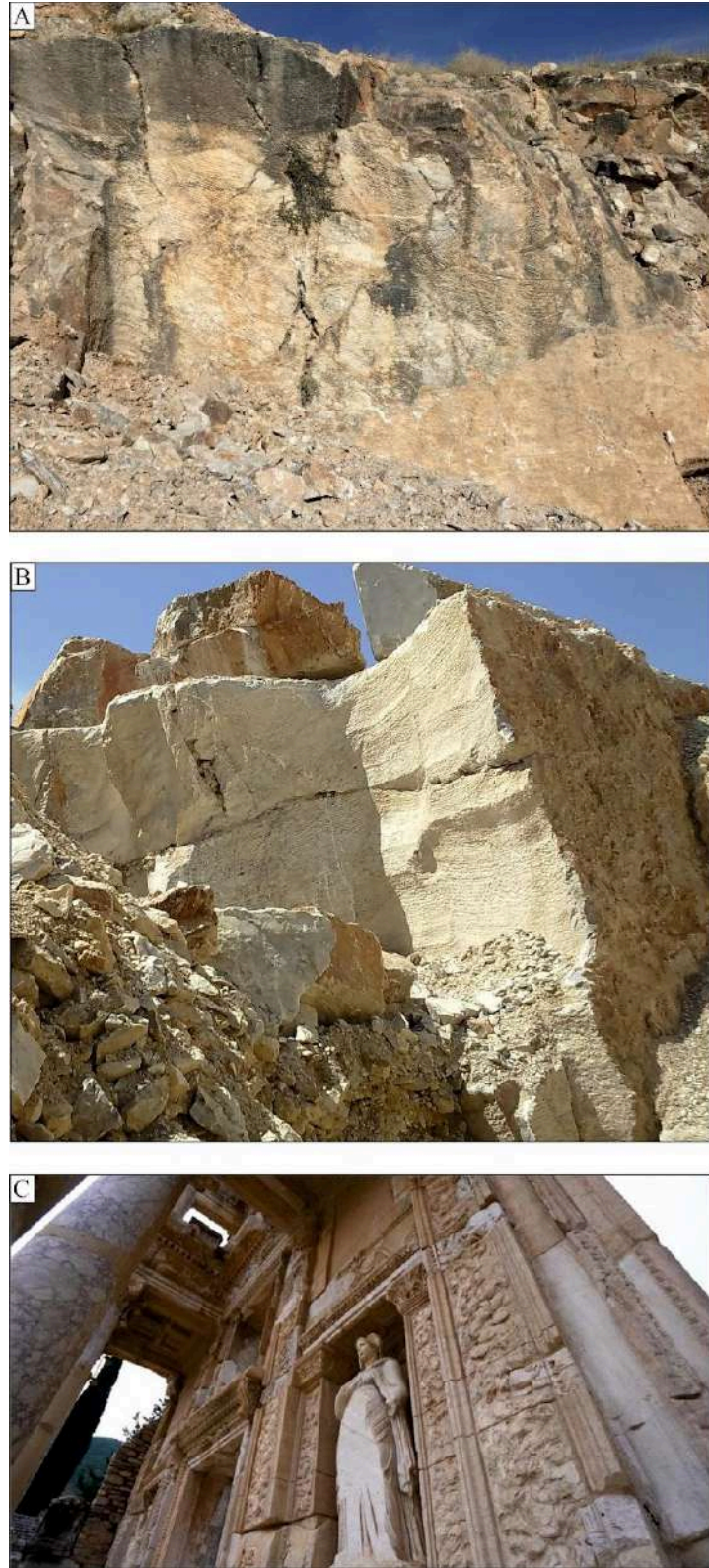
1. GİRİŞ

Afyon İscehisar yöresinde ilk mermer çıkartılması M.Ö. 900 yıllarında başladığı belirtilmektedir (Erguvanlı vd.1972). Antik dönemde Doğu Roma imparatorluğu döneminde İscehisar (Dokimenion) bölgesindeki mermer ocaklarında önemli miktarda mermer üretimi yapılmaktaydı. Üretilen mermerler heykel üretimi, sütun yapımı gibi alanlarda kullanılmıştır. Özellikle deniz yoluyla İtalya ve diğer Avrupa ülkelerine gönderilmiştir. İscehisar (Dokimenion) mermer ocaklarından Roma'ya mermer gönderildiğini belirtmiştir (Pekman,1993). Antik Yunan ve Roma'da mermerin estetik ve dayanıklı olması anıtsal yapıtlarda tercih edilmesini sağlamıştır. Ünlü bir antik kent olan Efes, yalnızca gücü değil aynı zamanda saygınlık ve zenginliği simgeledikleri kamusal meydan ve tapınaklarında Afyon Menekşe (Pavonazzetto) ve Afyon Şeker gibi mermerlerin kullanılmıştır (Şekil 1). 2024 yılında hazırlanan 55 Uluslararası Jeoloji Bilimleri Birliği (IUGS) Miras Taşlar listesi kitabında Afyon menekşe mermerlerini içeren bölüm yer almıştır (Koralay et al., 2024). Albustanlıoğlu, 2000 yılında Dokimeion antik mermer ocakları ve ihracat potansiyeli başlıklı yüksek lisans tezinde, antik dönemlerde mermer ocaklarında yapılan üretim çalışmaları hakkında detaylı bilgiler vermiştir. 1980'lerden günümüze mermerlerle ilgili çok sayıda köken (origin) araştırması yayınlanmış olup bu çalışmalarda genel olarak kullanılan analitik yöntemler ve kapsamı kapsamlı olarak incelenmiştir. Mermerlerin kökenlerinin belirlenmesinde modern bilimsel yöntemler, çıplak gözle veya büyüteç kullanılarak yapılan basit incelemelerle geçmişteki geleneksel ampirik tanımlamanın yerini almıştır (Kokkorou–Alevras et al., 1995). Mermerlerin köken belirleme yöntemleri, yaygın olarak farklı mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve fiziksel tekniklerin birlikte kullanılmasıyla yapılmaktadır. Karbonatların duraylı C ve O izotop analizi (Craig and Craig 1972; Herz, 1987) günümüzde eserlerin mermer orijinlerinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan kaynak yöntemlerinden birisidir (Attanasio et al., 2006). $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ verileri genellikle mermerlerin mineralojik petrografik özellikleriyle birleştirilir; polarizan mikroskobu ve X ışını difraktometrisi (XRD) ile elde edilmiştir (Lapuente, 1995; Lazzarini et al., 1999, 2002; Lazzarini and Turi, 1999; Antonelli et al., 2002; Gorgoni et al., 2002; Luke et al., 2006). Özellikle beyaz mermerlerin köken belirlemelerinde etkili bir şekilde ayırt edici olduğu bilinen katodoluminesans (CL) analiz yöntemleri de sıklıkla kullanılmaktadır (Barbin et al., 1992; Herrmann and Barbin, 1993; Barbin, 1999; Lapuente and Blanc, 2002; Mentzos et al., 2002). Ayrıca bir diğer yöntemde Elektron paramagnetik rezonansı (EPR) spektrumlarında baskın olan pikler sayesinde antik anıtların ve eserlerin kökenlerini belirlemek için mermer ocaklarını karakterize etme amacıyla kullanılmaktadır (Maniatis and Mandi, 1992). Bu amaçla, mikroskobik incelemeler, optik mikroskobu, X-ışınları difraktometre ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) araştırmaları neticesinde mermerlerin kimyasal-mineralojik karakterizasyonu belirlenecektir.

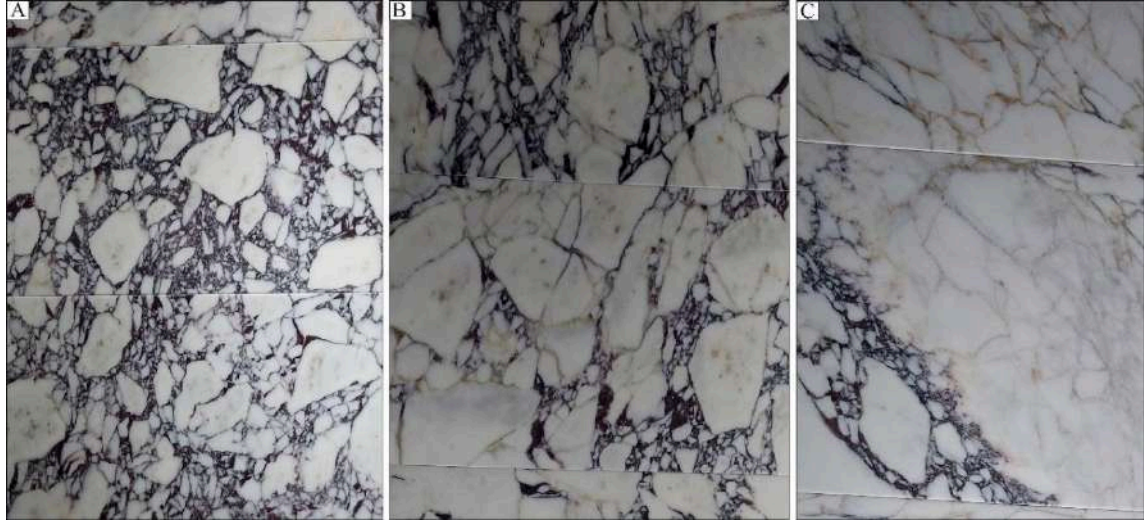
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Afyon Menekşe mermerlerinin jeolojik, mineralojik, petrografik özelliklerinin belirlenmesi için bölgede üretimi yapılan Şenler Mermer ocak işletmesinde basamak ve ocak aynalarında detaylı jeoloji çalışmaları yapılmış ve farklı renk ve doku gösteren menekşe mermerlerinden laboratuvar çalışmalarında kullanılmak üzere toplam 12 adet örnek alınmıştır (Şekil 2). Örneklerin mineralojik ve petrografik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi'nde yer alan (AKÜ-TUAM) Shimadzu XRD-6000 model X-ışını kırınımı (XRD) cihazı ile Jeol-6400 taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. SEM çalışmaları için taze yüzeyli örnekler karbonla kaplanmış ve morfolojik çalışmalar ve mikro kimyasal analizler için incelenmiştir. Polarizan mikroskop çalışmalarında Leica DM 2500P model mikroskop kullanılmıştır. Jeokimyasal incelemelerde Afyon Kocatepe Üniversitesi Doğaltaş Analiz laboratuvarında bulunan (DAL) Rigaku marka XRF cihaz kullanılarak majör oksit analizleri yapılmıştır. İz ve nadir toprak element (NTE) analizleri için Ortadoğu Teknik Üniversitesi MERLAB laboratuvarında Perkin Elmer Optima marka 4300 DVOES model ICP OES cihazında yaptırmıştır. $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ izotop oranı tayini deneyleri Ortadoğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Merlab Laboratuvarlarında bulunan Gas Bench-Continuous

Flow Isotope Ratio Mass Spectrometry (DeltaPlus XP Isotope Ratio Mass Spectrometer-ThermoFinnigan) cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan Afyon menekşe mermer türlerinin genel görünümleri a) Afyon Menekşe (AFV) b) Argento Menekşe (ARG) c) Sugar Menekşe (SV) Mermer Türleri



Şekil 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan Afyon menekşe mermer türlerinin genel görünüşleri a) Afyon Menekşe (AFV) b) Argento Menekşe (ARG) c) Sugar Menekşe (SV)
Mermer Türleri

2.1 İnceleme Alanını Jeolojisi

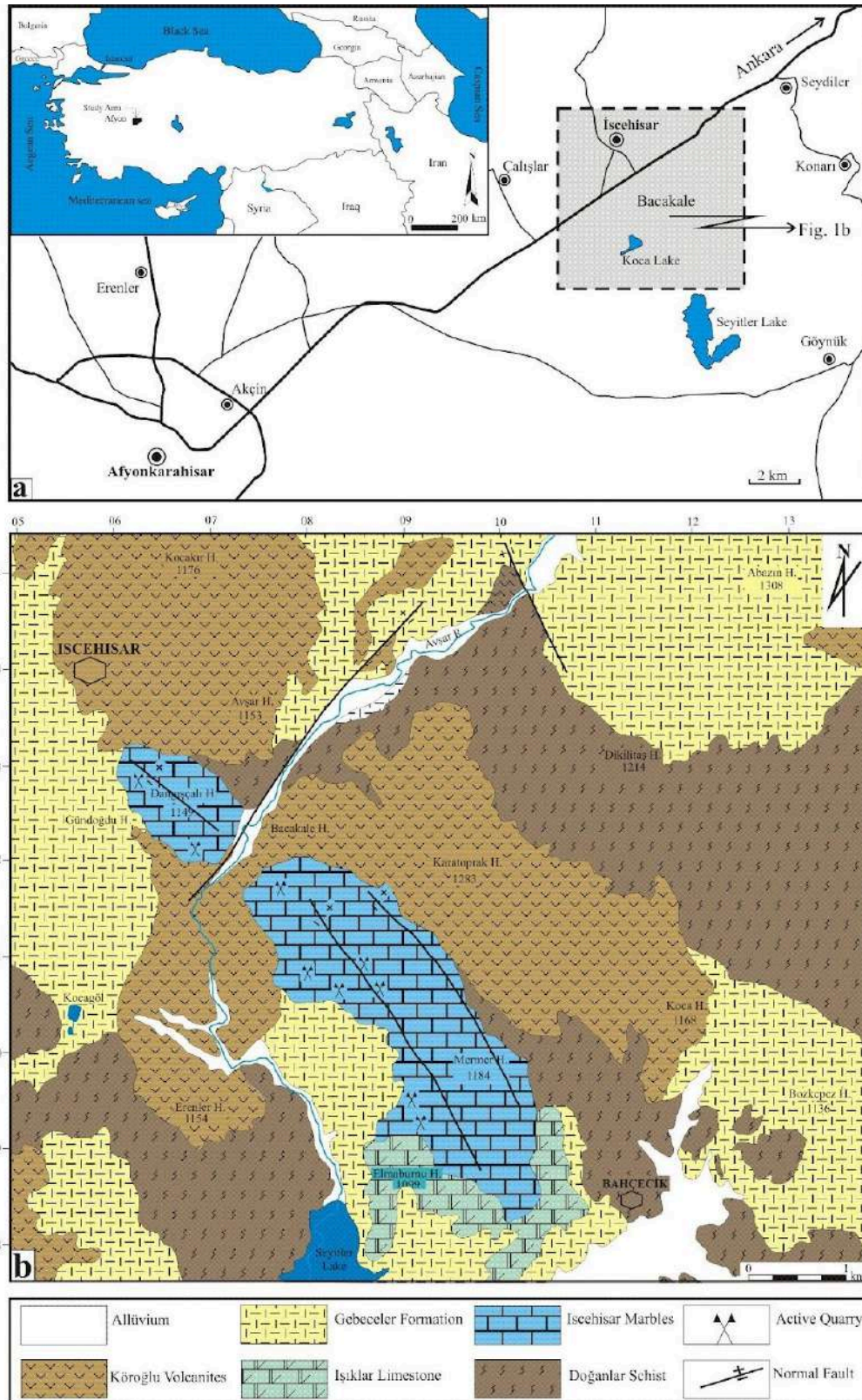
Çalışma alanında en yaşlı Doğanlar şistleridir. İscehisar mermerleri iki mercek halinde Dangışçalı ve Mermer Tepe bölgelerinde yüzlek verir. Işıklar Kireçtaşı birimi çalışma alanının güneyinde Elmacık tepe bölgesinde yüzlek vermektedir. Çalışma alanında yaygın olarak bulunan Gebeceler Formasyonu Neojen yaşlıdır (Metin vd., 1987; Erkan vd., 1996; Kibici vd., 2001; Kuşcu vd., 2001; Bağcı, 2020). Köroğlu Volkanitlerinden bazalt türü volkanik kayalar Karatoprak, Koca, Erenler, Avşar, Şarap, Kocaçakır ve Büyükyokuş tepeleri ve İscehisar ilçe merkezi civarından yüzlek vermektedir. Alüvyon ise Kuvaterner yaşlı olup çalışma alanının en genç birimdir (Şekil 3).

Afyon Mermerleri İscehisar İlçesinin 1km GD'sunda yer almaktadır. Paleozoyik yaşlı mikaşist, fillit, kuvarsit gibi metamorfizmaya uğramış yeşil şist fasiyesindeki kayalar çalışma alanının en yaşlı birimleridir. Mermerler şistler içerisinde iki mercek şeklinde bulunmaktadır. Farklı kalınlıklarda klorit-serizit şist mercekleri mermerler içerisinde görülmektedir. Bacakale olarak isimlendirilen büyük mercek, İscehisar-Bahçecik Köyü arasında 4,5 km² lik, bir alanda yayılım sunmaktadır. Küçük mercek olarak bilinen Dangışçalı merceği ise 0.7 km² lik alan kaplar. Genel olarak mermer biriminin kalınlığı 50-250 m arasında değişmektedir. Mermerler KB-GD doğrultusunda, 30°-50° KD 'ya eğimlidirler. Bölgedeki mermerler farklı renklere sahiptirler. Mermerler beyaz, gri, koyu gri, menekşe gibi renklerde birbirleri ile yanal ve düşey yönde geçiş göstermektedirler.

2.2 Menekşe mermerlerin mineralojik ve petrografik özellikleri

2.2.1 Polarizan mikroskop incelemeleri

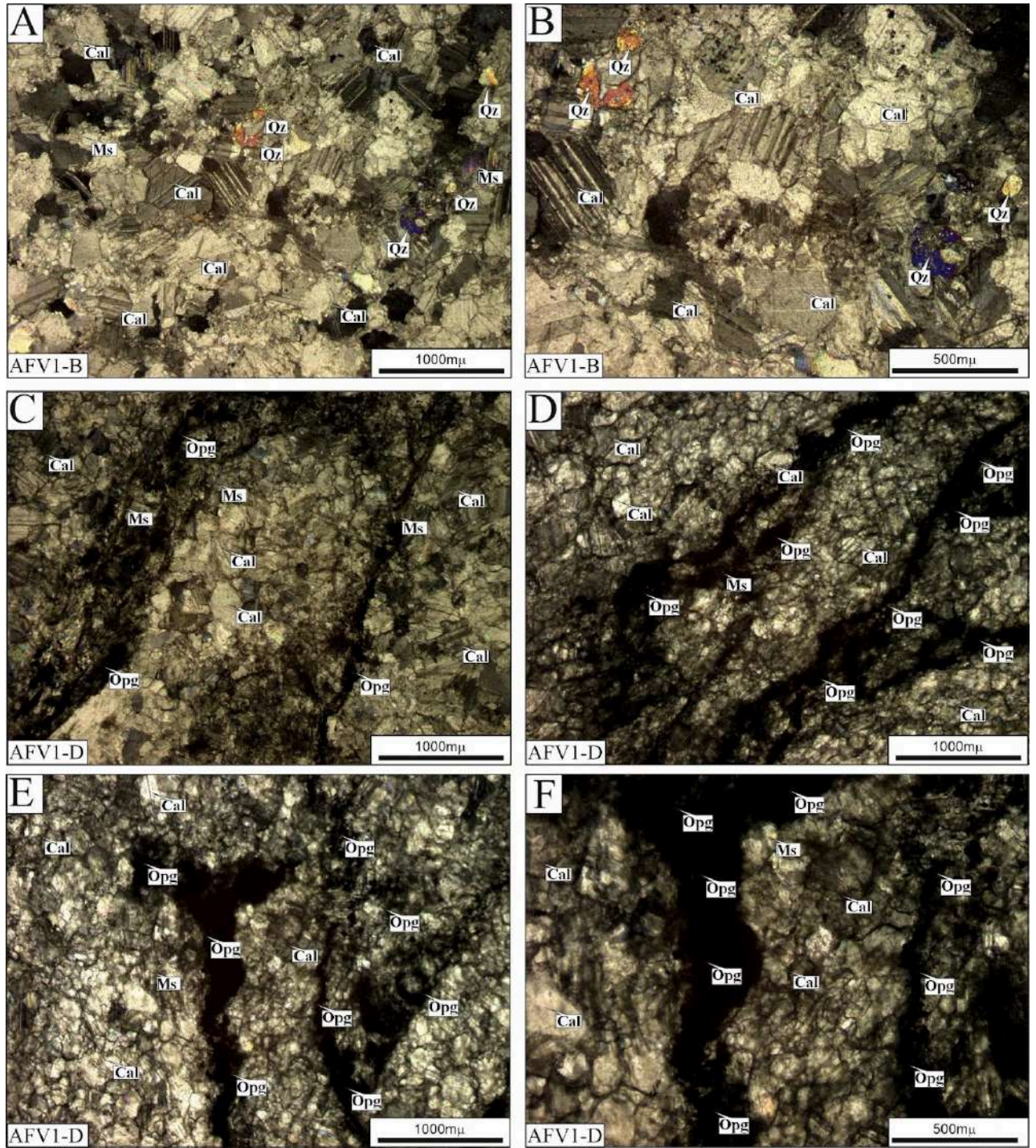
Menekşe renkli mermerlerde renk mor, yeşil, sarı ve kırmızı gibi oldukça fazla renk skalası gösteren mermerlerde breşik yapı ve çok ince damarlı olan kesimleri mevcuttur. Yapılan kapsamlı arazi ve laboratuvar çalışmalarında gözlenen dokusal farklılıklar ve renk değişikliği gibi faktörlere bağlı olarak menekşe mermerleri 3 gruba ayrılmıştır. i) Mor renkli sık breşik yapı gösterenler 1.grup olarak belirlenmiştir (Şekil 4.1a). ii) İnce damarlı, breşik yapı ve breş yapılarının boyutları 1. gruba göre daha büyük görülen mermerlerde gri zemin üzerinde mor renkli damarlar gözlenen bu çeşidi 2. grup olarak belirlenmiştir (Şekil 4.1b). iii) son olarak 3. grup olarak mermerler ise sarı beyaz zemin üzerinde gri ve mor renkli ince damarlar gözlenmektedir.



Şekil 3. İnceleme alanın genelleştirilmiş jeoloji haritası (Metin vd. 1987).

Bu grup mermerlerde gözlenen breşlerin boyutları diğer 2 gruba göre daha büyüktür (Şekil 4.1c). Afyon menekşe mermerinin polarizan mikroskop incelemeleri sonucunda gronoblastik dokulu ve kalsit ve kuvars minerallerinden oluştuğu ve gözlenmiştir. Kalsit minerallerin de polisentetik ikizlenme

gözenmiştir. Tane boyutu ise ortalama yaklaşık 400-500 μm civarında olduğu ve Kun (2000) tane boyutu sınıflamasına göre orta taneli mermerler içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir.



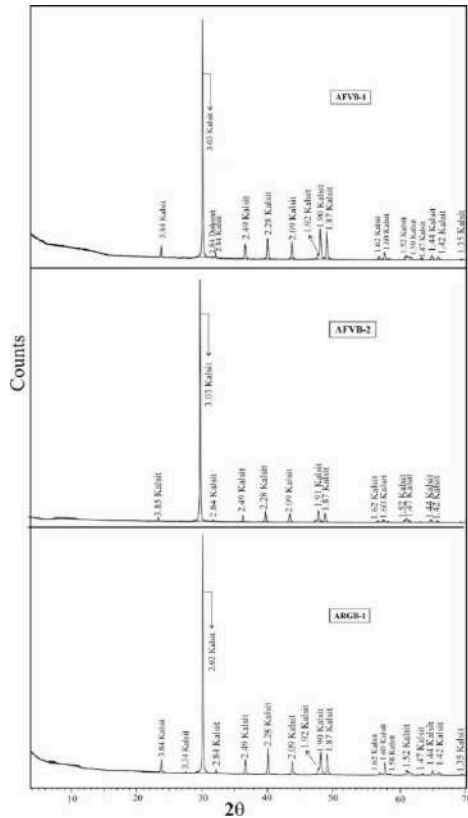
Şekil 4. Afyon menekşe mermerine ait polarizan mikroskop görüntüleri (Cal: Kalsit, Ms: Muskovit, Opg: Opak Mineral, Qz: Kuvars)

2.2.2 XRD analizi incelemeleri

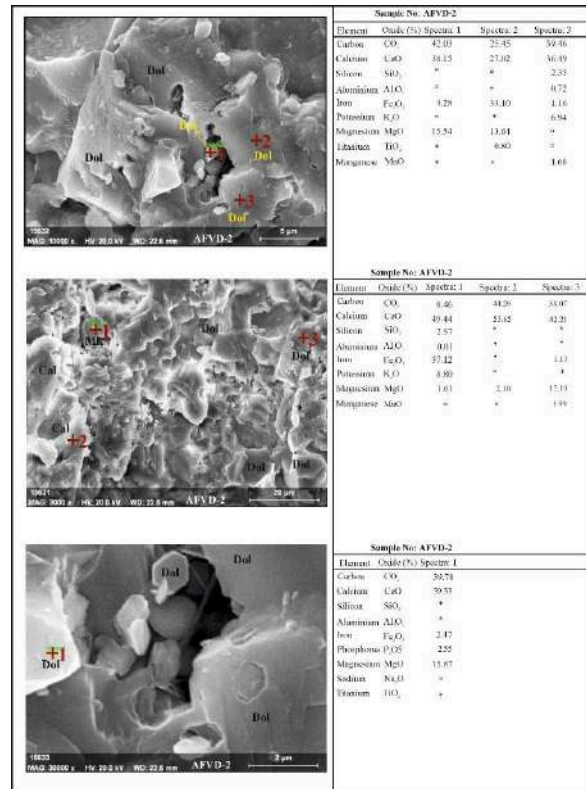
Çalışma kapsamında XRD analiz yöntemi ile mineralojik özelliklerinin incelenmesi için çalışma yapılan menekşe renkli mermerleri temsil edecek şekilde her seri 3'er adet öğütülmüş numune alınmıştır. Öğütülmüş deney numunelerinin Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezin de Shimadzu marka XRD-6000 model XRD cihazıyla 2° ve 70° arasında çekim yapılmıştır. Kalsitik mermerler sınıfında yer alan Afyon menekşe mermerlerinin XRD sonuçlarına göre, kalsit, kuvars ve mika minerallerinin pik verdiği belirlenmiştir (Şekil 5).

2.2.3 Taramalı elektron mikroskop (SEM EDX) analizi incelemeleri

Mermerlere ait önemli iç yapı ve kompozisyon bilgileri taramalı elektron mikroskopu (SEM/EDX) kullanılarak edilebilir (Bugini et al., 2000; Fassina, 1995). Ayrıca, dijital işleme SEM'den elde edilen görüntülerin belirlenmesi gözenek gibi mikro yapının özellikleri (Mossotti et al., 1998; Cardell et al., 2002) ya da yüzey pürüzlülüğü gibi özellikler belirlenmektedir. Menekşe renkli mermerlerde yapılan SEM-EDX incelemelerinde ana mineral olarak kalsit kristalleri belirlenmiş, kalsitlerin genel olarak öz şekilli ve alterasyon emaresi göstermediği görülmüştür (Şekil 6). Yapılan nokta kimyasal analiz taramalarında (EDX) mermerlerin ağırlıklı olarak CaO, Al₂O₃, SiO₂ ve K₂O ve çok az oranda Fe₂O₃ içerdikleri belirlenmiştir. Taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemelerinde spektrum noktalarının belirlenmesi genellikle görülen morfoloji değişimlerin olduğu kesimlerde büyütme değerleri artırılmış ve minerallere ait detay morfolojiler belirlenerek bu noktalara ait EDX çekimleri yapılmıştır.



Şekil 5. Afyon menekşe ve Argento menekşe beyaz zemin renkli mermerlerine ait X ışınımı çekim grafiği



Şekil 6. Afyon damarlı menekşe mermerlerinin SEM/EDX çekimleri

2.3 Jeokimyasal İncelemeler

2.3.1 Ana oksit, iz ve Nadir Toprak Element (NTE) Analiz İncelemeleri

Afyon menekşe mermer örneklerinin tümüne ait ana oksit, iz element ve nadir toprak element (NTE) sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2’ de verilmiştir.

Çizelge 1. Afyon menekşe matriks beyaz mermerlerinin ana oksit analiz sonuçları

	AFVB-1	AFVB-2	ARGB-1	ARGB-2	SVB-1	SVB-2
SiO ₂	0,22	0,27	0,41	0,28	0,43	0,38
TiO ₂	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Al ₂ O ₃	0,12	0,14	0,25	0,16	0,25	0,26
Fe ₂ O ₃	0,05	0,06	0,09	0,06	0,09	0,08
MnO	0,02	0,03	0,06	0,05	0,04	0,03
MgO	0,45	0,41	0,55	0,54	0,54	0,48
CaO	55,27	55,24	54,85	55,05	54,87	55,00
Na ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
K ₂ O	0,02	0,02	0,05	0,03	0,05	0,05
P ₂ O ₅	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01
A.Z.	43,82	43,79	43,67	43,75	43,70	43,69
Toplam	100,00	99,99	99,97	99,96	100,00	100,00
V	1	1	1	5	4	1
Ni	1	3	2	6	4	2
Cu	13	7	10	8	6	7
Zn	7	7	11	9	8	9
Ga	1	1	1	1	1	1
As	10	11	10	12	13	14
Rb	1	1	1	1	1	1
Sr	171	157	182	183	148	138
Y	3	2	5	4	2	3
Zr	16	17	18	18	17	17
Nb	1	1	1	2	2	1
Mo	2	1	2	2	3	2
Ba	1	1	1	1	1	1
Li	0,45	0,24	0,33	0,20	0,31	0,18
U	7,578	0,119	0,104	0,509	0,099	6,685
Th	0,25	0,28	0,48	0,42	0,29	0,35
La	0,05	0,03	0,051	0,001	0,031	0,026
Ce	0,181	0,006	0,34	0,441	0,104	0,149
Pr	0,24	0,158	0,188	0,212	0,244	0,335
Nd	0,51	0,017	0,043	0,026	0,072	0,625
Sm	0,17	0,221	0,121	0,115	0,199	0,081
Eu	0,074	0,076	0,08	0,058	0,069	0,078
Gd	0,017	0,05	0,042	0,069	0,034	0,06
Dy	0,086	0,001	0,004	0,006	0,016	0,006
Ho	0,003	0,019	0,004	0,001	0,032	0,008
Tm	0,001	0,01	0,026	0,013	0	0,024
Yb	0,053	0,052	0,053	0,053	0,052	0,053
Lu	0,038	0,04	0,043	0,034	0,034	0,046
ΣNTE	1,42	0,68	1,00	1,03	0,89	1,49

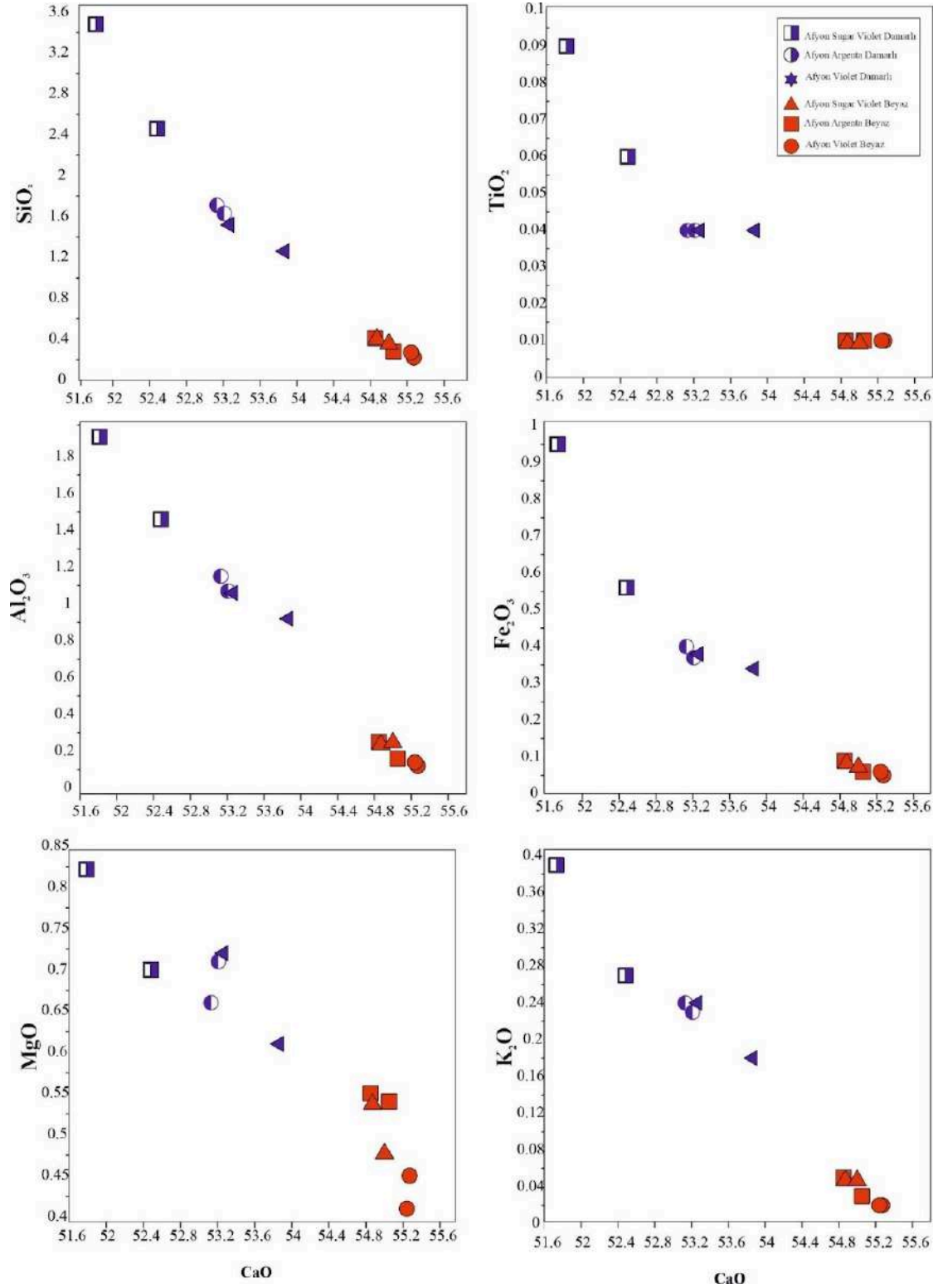
AFVB: Afyon Menekşe Beyaz, AFVD: Afyon Menekşe Damarlı, ARGB: Argento Menekşe Beyaz, ARGD: Argento menekşe Damarlı, SVB: Sugar menekşe beyaz, SVD: Sugar Menekşe Damarlı.

Çizelge 2. Afyon menekşe damarlı mermerlerinin ana oksit analiz sonuçları

	AFVD-1	AFVD-2	ARGD-1	ARGD-2	SVD-1	SVD-2
SiO ₂	1,63	1,71	2,46	3,48	1,52	1,26
TiO ₂	0,04	0,04	0,06	0,09	0,04	0,04
Al ₂ O ₃	1,07	1,15	1,46	1,95	1,06	0,92
Fe ₂ O ₃	0,37	0,40	0,56	0,95	0,38	0,34
MnO	0,06	0,06	0,10	0,13	0,07	0,04
MgO	0,71	0,66	0,70	0,84	0,72	0,61
CaO	53,21	53,13	52,48	51,73	53,24	53,84
Na ₂ O	0,06	0,05	0,07	0,07	0,05	0,07
K ₂ O	0,23	0,24	0,27	0,39	0,24	0,18
P ₂ O ₅	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03
A.Z.	42,53	42,49	41,76	40,29	42,63	42,62
Toplam	99,94	99,95	99,95	99,95	99,97	99,95
V	10	9	5	10	8	8
Ni	13	10	27	60	10	14
Cu	4	4	6	7	7	7
Zn	13	11	20	26	10	12
Ga	2	1	3	4	2	3
As	13	15	16	14	15	14
Rb	4	4	6	11	3	2
Sr	142	138	157	155	143	130
Y	5	4	8	8	5	4
Zr	22	22	25	34	22	23
Nb	2	2	2	3	3	3
Mo	2	1	2	2	3	2
Ba	4	18	31	77	4	1
Li	0,19	0,28	0,20	0,39	0,20	0,36
U	0,066	7,179	5,734	5,251	0,33	0,10
Th	0,08	0,18	0,57	0,23	0,14	0,49
La	0,047	0,043	0,004	0,034	0,035	0,015
Ce	0,041	0,185	0,289	0,171	0,499	0,375
Pr	0,137	0,301	0,208	0,206	0,223	0,331
Nd	0,025	0,508	0,678	0,561	0,075	0,091
Sm	0,107	0,088	0,006	0,154	0,119	0,083
Eu	0,067	0,073	0,072	0,075	0,07	0,075
Gd	0,023	0,035	0,024	0,033	0,065	0,072
Dy	0,016	0,003	0,093	0,004	0,013	0,006
Ho	0,001	0,006	0,005	0,023	0,001	0,025
Tm	0,023	0,037	0,019	0,036	0,038	0,016
Yb	0,053	0,053	0,052	0,054	0,052	0,053
Lu	0,031	0,038	0,044	0,036	0,031	0,047
ΣNTE	0,57	1,37	1,49	1,39	1,22	1,19

Mermer örneklerine ait sonuçlar beyaz renkli breşik örnekler ve damar yapısı belirgin breşik olan örnekler şeklinde 2 grup altına çizelgede verilmiştir. Beyaz renkli örneklerde genellikle CaO değerlerinin %54,87-%55,27 arasında değiştiği, bunun dışında kalan diğer ana oksit değerlerinin %1 'i geçemediği görülmüştür. Bu karşılaştırmaya göre CaO değerlerinin artmasına karşı diğer SiO₂, TiO₂,

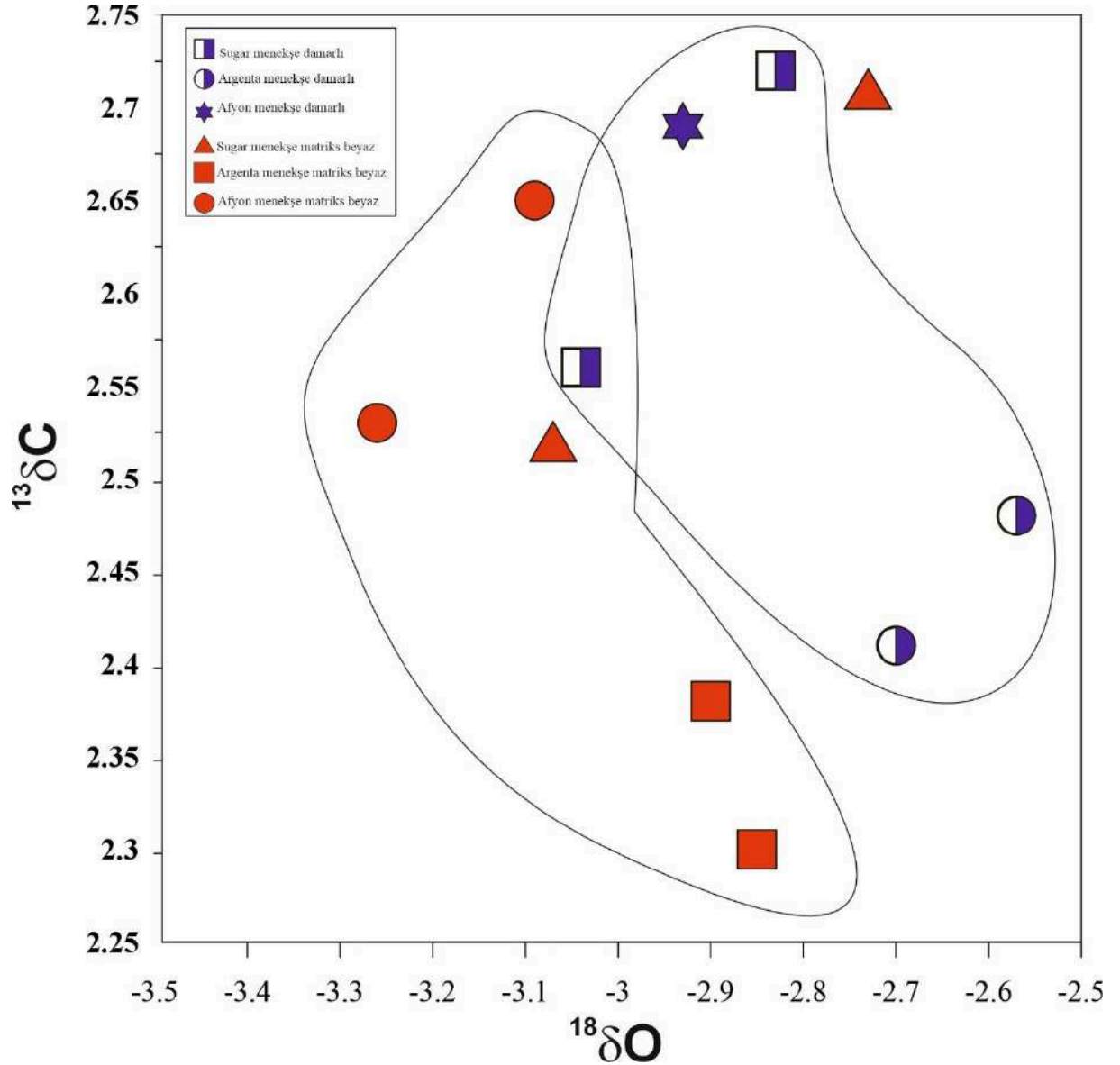
Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO ve K_2O içeriklerinin azaldığı görülmüştür. İz element sonuçlarına göre Sr (ppm) değerinin 138ppm ile 183 ppm değeri ile en yüksek içeriği sahip iz element olmuştur. Afyon menekşe mermerlerin iz element analizleri incelendiğinde sadece Sr elementinde zenginleşme diğer elementlerde azalma olduğu belirlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Afyon menekşe mermerlerinin CaO ' e karşı diğer ana oksit element içeriklerinin karşılaştırmasına ait ikili haker diyagramları

2.3.2 İzotop Analiz İncelemeleri

Petrografik olarak tanımlanan tüm mermerlerin karbon ve oksijen izotop analiz değerleri Şekil 8 'de verilmiştir. Ayrıca standart bir dağılım grafiği diyagramında gösterilmiştir. İncelenen numuneler önemli miktarda oksijen izotop oranları göstermiş ve karbon izotop oranlarındaki değişimlerinin daha sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Menekşe renkli mermerlerde $\delta^{13}\text{C}$ değerlerini % + 2,30 ile % +2,72 arasında değişirken $\delta^{18}\text{O}$ değerleri ise % -2.70 ile % - 3.36 arasında değişim göstermektedir.



Şekil 8. İncelenen Afyon Menekşe mermer örneklerine ait $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ izotop değerlerinin grafiği

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İscehisar Menekşe renkli mermerler, Paleozoyik yaşlı Afyon Metamorfiklerini oluşturan şist, kuvarsit türü kayaların üst seviyelerinde yer alan mermer istifin taban kesimini oluşturmaktadırlar. Mermerler genellikle menekşe, yeşil ve açık sarı renklerde yer yer breşik yapı göstermektedirler. Menekşe mermerlerinde ise ince damarlı olan kesimler görülmektedir. Bu damarlar mermerlere farklı desen ve görünüm kazandırmaktadır. Menekşe mermerlerinde ise renk mor, yeşil, sarı ve kırmızı gibi

oldukça fazla renk skalası gösteren mermerlerde breşik yapı ve çok ince damarlı olan kesimleri mevcuttur. Antik dönemlerde menekşe mermerleri oldukça değerli bir mermer türü olarak görülmüştür. İnce kesitlerinde kalsit ana minerallerinin yanı sıra, dolomit $\pm$ muskovit $\pm$ kuvars mineralleri belirlenmiştir. Yer yer bazı kesimlerinde ayrışma izleri görülmüştür. Mermer bünyesinde yer alan silikat içerikli mineraller ayrışmaya neden olduğu ve bu silikat kökenli minerallerin karbonat mineralleri dokanak sınırları boyunca ayrışmaya etki yaptığı gözlemlenmiştir. Mermerlerin kökenlerinin tanımlanmasında birtakım zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden mermerlerin birbirine benzeyen fiziksel ve kimyasal parametreleri yüzünden zorluk çekilmektedir. Mermerlerin karakteristik özelliklerini ortaya koymada 3 teknikten yararlanılmaktadır. Bunlar, petrografi, Kathodoluminessans (CL) ve C ve O izotop analizleridir $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ değerleri göre inceleme alanındaki mermerler sığ deniz suyu sedimanları görülmektedir. Düşük $\delta^{18}\text{O}$ meteorik sıvıların etkilemesi sonucunda bölge mermerlerinin $\delta^{18}\text{O}$ değerleri de düşük olmaktadır. Metamorfizma süresince sıvı ve minerallerin metamorfik reaksiyonları süresi sonucunda bölge mermerlerinin $\delta^{18}\text{O}$ değerleri düşmektedir. İncelenen numuneler önemli miktarda oksijen izotop oranları göstermiş ve karbon izotop oranlarındaki değişimlerinin daha sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Karbon izotop oranlarındaki değişimlerinin daha sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Menekşe renkli mermerlerde $\delta^{13}\text{C}$ değerlerini $\% + 2,30$ ile $\% + 2,72$ arasında değişirken $\delta^{18}\text{O}$ değerleri ise $\% - 2,70$ ile $\% - 3,36$ arasında değişim göstermektedir.

4. TEŞEKKÜR

Arazi çalışmaları sırasında mermer ocak işletmelerinde çalışmalarımıza izin veren tüm firmalara teşekkür ederiz.

5. KAYNAKLAR

Albustanlıoğlu, T. (2000). Dokimeion Antik Mermer Ocağı ve İhracat Potansiyeli (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Klasik Arkeoloji Ana Bilim Dalı). Ankara.

Antonelli, F., Lazzarini, L., Rasplus, L., Turi, B. (2002). Petrographic and geochemical characterization of cipollino mandolato marble from the French central Pyrenees. In J. Herrmann, N. Herz, & R. Newman (Eds.), ASMOSIA V. Interdisciplinary studies on ancient stone (pp. 77–90). Archetype Publications.

Antonelli, F., Lazzarini, L., Cancelliere, S., Dessandier, D. (2009). Minero-petrographic and geochemical characterisation of “greco scritto” marble from Cap de Garde near Hippo Regius (Annaba, Algeria). *Archaeometry*, 51(3), 351–365.

Attanasio, D., Brilli, M., Ogle, N. (2006). The isotopic signature of classical marbles. *L’erma di Bretschneider*.

Bağcı, M. (2020). Mineralogical, petrographic, and geochemical characterization of colored İscehisar marbles (Afyonkarahisar, W-Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29, 946–975.

Barbin, V. (1999). An unidentified but probably identical origin of several white marble artefacts from the Walters art gallery (Baltimore, USA): evidence from petrographic, cathodoluminescence and stable isotope studies. In M. Schvoerer (Ed.), ASMOSIA IV. *Archéomatériaux: Marbres et autres roches* (pp. 39–43). CRPAA-Presses Universitaires de Bordeaux.

Barbin, V., Ramseier, K., Decrouez, D., Burns, S. J., Chamay, J., Maier, J. L. (1992). Cathodoluminescence of white marbles: an overview. *Archaeometry*, 34, 175–183.

Bugini, R., Laurenzi Tabasso, M., Realini, M. (2000). Rate of formation of black crusts on marble. A case study. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 111–116.

Cardell, C., Yebra, A., & Van Grieken, R. (2002). Applying digital image processing to SEM-EDS and BSE images to determine and quantify porosity and salts with depth in porous media. *Microchimica Acta*, 140(1–2), 9–14.

Craigh, H., Craigh, V. (1972). Greek marbles: determination of provenance by isotopic analysis. *Science*, 176, 401–403.

Erguvanlı, K., Yüzer, E., Güleç, K., Zambak, G. (1972). Türkiye mermerlerinin fiziko-mekanik özellikleri ve mermerlerin sınıflandırılmaları hakkında düşünceler. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 15(2), 131–153.

Erkan, Y., Bayhan, H., Tolluoğlu, A. Ü., Aydar, E. (1996). Afyon yöresi metamorfik ve volkanik kayaların jeolojik, petrografik ve jeokimyasal incelenmesi. *Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu*.

Fassina, V. (1995). New findings on past treatments carried out on stone and marble monuments' surfaces. *Science of the Total Environment*, 167, 185–203.

Gorgoni, C., Lazzarini, L., Pallante, P., Turi, B. (2002). An updated and detailed mineropetrographic and C-O stable isotopic reference database for the main Mediterranean marbles used in antiquity. In J. Herrmann, N. Herz, & R. Newman (Eds.), *ASMOSIA V. Interdisciplinary studies on ancient stone* (pp. 115–131). Archetype Publications.

Herrmann, J. J., Barbin, V. (1993). The exportation of marble from the Aliki quarries on Thasos: cathodoluminescence of samples from Turkey and Italy. *American Journal of Archaeology*, 97, 91–103.

Herz, N. (1987). Carbon and oxygen isotopic ratios: a database for classical Greek and Roman marble. *Archaeometry*, 29, 35–43.

Kibici, Y., Yıldız, A., Bağcı, M. (2001). Afyon kuzeyinin jeolojisi ve mermer potansiyelinin araştırılması. *Türkiye III. Mermer Sempozyumu (Mersem'2001) Bildiriler Kitabı* (ss. 73–84).

Kokkorou-Alevras, G., Mandi, V., Grimanis, A. P., Maniatis, Y. (1995). The traditional archaeological characterisation of marble sculpture and the results of modern scientific techniques. In Y. Maniatis, N. Herz, & Y. Basiakos (Eds.), *ASMOSIA III. The study of marble and other stones used in antiquity* (pp. 95–102). Archetype Publications.

Koralay, T., Bağcı, M., Başaran, C., Özkul, M. (2024). Afyon Marble, Türkiye. *The First 55 IUGS Heritage Stones* (pp. 121–125).

Kun, N. (2000). *Mermer jeolojisi ve teknolojisi kitabı*. Tezer Matbaası.

Kuşçu, M., Bağcı, M., Yıldız, A. (2001). Afyon mermer endüstrisi ve Türkiye mermer sektöründeki konumu. *Türkiye III. Mermer Sempozyumu (Mersem'2001) Bildiriler Kitabı* (pp. 361–368).

Lapiente, M. P. (1995). Mineralogical, petrographical and geochemical characterization of white marbles from Hispania. In Y. Maniatis, N. Herz, & Y. Basiakos (Eds.), *The study of marble and other stones used in antiquity* (pp. 151–160). Archetype Publications.

Lazzarini, L., & Turi, B. (1999). Characterisation and differentiation of the Skyros marbles (Greece) and the Medici's breccias (Italy). In M. Schvoerer (Ed.), *ASMOSIA IV. Archéomatériaux: Marbres et autres roches* (pp. 117–123). CRPAA-Presses Universitaires de Bordeaux.

Lazzarini, L., Pensabene, P., Turi, B. (1999). Isotopic and petrographic characterization of Marmor Lesbium, Island of Lesbos, Greece. In M. Schvoerer (Ed.), *Archéomatériaux: marbres et autres roches: Actes de la IVe Conférence internationale ASMOSIA (Bordeaux-Talence 1995)* (pp. 125–129). Centre de Recherche en Physique Appliquée à l'Archéologie; Presses Universitaires de Bordeaux.

Lazzarini, L., Ponti, G., Preite Martinez, M., Rockwell, P., Turi, B. (2002). Historical, technical, petrographic, and isotopic features of Aphrodisian marbles. In J. J. Herrmann, N. Herz, & R. Newton (Eds.), *ASMOSIA 5: interdisciplinary studies on ancient stone* (pp. 163–168). Archetype Publications Ltd.

Maniatis, Y., & Mandi, V. (1992). Electron paramagnetic resonance signals and effects in marble induced by working. *Journal of Applied Physics*, 71(10), 4859–4867.

Mentzos, A., Barbin, V., & Herrmann, J. J. (2002). Cathodoluminescence and isotopic analysis of Roman and Early Byzantine architectural decoration in the Rotunda Museum, Thessaloniki. In J. Herrmann, N. Herz, & R. Newman (Eds.), *ASMOSIA V. Interdisciplinary studies on ancient stone* (pp. 316–327). Archetype Publications.

Metin, S., Genç, Ş., & Bulut, V. (1987). Afyon ve dolayının jeolojisi (M.T.A. Rapor No: 8103). (Yayınlanmamış). Ankara.

Pekman, A. (Çev.). (1993). Strabon, Antik Anadolu Coğrafyası, *Geographika XII-XIII-XIV*. İstanbul.

AFYONKARAHİSAR KENTSEL SİT ALANDA DOĞALTAŞ KULLANIMINA İLİŞKİN BİR GÖZLEM

AN OBSERVATION ON THE USE OF NATURAL STONE IN THE AFYONKARAHİSAR URBAN SITE

N. Öztank

ÖZ

Mimarlar için malzeme, yapıların tasarım ve yapım aşamalarını doğrudan etkileyen çok önemli bir unsurdur. Pek çok kentte mimari kimlik oluşturma adına bilinçli olarak yerel malzeme kullanımına büyük önem verilmektedir. Yaygın kullanıma sahip yerel malzemelerden biri de doğal taştır. Tarihsel süreçte yapı üretiminde önemli bir rol oynayan taş, yapı malzemesi olarak, bazen strüktür elemanı, bazen örtü malzemesi, bazen de kaplama görevini üstlenmiş ve dünyanın hemen hemen her bölgesinde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu bölgelerden biri Afyonkarahisar, dağların arasında geniş ovaların bulunduğu, merkezinde şehre ismini veren “Karahisar Kalesi”nin yer aldığı bir kenttir. “Karahisar Kalesi”nin eteklerindeki yerleşim alanları, şehrin tarihi kent merkezidir. Bu alanların bazı bölümleri, Kültür Bakanlığı tarafından “Kentsel Sit Alanı” olarak koruma altına alınmıştır. Çalışmada, “Kentsel Sit Alanı”nda bulunan Ulu Cami, Gedik Ahmet Paşa Cami ve Yoncaaltı Cami yapımında kullanılan taş malzemelerin gözleme dayalı olarak tespiti için yapılmış amaçlanmaktadır. Bu anıtsal yapıların seçilme nedenleri, farklı dönem mimari özellikleri göstermeleri, farklı konumlarda yer almaları ve yapı malzemelerinin farklı olmalarıdır. Bu yapılarda şehrin çevresinde çıkan farklı özellikte doğal taş çeşitleri kullanılmış olup, yapıların mimari kimliği üzerinde belirleyicidir. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin, mimari mirasımızda önemli bir yeri olan bu yapıların korunabilmesi için ileride yapılacak planlama ve düzenleme çalışmalarına katkıda bulunabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Afyonkarahisar, doğal taş, Ulu Cami, Gedik Ahmet Paşa Cami, Yoncaaltı Cami

ABSTRACT

For architects, materials are a crucial element that directly influences the design and construction phases of buildings. In many cities, great importance is placed on the conscious use of local materials to create an architectural identity. One of the widely used local materials is natural stone. Throughout history, stone has played a significant role in building construction, serving as a structural element, a covering material, or a cladding, and has been widely used in almost every region of the world. Afyonkarahisar is one of these regions, a city located between mountains with wide plains, and at its center lies the "Karahisar Castle," which gives its name to the city. The settlement areas at the foothills of Karahisar Castle constitute the historical city center. Some sections of these areas have been designated as an "Urban Protected Area" by the Ministry of Culture. The study covers observations of the stone materials used in the construction of the Ulu Mosque, Gedik Ahmet Paşa Mosque and Yoncaaltı Mosque, located within the "Urban Protected Area". The reasons for selecting these buildings are that they exhibit architectural features from different periods, are located in different positions, and use different materials. Various types of natural stone with different characteristics, sourced from the surroundings of the city, have been used in these buildings, playing a decisive role in their architectural identity. It is believed that the data obtained from this study could contribute to future planning and regulation efforts aimed at preserving these buildings, which hold an important place in our architectural heritage.

Keywords: Afyonkarahisar, natural stone, Ulu Mosque, Gedik Ahmet Paşa Mosque, Yoncaaltı Mosque

1. GİRİŞ

Mimarlık, olanakların sunduğu malzeme ile tasarım yapar ve biçimlenmemiş malzemeye anlam katar. Geçmişten günümüze yapı malzemelerinin biçimlendirilmesi, kullanımı ve teknolojik gelişimleri devam etmektedir. Gelişimi devam eden malzemelerden biri de doğaltaştır. Tarihsel süreçte yapı üretiminde önemli bir rol oynayan taş, inşaat malzemesi olarak, bazen strüktür elemanı, bazen örtü malzemesi, bazen de kaplama görevini üstlenmiş ve dünyanın hemen hemen her bölgesinde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Taşın bu denli yaygın kullanılmasının nedeni farklı fonksiyonları karşılamaya uygun fiziko-mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Doğaltaşların oluşumları farklı şekillerde gerçekleştiğinden farklı fiziko-mekanik özellikler gösterirler. Bu farklı özellikler doğaltaşların, mimaride kullanım alanlarını çeşitlendirmiştir. Bu çeşitlendirmeye örnek olması amacıyla çalışma konusu olarak Afyonkarahisar kentsel sit alanda doğaltaş kullanımına ilişkin gözlem yapılmıştır.

Afyonkarahisar, dağların arasında geniş ovaların bulunduğu, merkezinde şehre ismini veren “Karahisar Kalesi”nin yer aldığı bir kenttir. Kent planının oluşmasında kentin coğrafi durumu etkili olmuş, yerleşim öncelikli Karahisar Kalesi olmak üzere dağların eteklerinden ovaya doğru yayılım göstermiştir. Karahisar Kalesi’nin eteklerindeki yerleşim alanları, şehrin tarihi kent merkezidir. Bu alanların bir bölümü, Kültür Bakanlığı tarafından “Kentsel Sit Alanı” olarak koruma altına alınmıştır (Resim 1). Kentsel sit alanında tescilli 44 cami, mescit, türbe, çeşme, han, hamam, bedesten ve özgün nitelikleri nedeniyle korumalarına karar verilmiş, 210 adet sivil mimarlık eseri vardır (Güngör, 1994). Çalışma, kentsel sit alanında bulunan Ulu Cami, Gedik Ahmet Paşa Cami ve Yoncaaltı Cami yapımında kullanılan taş malzemeleri kapsamaktadır. Bu yapıların seçilme nedenleri, farklı dönem mimari özellikleri göstermeleri, farklı konumlarda yer almaları ve kullanılan taş malzemelerin farklılık göstermesidir. İnsanlık tarihi ve medeniyetler hakkında bilgiler aktaran anıtsal mimari eserlerin çoğu mevcudiyetlerini doğaltaşlara borçludurlar. Anadolu topraklarındaki bu eserlerden olan Ulu Cami, Gedik Ahmet Paşa Cami ve Yoncaaltı Cami, taşrada yapılmış Selçuklu ve Osmanlı camilerinin yetkin örnekleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Geçirdikleri birçok afet ve yıkıma rağmen kültürel sürekliliğin bir parçası olarak günümüze kadar gelmeyi başarmış olan camiler, banisi, tarihi ve mimarisiyle önemli ve değerli birer anıt eserlerdir.



Resim 1. Karahisar kalesi ve yakın çevresi ve camilerin yerleri (URL-1)

Ele alınan camiler ilgili, Osmanlı mimarisi ve özelliklerinin anlatıldığı Ayverdi (1972) ve Kuban (2007) eserlerde Gedik Ahmet Paşa Cami ile ilgili bilgiler de bulunmaktadır. Kar vd. (2024) çalışmada taşlardaki bozulma Gedik Ahmet Paşa Cami üzerinden ele alınmıştır. Afyon Ulu Cami’nin Arkeometrik Analizleri (Akyol vd., 2022) çalışmada yapılmıştır. Karazeybek vd. (2005), Afyon Valiliği (2004), Topbaş vd. (2007) eserlerinde kentteki tarihi yapılar ve camilere ait genel bilgiler yer almaktadır.

Diğer çalışmaların çoğunda da aynı kaynaklardan alıntılar yaptıkları, aynı bilgileri tekrar ettikleri dolayısıyla da farklı yazarlar ve kaynaklarda benzer bilgilerin yer aldığı görülmektedir. Ayrıca çalışmalarda, yapılarda kullanılan doğaltaş malzemeler hakkında detaylı bilgi yoktur. Mimarlık ve kent tarihi bağlamında başta Afyon Mermerleri olmak üzere diğer yöre taşlarının tarihsel süreç boyunca önemli yapılarda kullanılması konu edinen akademik çalışmalar yetersizdir. Antik ocakların yer aldığı, mermer şehri Afyonkarahisar'ın tarihi yapılarında kullanılan doğaltaş malzemelere ait bir envanter çalışmanın olmaması böyle bir çalışmanın yapılması gereğini doğurmuştur.

2. ULU CAMİ

Çavuşbaşı Mahallesi Camikebir Caddesi'nde yer alan yapı Selçuklu Afyon Sancak Beyi Nasredüddin Hasan tarafından 1272-1277 yaptırılmıştır (Uyan ve Yüksel, 2004). Doğu kapısındaki kitabeğe göre 1341 yılında onarılan caminin, kibleye dikey dokuz nefli 40 ahşap direk ile oluşturulmuştur (Resim 2). Farklı zamanlarda restore edilen (Karazeybek vd., 2005) cami, şehrin en eski ahşap yapısıdır. Bugünkü mevcut kırma çatı, giriş merdiven ve platformları orijinal olmayıp son onarımlar sırasında yapılmıştır. Camiye; doğu, batı ve kuzey yönlerindeki üç kapıdan girilir. Kapı açıklıklarının etrafında mermer söveler bulunur. Kuzey ve batı kapı üzerindeki söveler düz, doğu kapısındaki kemerlidir. Doğu kapısının bugün kullanılan 6 basamaklı merdiven ve sahanlığın orijinali, masif taşlardan yapılmıştır (VGM arşivi). Kapı üstünde sivri kemerli bir nişin içinde mermer tamir yazıtı vardır (Resim 2).

Caminin dış beden duvarları, horasan harcının kullanıldığı moloz taş örgü tekniğiyle inşa edilmiştir. Duvarlarda ilk dikkati çeken, duvar örgüsünde farklı boyutlarda ve nitelikte taşların kullanılmasıdır. Duvarın stabilitesini artırmak amacıyla köşelerde ve hatılarda kesme taş kullanılmıştır (Resim 3). Duvarın kalınlığı 110-100 cm arasında değişmektedir.



Resim 2. Caminin Kuzey ve Doğu kapıları



Resim 3. Cami beden duvarlarında doğaltaş kullanımı

Beden duvarlarındaki, farklı ölçü ve formlarda pencerelerin kenarları ve kemerleri kesme taştan yapılmıştır. Cephede çatı saçakları altında taş çörten ve harpuştalar bulunmaktadır. Son yapılan restorasyonda harpuştalar saçak altına alınmıştır (Resim 4).



Resim 4. Pencere kenarları, çörten ve harpuştalarda taş kullanımı

Caminin tek şerefeli minaresi kuzeybatı köşede yer almaktadır. Minare kaidesi belirli bir yüksekliğe kadar kesme taş, sonrasında almaşık sistem olup gövde Selçuklu camilerinde görülen sırlı tuğladır. Şerefe korkulukları, döşemesi ve külahta taş kullanılmıştır. Ancak şerefedeki taşlar orijinal değildir (Resim 5). Ulu Cami ve minare kaidesinin duvar örgülerini oluşturan taşlar çoğunlukla andezit taş türüdür. Ayrıca dış duvar örgüsünde bazalt, tüf, kireçtaşı ve mermer gibi başka türde taşlar da gözlenmiştir. Cephe duvarlarında kullanılmış mermerler ise devşirme özelliği taşıyan taşlar Afyon çevresindeki mermer yataklarından temin edilmiş olabilir (Resim 6).



Resim 5. Minarede taş kullanım detayı



Resim 6. Camide beden duvarında kullanılan taş türleri (URL 2)

Caminin iç kısmında doğaltaş kullanımı sadece mihrap ve ahşap direklerin kaidelerindedir. Silindirik formu direk taşı (granit, mermer) kaidelere oturmaktadır (Resim 7). Dikdörtgen formu mihrap, mukarnas ve enli silmelerle tasarlanmıştır. Mihrabın tamamında Afyon Beyaz Mermeri kullanılmıştır (Resim 8).



Resim 7. Ahşap direklerin doğaltaş tabanları



Resim 8. Mihrapta mermer kullanımı
(URL 2)

3. GEDİK AHMET PAŞA CAMİ

Yapı, şehirdeki Osmanlı mimarisinin en etkileyici anıtlarından biridir. Yapının Osmanlı mimarisindeki önemi, alışılmadık görünümüne katkı sağlayan doğaltaş malzeme ve sırlı çinilerle süslenmiş burmalı minaresinden kaynaklanmaktadır. Cami, Gedik Ahmed Paşa'nın emriyle mimar Ayaz Ağa tarafından külliye'nin bir parçası olarak inşa edilmiştir (Karazeybek vd., 2005). 1472 yılında inşa edilen cami, günümüze kadar çeşitli onarım ve güçlendirme müdahalelerinden geçmiştir. 'Tabhaneli' olarak inşa edilen caminin harimi, kuzey-güney doğrultusunda uzanan T-planlı bir yapıdır. Harimi çevreleyen dört tabhane odası ve bunların arasında eyvan bulunmaktadır. Kuzeyde yer alan giriş revağı doğu-batı doğrultusunda dikdörtgen planlı ve zeminden 50 cm yukarıdadır. Giriş revağı, her biri kubbe ile örtülmüş beş eşit kareden oluşmaktadır. Orta birimdeki kubbe, taçkapı-mihrap eksenini vurgulamak için yükseltilmiş ve çapı diğer kubbelerden daha küçük tasarlanmıştır (Resim 9).



Resim 9. Giriş revağı ve tabhane ve eyvanın bulunduğu doğu cephesinden görünüm

Caminin beden duvarları kaba taş, tuğla ve harç ile inşa edilmiş olup üzeri kesme taş ile kaplanmıştır. 1939-1946 yılları arasında yapılan kapsamlı restorasyon çalışmalarında kesme taş kaplamalar tamamen yenilenerek orijinaline uygun İhsaniye (Ayazini, Döğer) bölgesi tüfleri kullanılmıştır. Giriş revağının kubbeleri geçici olarak desteklenmiş ve tüm kemerler, sütun kaideleri, sütunlar ve sütun başlıkları sökülmüştür. Hasar gören sütunların yerine, Dokimeion mermerinden yapılmış yekepare sütunlar kullanılmıştır (VGM arşivi) (Resim 10).



Resim 11. 1940 yıllarında yapılan restorasyon çalışmalarından görüntüler (Uyan ve Yüksel, 2004)

Yapının en önemli elemanı taş kapıda, Afyon Kaplanpostu, Afyon Beyaz, gri ve menekşe mermerleri kullanılmıştır. Giriş açıklığının üzerindeki kemer gri ve kırmızı mermerden geçme tekniği ile yapılmıştır. Kemerin üzerinde mukarnas bulunur. Portalın her iki yanındaki nişler, yarım sekizgen planlı olup üst kısımları mukarnaslarla süslenmiştir. Portalın köşelerine, alt ve üst kısımlarında kum saati motifi olan kolonçeler yerleştirilmiştir (Resim 12).

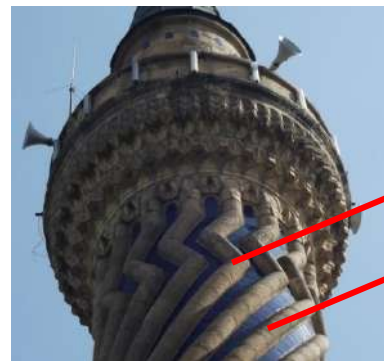


Resim 12. Taş kapı /portalı ve niş detayı



Resim 13. Pencere detayı; dış ve içten görünüm

Cami alt pencereleri etrafında masif mermer söve ve kaplama taşından çerçeve bulunmaktadır. Çerçevenin üst köşelerine iki kabartma rozet yerleştirilmiştir. Üst pencereler ise sivri kemerli ve duvar kaplaması taşı ile aynı taştan sövelidir (Resim 13). Kuzey-batı köşesindeki dairesel taş minarenin kare tabanı, camii duvarlarıyla bütünleşik olarak inşa edilmiş ve tamamen kesme taşla yapılmıştır. Minarenin Bursa kemerli kapısında Afyon Kaplanpostu ve Afyon Menekşe mermeri kullanılmıştır. Papuç, yivli silindirik gövde, şerefe Ayazini taşı ile kaplıdır (Resim 14).



Resim 14. Minare detayı

Cami iç mekanında taş işçiliği, mermer mihrap ve minberde gözlenmiştir. Mihrap, Afyon Beyaz ve Kaplanpostu Mermerleri ile almalı sıralı yapılmıştır. Yarım sekizgen planlı mihrap nişi, mukarnaslı bir kavsaraya sahiptir. Nişin köşeleri, sütunçeler, kum saati ve çiçek motifleriyle süslenmiştir (Resim 15). Sütunçeler, Afyon Menekşe mermerinden yapılmıştır. Mihrabın üzerinde bir sarkıt nişi ve yazılı bir panel bulunmaktadır. Mihraba göre daha sade tasarıma sahip minberde Afyon Beyaz Mermeri kullanılmıştır. Sivri kemerli minber kapı sövelerin dış köşeleri pahlanmış, kum saatleriyle kuşatılmıştır. Kapı üzerinde dikdörtgen mermer levha içinde kabartma yazılmış Kelime-i Tevhid bulunmaktadır. Minberin üçgen yan yüzeyleri, birbirine geçmiş yıldız desenleriyle süslenmiştir. Beyaz mermerden minber merdivenleri köşke ulaşır. Köşk, gri mermer sütunlar ve beyaz mermer korkuluklarla oluşturulmuş, prizmatik bir koni ile sonlandırılmıştır (Resim 15)



Resim 15. Mihrap ve minber mermer işçiliğinden detaylar

4. YONCAALTI CAMİ VE MEDRESESİ

Son derece zarif bir yapı tarzına sahip olan Yoncaaltı Cami ve Medresesi Fakıpaşa Mahallesi, Tuz Pazarı Caddesinde bulunmaktadır. Yapı ilk olarak, 1840 yılında Süleymanoğlu Hacı Ahmet Ağa tarafından iki katlı olarak inşa edilmiştir. Vakfıyesi 11 Eylül 1840 tarihli (VGMA-1). 1909 yılında kentte meydana gelen büyük yangında harap olan yapı, aslına uygun yeniden inşa edilmiştir. Zemin kat buğday loncası (Karazeybek vd., 2005), üst kat cami ve medrese olarak planlanan yapı Fevkani cami örneklerine benzemektedir. Barok cephe düzenlemeleri, zarif minaresi ve Geç Dönem Osmanlı mimari özellikleriyle diğer iki camiden farklıdır. Yoncaaltı Cami'nde zamana bağlı yıpranmaların giderilmesi amacıyla çeşitli tarihlerde onarımlar gerçekleştirilmiştir (VGMA).

Plan düzleminde giriş, medrese, son cemaat mekanı ve cami tek yapı olarak görülmektedir. Cami ve medresenin ortak giriş terasına çift kollu, 23 taş basamaklı merdivenler ulaşılır. Merdivenler ve sahanlıkta pembe andezit kullanılmıştır. Sahanlığa açılan ana kapı ile medrese ve caminin ortak giriş holüne geçilir. Bu kapı ve her iki yanındaki pencerelerin söve ve basık kemerleri kesme taştan yapılmıştır (Resim 16).



Resim 16. Yapının giriş cephesinde bulunan çift kollu merdivenler ve ana giriş kapısı

Son cemaat mekanından harime geçişi sağlayan basık kemerli kapı ve kapının iki yanındaki pencere sövelerinde, kesme taş (20x20cm kesitli) kullanılmıştır. Söve kilit taşlarında akant süsleme, denizliklerde “S” kıvrımlar gözlenmiştir (Resim 17).



Resim 17. Son cemaat mekanı güney duvarı-Harim kapı detayı

Harimde taş kullanımı mihrapta gözlenmiştir. Yarım daire planlı mihrap nişi, kalın beden duvarının içine gömülü olarak yapılmıştır. Mihraptaki ana süslemeler; kesme taştan geniş silmeler, akant yaprakları ve “S-C” kıvrımlarının farklı formlardaki tipleri ile hareketlendirilmiş alınlıktır. Silme taşlarının üzerine geometrik çizgisel motifler yapılmıştır. Mihrapta kullanılan taş pembe andezittir. Mihrap nişi, kesme taş söve, kemer ve yuvarlak kemerli üst pencere ile cephede vurgulanmıştır (Resim 18).



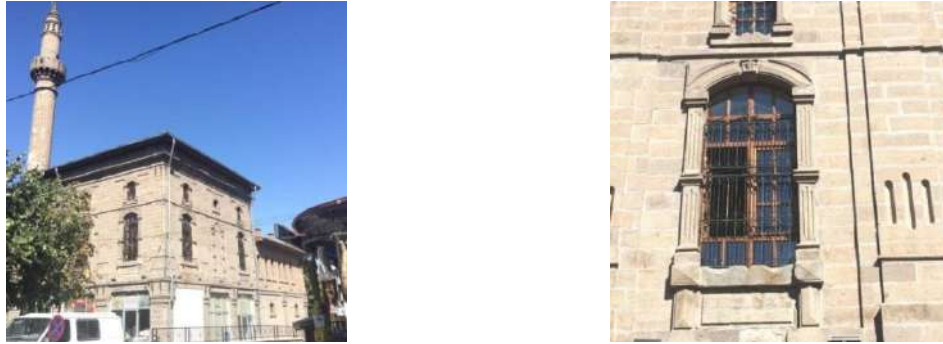
Resim 18: Mihrap detayı; harim ve cepheden görünüm

Son cemaat mekanı güneybatı köşesindeki minare kare kaideli, silindirik gövdeli ve tek şerefeli olarak kesme taştan (pembe andezit) yapılmıştır. Minarenin kapı söve ve kemerinde ve merdivenlerde aynı taş (Resim 19) kullanılmıştır. Gövde taşları üzerine dikine yivler oyulmuştur. Gövdeden şerefeye geçişte taş bilezik yapılmıştır. Taş payandalarla genişletilen şerefenin korkulukları da ince taş plakaların yan yana getirilmesiyle yapılmıştır. Petek üzerindeki külahın başlangıcında dişler ve üzerinde bitkisel motifli bilezikler yer alır.



Resim 19. Minarede taş kullanım detayı

Caminin güney ve batı cephesinin tamamı düzgün kesme taş ile kaplıdır. Üçlü pencere düzenleri, silme kuşakları, kompozit başlıklı ve profilli sütunlar ile plasterler, silme kuşakları, topuz çatının saçakları ve yuvarlak kemerli mihrap üstü penceresi taş işçiliğinin vurgulandığı elemanlardır. Barok süsleme kompozisyonlarından iki adet sırt sırta vermiş "S kıvrımı" denizliklerin ortasına yerleştirilmiştir (Resim 20).



Resim 20. Yoncaaltı Cami güneybatı görünüşü ve pencere detayı

5. SONUÇ DEĞERLENDİRME

Anadolu topraklarında yapılmış Selçuklu ve Osmanlı camilerinin yetkin örnekleri olarak karşımıza çıkan Ulu Cami, Gedik Ahmet Paşa Cami ve Yoncaaltı Cami, geçirdikleri birçok afet ve yıkıma rağmen kültürel sürekliliğin bir parçası olarak günümüze kadar gelmeyi başarmışlardır. Camiler, banisi, tarihi ve mimarisiyle önemli ve değerli birer anıt eserlerdir. Yapımlarında bulunduğu yörenin kültürel mirasa sahip doğaltaşları (Ayazini Tüfü, Afyon Beyaz, Kaplanpostu Afyon Menekşe, vb.) kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan gözlemler sonunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Ulu Cami beden duvarları örgüsünde, pencere kenarlarında, minarede ağırlıklı olarak magmatik kökenli taşlar kullanılmıştır. Beden duvarlarında ayrıca az sayıda devşirme olabilecek metamorfik kökenli taşlar gözlenmiştir. Kapı söveleri ve mihrap beyaz mermerden yapılmıştır.
2. Gedik Ahmet Paşa Cami cephe kaplama taşlarında ve minare yapımında İhsaniye (Ayazini, Döğeri) bölgesi tüfleri kullanılmıştır. Son cemaat yeri revağının sütun, kaide ve başlıklar, kemerler, taş kapı, alt pencere söveleri, mihrap ve minberde İncehisar Bölgesi Mermerleri gözlenmiştir.
3. Yoncaaltı Cami'nin kesme taş kaplamalarında, taşıyıcı ayaklarda ve mihrapta açık pembe renkli andezit kullanılmıştır. Zemin kat dış duvar moloz örgüsünde ağırlıklı olarak volkanik kökenli taşlar ile az sayıda mermer gözlenmiştir. Yapının genelinde kullanılan yerel taşlar, siyaha yakın gri ve açık pembe renkte trakit ve andezit taşlardır.
4. Ulu cami ve Yoncaaltı cami de kullanılan taşlarda benzerlik gözlenmiştir.

5. Yapılarda kullanılan volkanik kökenli taşlar çok yakın mesafede bulunan şehir içindeki dağ ve kayalıklardan (Afyon Kalesi, Sarıkız Tepesi, Bademlik Tepesi) temine edilmiş olabilir.

Çizelge 1. Tarihi yapılar ve içerdikleri mermer türleri

	ULU CAMİ	GEDİK AHMET PAŞA CAMİ	YONCAALTI CAMİ
Beden Duvarı	Volkanik kökenli taşlar, mermer	Kaplama nedeni ile gözlenmemiştir.	Volkanik kökenli taşlar, mermer, tuğla
Duvar Kaplaması	----	İhsaniye bölgesi tüfleri	Açık pembe renkli andezit
Son Cemaat Yeri	-----	Kaplanpostu, Afyon Menekşe, Afyon Beyaz,	-----
Merdiven Minare	Volkanik kökenli taşlar, tuğla	İhsaniye bölgesi tüfleri ve çini	Açık pembe renkli andezit
Kapı Pencere Söveleri	Beyaz mermer	Kaplanpostu,	
Mihrap	Afyon Beyaz	Kaplanpostu,	
Minber	Ahşap	Afyon Menekşe,	Ahşap
Tac Kapı	-----	Afyon Beyaz,	-----

Çalışma sahada yapılan gözlemlerden elde edilmiştir. Bu verilerin ileride yapılacak planlama ve düzenleme çalışmalarına ön katkıda bulunabilir. Daha sonraki çalışmalarda binalarda kullanılan taşların, kimyasal ve fiziksel analizleri ile köken araştırmaları yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

Akyol, A., Kadioğlu, Y. K., Derakhshan Houreh, N. (2022). Afyon Ulu Cami arkeometrik analizleri. Sanat ve Tasarım Dergisi, 2022(Haziran), 37–65.

Ayverdi, E. H. (1973). Osmanlı mimarisi'nde Fatih devri (1451-1481) III. Baha Matbaası.

Google Earth. Afyon Ulu Cami Konumu

<https://www.youtube.com/watch?v=KsZ6tROaVOQ>. Erişim tarihi: 10 Temmuz 2025,

https://earth.google.com/web/@38.75506863,30.53539494,1033.06033346a,902.66940746d,35y,12.0017138h,2.99998612t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASg0I_ARAA?authuser=0

Güngör, E. (1994). Afyon koruma amaçlı imar planı. Beldemiz Dergisi, 36, 20–22.

İlgar, Y., Karazeybek, M. (2001). Afyonkarahisar'da cami ve mescitler. Afyonkarahisar Kütüğü (Cilt I, ss. 295–341). Afyon Kocatepe Üniversitesi Yayın No: 35.

Kar, B. Ç., Dereli, M., Yıldız, E. (2024). Deterioration in monumental stone structures: The example of Afyonkarahisar Gedik Ahmet Pasha (Imaret) Mosque. PLANARCH-Design and Planning Research, 8(1), 113–126. <https://doi.org/10.54864/planarch.1456579>

Karazeybek, M., Polat, Z., İlgar, Y. (2005). Afyonkarahisar vakıf eserleri (Cilt I, ss. 241–247). Afyon Kocatepe Üniversitesi Yayını, No. 60.

Kuban, D. (2007). Osmanlı mimarisi. YEM Yayınevi.

Kültür ve Turizm Bakanlığı. Afyon Ulu Cami <https://www.youtube.com/watch?v=-s7TCuCpB5c>.
<https://afyon.ktb.gov.tr/Resim/255341,ulu-cami-mjpg.png?0>

Uyan, M., & Yüksel, İ. (2004). Anadolu'nun kilidi Afyon. Afyon Valiliği, Yayın No: 21.

Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi (VGMA). Ankara, Türkiye.

Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi (VGMA-1). Defter, nr. 581/1, s. 35, no 35. Ankara, Türkiye.

Vakıflar Kütahya Bölge Müdürlüğü Arşivi. Kütahya, Türkiye.

NEW MARBLE APPLICATIONS

K. V. Rastogi

President, Stone Technology Centre, Jaipur, India

Mobile: +91-9829015232, vrjaipur47@gmail.com

ABSTRACT

Marble has been used since time immemorial in temples, mosques, monuments and household and commercial buildings. Turkey, China, Italy, Greece and India are major producers and exporters of a variety of marble in different colours and finishes. Just like fashion in dressing changes every year, use of marble also changes. Based on different parameters, some recommendations for selection of marble are made for architects, interior designers, builders and house owners. Marble is taking centre stage in both architecture and interior design, with innovative applications and trends that marry timeless elegance with contemporary style.

BIOPHILIC DESIGN



Figure 1. Tinos Green marble

It is based on the idea that humans have an innate connection to nature, and incorporating natural elements into our built environment can have significant positive impacts on our well-being. Marble, with its organic patterns and natural origins, plays a pivotal role in this trend, offering both aesthetic appeal and a tangible connection to nature. As a natural material, it fits perfectly into this design philosophy, bringing the beauty of the natural world into interior spaces. Designers use marble to create serene, nature-inspired environments that promote well-being and tranquillity. Green marbles, infused with various shades of nature's palette, bring the tranquillity of the outdoors into your living space. Tinos Green is an indicative captivating choice, which adds a touch of organic luxury and creates a harmonious connection between the indoors and the natural world. Forest Green, Forest Gold and Forest Brown represent trees and are very popular.

BOOK-MATCHED MARBLE DESİGNS



Figure 2. Dione Spider bookmatched kitchen application

The book-matched marble trend is a testament to the enduring allure of this timeless material. This technique, where two adjacent marble slabs are mirrored to create a striking, seamless pattern, is being used in high-end residential and commercial projects to make bold, artistic designs. By carefully selecting and arranging slabs with mirrored veining patterns, designers achieve a truly unique and breath-taking aesthetic. Book-matching creates a dramatic, symmetrical look that transforms kitchen or bathroom walls into natural works of art. Marbles with intricate veining patterns, such as Calacatta Gold, Statuario, and Arabescato, tend to produce the most striking results.

COLOURED MARBLE



Figure 3. Thassos Pink Martini wall-cladding application

While classic white and black marbles will always be used, there is a demand for more unusual colours like deep greens, vibrant blues, yellow gold and even subtle pinks and yellows. The trend of coloured marbles reflects a growing desire for spaces that are not only beautiful but also expressive of individual personality and a connection to the natural world. Blue and Turquoise colours evoke feelings

of tranquillity and serenity, mirroring the calming effect of the ocean. Interior designers experiment with colour combinations to create large-scale floor installations, dramatic countertops, or sculptural furniture. They use green marbles with warm wood tones, blue marbles with white and silver accents, or pink marbles with gold for a touch of glamour. Proper lighting is crucial to showcasing the beauty of coloured marbles.

DARK MARBLE



Figure 4. Damasta fireplace application

Black marbles, like Nero Marquina, Black Forest, and Black Indian marble command attention with their captivating presence. A modern fireplace adorned with sleek black marble, or a high-end restaurant featuring dramatic black marble table tops, each accented with striking gold or silver veins looks beautiful. Dark marble creates an ode to timeless elegance, perfect for those who wish to leave a lasting impression. Featuring rich, dark tones and dramatic veining, these marbles evoke a sense of timeless elegance and mystery. While dark marble offers a bold aesthetic, it's essential to balance it with other design elements to prevent spaces from feeling too heavy. Integrating adequate lighting and contrasting materials can create a harmonious and inviting environment.

DRAMATIC VEINING AND PATTERNS



Figure 5. Karibib Fantasy bathroom application

Dramatic veining in marble is highly sought after for its ability to create visually stunning. There is a surge in bold, dramatic veining and intricate patterns like waves, circles, and asymmetrical formations. These striking designs add a sense of movement and drama to any space, making them perfect for kitchen countertops, bathroom vanities, and feature walls. The rare and exotic marble varieties with unique veining patterns may also gain popularity as designers seek to differentiate their projects.

FINISHES-MATTE AND TEXTURED



Figure 6. Fluted finish of Pelagonia

The texture of marble is equally important. While polished stones have always been a favourite, matte and textured finishes are gaining massive popularity. Embracing matte and textured marble finishes allows designers and homeowners to create spaces that are both elegant and practical. These finishes provide a modern, understated look that creates a soft yet sophisticated vibe. Matte finishes are suitable for high-traffic areas like kitchens and bathrooms, as they are less prone to showing fingerprints and smudges. Travertine is also a prime example. Textured surfaces like leathered or honed finishes are perfect for both indoor and outdoor spaces. From the smooth elegance of Polished and Honed surfaces to the textured sophistication of Brushed, Bush Hammered, and Sand Blasted finishes, the craftsmanship ensures beauty and durability. Distinctive finishes-Fluted, Ribbed, Bamboo, and Fence, enhance spaces with unique character and depth.

GOLDEN VEINS



Figure 7. Thassos Crystal Fantasy

There is a resurgence of golden-veined marble. The rise of golden-veined marble aligns with broader interior design trends favouring warm tones and natural materials. Golden veins in marble create a striking contrast against neutral backgrounds, such as white, black, or grey, resulting in eye-catching patterns that enhance the visual interest of any space. Calacatta Gold and Statuario, elevate the design narrative with their exquisite veins of gold, adding a touch of richness and sophistication. All these marbles are ideal for bathroom countertops, kitchen islands, and hotel lobbies, where their luxurious presence creates a lasting impression.

METALS AND MARBLE



Figure 8. Pairing marble with stainless steel

Marble paired with metals is a new trend. Marble's versatility shines when combined with contrasting materials such as wood, metal, and glass. The combination of marble's timeless elegance with the sleek, modern look of metals like copper, and stainless steel creates a natural balance between classic and contemporary elements. This trend is particularly popular in kitchen and bathroom designs, where marble surfaces are complemented by metal fixtures and accessories. This fusion creates dynamic interiors that blend warmth, elegance, and modernity.

NEUTRALS AND SOFT TONES



Figure 9. Ajax Classic flooring application

Marble reflects this aesthetic with a surge in the popularity of neutral and soft tones. A shift from classic whites and greys to earthy hues like beige and soft browns is underway. Beige, cream, light grey, and ivory marbles offer a timeless appeal, ideal for creating spacious and elegant environments. Travertine Beige, and Pelagonia are prime examples, perfectly suited for minimalist bathroom designs, kitchen countertops, and wall coverings. These light-toned marbles breathe new life into smaller spaces, fostering a welcoming atmosphere.

SCULPTURAL MARBLE FURNITURE



Figure 10.Dione Nuvolato table application

Marble transcends its traditional role and transforms into functional works of art. Designers are increasingly drawn to marble for its durability, natural beauty, and versatility. The possibilities are endless, and marble becomes a canvas for artistic expression. The material's unique veining and array of colours make each piece distinct, allowing for the creation of furniture that doubles as a centrepiece in any room. The marble furniture is no longer limited to countertops and floors. From marble coffee tables with unique shapes to dining tables with geometric bases, these pieces bring sophistication and a unique visual focal point to living rooms, dining rooms, and offices. They present luxury, elegance, and style. As architects and designers continue to embrace marble's versatility, sculptural furniture will remain an integral part of modern interior design. Marble furniture is becoming very popular and this trend is developing fast.

SUSTAINABLE AND RECLAIMED MARBLE

Architects and interior designers are increasingly embracing sustainability, with reclaimed marble at the forefront. This trend reflects a commitment to eco-friendly practices and the desire to incorporate materials that offer both aesthetic appeal and environmental benefits. Homeowners and designers are opting for eco-friendly options by sourcing marble that has been reclaimed. This trend not only gives marble a second life but also reduces environmental impact, aligning with conscious living values. It also reduces the need for new quarrying and minimizes waste. Innovations in marble alternatives, such as engineered stone or recycled materials that mimic dramatic veining, have also become popular.



Figure 11. Scrap marble recovery

Translucent Marble



Figure 12. Translucent marble bar

The use of translucent marble is in vogue now. These stones possess natural translucency, making them ideal for dramatic backlit installations. When illuminated, they radiate a soft, ethereal glow, creating a sense of luxury and warmth. Translucent marbles are being used in bar counters, feature walls,

and artistic lighting designs. Their ability to diffuse light makes them perfect for high-end residential and hospitality spaces, transforming interiors into focal points.

Quarries in different countries produce marble in different colours, hues, tones, patterns and finishes. While these parameters help designers choose a particular variety of marble, they must also examine the physic-mechanical properties of marble with respect to different applications. This function can best be performed by a stone technologist.

The above recommendations are just guidelines for the benefit of one and all.

DOĞALTAŞ YÜZEYLERDE BOZULMA SINIFLANDIRMASI: AFYONKARAHİSAR'DAKİ ÜÇ TARİHİ ÇEŞME ÜZERİNDEN BİR DEĞERLENDİRME

CLASSIFICATION OF DETERIORATION ON NATURAL STONE SURFACES: AN EVALUATION THROUGH THREE HISTORICAL FOUNTAINS IN AFYONKARAHİSAR

E. Okuyucu^{1*}, M. Çiftçi²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü

*Sorumlu Yazar: ebruokuyucu@hotmail.com

ÖZET

Doğal taş, tarih boyunca anıtlar, yapılar ve kamusal çeşmeler gibi birçok mimari unsorda kullanılmış; ancak çevresel ve fiziksel etkilere bağlı olarak zamanla çeşitli bozulmalara maruz kalmıştır. Bu çalışmada, Afyonkarahisar kent merkezinde yer alan üç tarihi çeşme olan Ali Vezir, Hodalı ve Aliğa Çeşmeleri incelenmiş; her bir yapının malzeme özellikleri, mimari detayları, mevcut durumu ve taş yüzeylerindeki bozulma türleri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında gözlemsel alan araştırması yapılmış ve üç boyutlu belgelenme yöntemi uygulanmıştır. Belirlenen bozulma türleri; çatlaklar, ayrılmalar, materyal kayıpları, renk değişimleri ve biyolojik yerleşim başlıkları altında sınıflandırılmıştır. Her çeşmede gözlemlenen bozulma biçimleri ile fiziksel durumları arasındaki ilişkiler analiz edilmiş ve koruma öncesi teşhis çalışmalarının önemi vurgulanmıştır. Bu çalışma, tarihi taş yapıların belgelenmesine ve sürdürülebilir koruma uygulamalarına katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Taş bozulmaları, tarihi çeşmeler, koruma öncesi teşhis, üç boyutlu belgelenme.

ABSTRACT

Natural stone has been used in many architectural elements such as monuments, buildings, and public fountains throughout history; however, it has been subject to various forms of deterioration over time due to environmental and physical effects. In this study, three historical fountains located in the city center of Afyonkarahisar, namely Ali Vezir, Hodalı, and Aliğa Fountains, were examined; the material properties, architectural details, current condition, and types of deterioration on the stone surfaces of each structure were evaluated. Within the scope of the study, observational field research was conducted and a three-dimensional documentation method was applied. The identified types of deterioration were classified under the headings of cracks, spalling, material loss, color changes, and biological colonization. The relationships between the forms of deterioration observed in each fountain and their physical conditions were analyzed, and the importance of pre-conservation diagnostic studies was emphasized. This study aims to contribute to the documentation of historic stone structures and sustainable conservation practices.

Keywords: Stone deterioration, historic fountains, pre-conservation diagnosis, three-dimensional documentation.

1. GİRİŞ

Binaların, anıtların ve sanat eserlerinin inşasında doğal taşların kullanımı, insanlık tarihinin başlangıcından bu yana süregelen bir uygulamadır (Fitzner and Heinrichs, 2001). Bu nedenle, taş koruma, uzun bir geçmişe sahip ve üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan bir alan olmuştur (Caner, 2011). Yapılan araştırmalar, taş malzemenin korunması amacıyla ölçülebilir ve izlenebilir teşhis çalışmalarının önemini ortaya koymuştur. Son yıllarda gerçekleştirilen disiplinler arası çalışmalar ve özellikle fotogrametri, lazer tarama ile drone tabanlı 3B belgeleme gibi teknolojik ilerlemeler, teşhis ve koruma süreçleri arasında kritik bir rol oynamaktadır (Fitzner and Heinrichs, 2001; Liu and Bin Mamat, 2024). Ancak taş koruma uygulamaları genellikle teşhis çalışmaları yapılmadan belirlenmiş ve uygulanmıştır. Bu tür uygulamaların büyük bir kısmının taşa zarar verdiği ve neredeyse hiçbirinin bozulma süreçlerini durdurmadığı tespit edilmiştir (Ahunbay, 1996).

Çalışma kapsamında incelenen çeşmelerden ilki, Ali Vezir Çeşmesi olup 1926 yılında Ali Çetinkaya tarafından yaptırılmıştır. Mermer malzemenin öne çıktığı yapıda, dikdörtgen söveli çeşme aynası, alınlıklar ve profilli saçak elemanları dikkat çeker. Yapı günümüzde bakımlı durumdadır ve suyu akmaktadır.

İkinci olarak incelenen Hodalı Çeşmesi, 1250 yılına tarihlenen ve Anadolu Selçuklu mimarisi özellikleri taşıyan bir yapıdır. Düzgün kesme taştan prizmatik kütleyle inşa edilmiş olan çeşme, sivri kemerli nişi ve mermer kitabesi ile dikkat çekmektedir. Ancak günümüzde suyu akmamakta ve yapının çeşitli bölümlerinde bozulmalar gözlemlenmektedir.

Üçüncü örnek olan Aliaga Çeşmesi, 1438 yılında Murat oğlu Ali Ağa tarafından inşa ettirilmiş, 1906 yılında ise mahalle halkı tarafından onarılmıştır. Düzgün kesme taş ve yer yer tuğla malzemeye inşa edilmiş çeşmede yuvarlak kemer, iki ayrı kitabe, antik dönem mimari parçaların yeniden kullanımı ve kırma çatılı ahşap saçak gibi öğeler öne çıkmaktadır. Çeşme yakın zamanda restore edilmiş olsa da suyu akmamaktadır.

Tarihi yapıların belgelenmesi ve korunmasına yönelik yürütülen çalışmalarda görsel belgelendirme önemli bir adımdır. Bu kapsamda, her çeşmenin tüm cephesinden çekilen fotoğraflar kullanılarak fotogrametri yöntemiyle üç boyutlu modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan bu dijital modeller, yapıların algılanabilirliğini artırmak ve görsel belgeleme sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Fotogrametri, bu çalışmada yalnızca yardımcı bir araç olarak kullanılmış olup esas odak taş malzemedeki bozulmaların tespiti ve sınıflandırılmasıdır. Bu doğrultuda, çeşmelerin mevcut durumu yerinde incelenmiş; taş yüzeylerdeki bozulma türleri, biçimleri ve olası nedenleri belgelenmiştir. Yapılan gözlemler, literatürde yer alan bozulma türleriyle karşılaştırılarak sınıflandırılmış; taş malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile çevresel etkiler arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Çalışma, geleneksel taş yapı elemanlarının korunması ve sürdürülebilirliğine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

2. DOĞAL TAŞLARDA GÖRÜLEN BOZULMA TÜRLERİ

Tarihi yapılarda kullanılan doğal taş malzeme, zamanla çeşitli çevresel, fiziksel ve kimyasal etkilere bağlı olarak farklı bozulma türlerine maruz kalmaktadır. Bu bozulmalar, yapı elemanlarının estetik görünümünün bozulmasının yanı sıra yapısal bütünlüğünü de tehdit edebilmektedir. Literatürde doğaltaşlardaki bozulmalar, farklı başlıklar altında sınıflandırılmıştır. Taş malzemedeki gözlenen bozulmalar; çatlaklar, ayrılmalar, materyal kayıpları, renk değişimleri ve biyolojik yerleşim biçiminde gruplandırılmaktadır (Küçükaya, 2004; Öcal ve Dal, 2012). Aşağıdaki çizelgede bu bozulma türleri detaylandırılmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Taş Yapıda Bozulma Türleri (Öcal ve Dal, 2012).

Ana Başlık	Alt Türler / Açıklamalar
1. Çatlaklar ve Deformasyon	-Kırık- Yıldız şeklinde çatlak- Kılcal çatlak- Yüzeysel çatlak- Yarık- Deformasyon
2. Ayrılma ve Eksilme	-Kabarma- Patlama- Tabakalaşma- Dağılma
3. Materyal Kaybı	-Alveolar ayrışma- Erozyon (diferensiyel erozyon, yuvarlaklaşma)- Mekanik hasar (darbe, kesme, çizme, aşınma, delinme)- Kayıp parça- Tozuma- Kırıntılanma
4. Renk Değişimi ve Birikme	-Kabuk oluşumu- Birikme- Renk değişimi (renklenme, renk açılması, mineral alanlar, leke)- Çiçeklenme- Parlak görünüm- Grafiti- Kirlenme- Kabuk altı çiçeklenme
5. Biyolojik Yerleşim	-Alg- Liken- Yosun- Mantar- Bitki

2.1. Çatlaklar ve Deformasyon

Taşlarda parça kaybı olmadan yapısında gerçekleşen değişimler ayrışma türlerini oluşturmaktadır. Taşlarda çeşitli nedenlerden dolayı oluşan kılcal çatlaklar, tek çatlak ya da çatlaklar ağı taşların mekanik dayanımını azaltmaktadır. Taşlarda bozulma sonucu görülen çatlaklar, taşların jeolojik yapısından doğal sebeplerden kaynaklanabilirken taşın ocaktan çıkartılıp işlenmesi sürecinde de oluşabilmektedir. Bu bozulma sınıfının altında kırık, yıldız şeklinde çatlak, kılcal çatlak, çatlaklar ağı ve yarık sıralanabilmektedir (ICOMOS-ISCS, 2008).

2.2. Ayrılma ve Eksilme

Taş eserden çözünme yoluyla materyal ayrılması bu grup altında ele alınmaktadır. Materyal çözünmesiyle ilgili alt grupları ise kabarma, patlama, tabakalaşma, dağılma, parçalanma, soyulma ile kabuklanma adı altında ele alınmaktadır (Öcal ve Dal, 2012). Ayrılma veya eksilme taş eserlerde çözünme yoluyla gerçekleşip tabakalaşma, kabarma, patlama ve dağılma bozulma türleri olarak ele alınabilir (ICOMOS-ISCS, 2008).

Tabakalaşma: Taş yüzeyinde sıcaklık, nem ve tuz kristallenmesi gibi kimyasal etkilerle oluşan, taş yüzeyine paralel ince katmanların soyulması ya da levha şeklinde ayrılmasıdır.

Kabarma: Taş yüzeyinin altında hava birikmesiyle oluşan yarım küre biçimli çıkıntılardır. Genellikle tuz etkisiyle, sedimanter kayalarda görülür.

Patlama: Tuz, kil ya da metal oksitlenmesi gibi etkenlerle taşın iç basıncının artması sonucu düzensiz parçaların yüzeyden kopmasıdır. Mekanik kırılmalarla karıştırılmamalıdır.

Dağılma: Taş yüzeyinden mm-cm boyutlarında düzensiz parçaların koparak materyal kaybına neden olduğu bozulma türüdür (Öcal ve Dal, 2012).

2.3. Materyal Kaybı

Taşlarda çeşitli etkiler sonucunda materyal kaybı oluşmaktadır. Bu ayrışma türleri taşların genel ve bölgesel deformasyona uğramasına ve morfolojik değişimlerine sebep olarak orijinal görünümünden uzaklaşmasına yol açmaktadır. Alveolar ayrışma, erozyon, mekanik hasar, kırıntılanma, tozuma ve parça kaybı materyal kaybı bozulma türlerinin bazılarını oluşturmaktadır (ICOMOS-ISCS, 2008).

Bozunma formlarının üçüncü grubunu oluşturan taştan materyal kaybı içerisinde aşınma, rölyef ve kırılmalar alt grupları ele alınmaktadır. Bu birinci grup ayrışma formu adı altında taşın genel olarak orijinal görünüşünü artık korumadığı, tümüyle veya bölgesel olarak açık bir şekilde fark edilebilen yüzeydeki morfolojik değişimler anlaşılmaktadır. Taştan bazı etkenler sonucunda materyal ayrılması, bu başlık altında değerlendirilmektedir. Bu etkenler arasında, rüzgârın ve yağmurun yüzeyde erozyon oluşturmaları; mekanik nedenlerle oluşan darbe, çizilme ve kazınma gibi bozunma sonuçları sayılabilir (Öcal ve Dal, 2012).

Alveolar Ayrışma: Taş yüzeylerinde petek benzeri, bağlantılı boşluklardır. Kimyasal ve fiziksel yapı ile ilişkilidir, oyuklanma ve çukurlaşmalarla ilgilidir.

Erozyon: İklimsel ve beşerî etkilerle taş yüzeyindeki kabartma ve desenlerin zamanla aşınmasıdır. Homojen taşlarda genel aşınma, heterojenlerde farklı derecelerde aşınma görülür.

Mekanik Hasar: Çizme, kazıma, kesme gibi fiziksel müdahaleler sonucu oluşan beşerî kaynaklı yüzey hasarlarıdır.

Kırıntılanma: Atmosferik kirleticilere maruz kalan özellikle karbonatlı taşlarda görülen, taş yüzeyinden küçük parçacıkların ayrılmasıdır.

Tozuma: Killi kireç taşlarında yaygın olan, taş yüzeyinin pudra gibi ele yapışmasıdır; korozyonla ilgilidir.

Parça Kaybı: Heykel veya yapıya ait uzuv, motif gibi parçaların koparak orijinal yüzeyden eksilmesidir (Şener, 2020).

2.4. Renk Değişimi ve Birikme

Her taşın kimliğini oluşturan bir rengi vardır. Taşların renk tonu (yeşil, siyah, mavi, beyaz), renklerinin açık-koyuluğu (açık mavi, koyu yeşil) ve renk yoğunluğu gibi değişkenler taşlardaki bozulma türlerinden renk değişimlerinin açıklanmasında kullanılabilir. Taşların yapısına ait çeşitli minerallerin oksitlenerek ayrışması ve mikrobiyolojik organizmaların taşlarda koloni oluşturarak zaman içerisinde taşın orijinal renginin farklı renklerle değişime uğraması şeklinde görülmektedir. Renk açılması/ağarma, renklenme, leke ve nemli alanlar gibi bozulma türleri taşlarda gözlemlenen renk değişimi bozulma biçiminin sınıflandırmasına girmektedir (ICOMOS-ISCS, 2008).

2.5. Biyolojik Yerleşim

Taş yüzeyinde oluşan biyolojik bozulmalar, mikroorganizmalar (bakteri, alg, mantar, liken, yosun) ile bitkiler (ot, çalı, ağaç) gibi canlıların etkisiyle meydana gelir ve “biyolojik yerleşim” olarak adlandırılır. Bu organizmalar hem doğrudan taş yüzeyinde hem de taşın içinde etkili olabilir. Ayrıca taş yakınındaki bitkiler de dolaylı olarak bozulmaya neden olabilir. Mikroorganizmalar, taşın yapısındaki mineralleri etkileyen organik asitler üretir. Aynı zamanda bu ortamlar bazı mikroskobik hayvanlar ve böcekler için yaşam alanı oluşturur. Özellikle yosun ve likenler, taş yüzeyinde gelişerek asidik enzimler salgılar, bu da lekelenme ve yüzeyde oyuklaşmalara yol açar. Sülfat ve nitrat bakterileri, taşa kimyasal değişimlere neden olur. Sülfat bakterileri karbonatlı taşlarda jips-anhidrit dönüşümüne, nitrat bakterileri ise taş yapısının çözülmesine sebep olur. Bazı mikroorganizmalar ise taş üzerinde karotenoid ve melanin

gibi pigmentler üreterek renk değişimlerine (sarı, turuncu, kahverengi, siyah) yol açar. Bitki kökleri, karbondioksit ve asit üretilen taş yüzeyini çatlatabilir. Sarmaşıklar gibi bitkiler taşın sürekli nemli kalmasına neden olur, bu da bozulmayı hızlandırır. Bu bozulma türü, taş yüzeyindeki yabancı madde birikimiyle karıştırılmamalıdır. Örneğin, kuş yuvaları ve örümcek ağları biyolojik yerleşim sayılırken, kuş ve yarasa dışkıları birikim olarak değerlendirilir. Taş üzerinde 2 mm'yi geçmeyen mikrobiyal tabakalar varsa bunlara biyofilm veya biyopatina denir. Bu tabakalar ortamdaki suya bağlı olarak genişleyip daralabilir ve çok renkli olabilir (Öcal ve Dal, 2012).

3. ALAN ÇALIŞMASI

Bu çalışma kapsamında, Afyonkarahisar kent merkezinde yer alan üç farklı tarihi çeşme seçilerek yerinde incelemeleri yapılmıştır. Bu çeşmeler; Ali Vezir Çeşmesi, Hodalı Çeşmesi ve Aliğa Çeşmesi'dir. Alan çalışmasının amacı, taş yapılarla kullanılan malzeme özelliklerinin, yapım tekniklerinin, mevcut fiziksel durumlarının ve bozulma türlerinin tespit edilmesidir. Çeşmelerin konumları Şekil 1'de gösterilmiştir. Çeşmelere ait bilgiler ise Çizelge 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çeşmelerin konumları (Google, 2025).

3.1. Ali Vezir Çeşmesi

Ali Vezir Çeşmesi, Afyonkarahisar'ın Kasımpaşa (Hacı Cafer) Mahallesi'nde, Mermer Çeşme Sokak üzerinde konumlanmaktadır (27. pafta, 548. ada, 27. parsel). Yapı, 1926 yılında, dönemin Bayındırlık Bakanı Ali Çetinkaya tarafından mahalle halkının talebi doğrultusunda inşa ettirilmiştir. Halk arasında "Dibekbaşı Çeşmesi" olarak da anılmaktadır.

Çeşme, irili ufaklı taşlardan oluşan bir temel üzerine, mermer malzeme kullanılarak inşa edilmiştir. Simetrik düzende tasarlanan cephede, iki yanda dikdörtgen bloklar ve alınlıklar yer alırken, ortada dikdörtgen formlu çeşme aynası dikkat çeker. Ayna kısmının üst profili yatay bir çizgi ile sınırlandırılmış olup kapı benzeri bir görünüm sunar. Alınlık altında talik hatla yazılmış olan "Bismillâhirrahmânirrahîm" ibaresi ile hicri 1345 ve miladi 1926 tarihleri yer almaktadır. Mermerden yapılmış yalak kısmı, oval formda bir kurna olarak düzenlenmiştir. Yapı günümüzde sağlam durumdadır ve işlevselliğini koruyarak su akışına devam etmektedir (Kaya ve Üyümez, 2015).

3.2. Hodalı Çeşmesi

Hodali Çeşmesi, Tacahmet (Kubeli) Mahallesi sınırlarında, Camii Kebir Hodal Çeşme Sokağı ile Akosmanoğlu Sokağı'nın kesiştiği noktada yer almakta olup 52. pafta, 136. ada, 6. parsel üzerindedir. Çeşme, Hicri 648 / Miladi 1250 tarihinde, Anadolu Selçuklu Sultanı İzzeddin Keykavus'un emriyle

Şemsedin Ömer tarafından inşa ettirilmiştir. Ancak yapıya ait kitabenin özgün olarak buraya ait olmadığı, bazı kaynaklara göre türbe veya camiden alınmış olabileceği ileri sürülmektedir.

Çeşme düzgün kesme taşlarla prizmatik kütle formunda yapılmıştır. Kuzeye bakan cephesi sivri kemerli ve derin nişlidir. Niş içerisinde, 40 x 45 cm boyutlarında, altı satırlık bir mermer kitabe yer almakta ve Selçuklu döneminin karakteristik hat örneklerini taşımaktadır. Kitabenin hemen altında yer alan iç içe iki daire içinde musluk yeri düzenlenmiştir. Çeşmenin arka kısmında, üzeri tonozla örtülü bir su deposu yer almaktadır. Yapının üst örtüsü, üç yöne uzanan ahşap saçaklar ve Marsilya tipi kiremitlerle kaplı kırma çatıdan oluşur. Çeşme günümüzde işlevini yitirmiş olup su akışı bulunmamaktadır. Yalak kısmında kırıklar gözlenmekte ve genel olarak yapı, bakım ve onarıma ihtiyaç duymaktadır (Kaya ve Üyümez, 2015).

3.3. Aliğa Çeşmesi

Ali Ağa Çeşmesi, Çavuşbaşı Mahallesi'nde konumlanmakta olup düzgün kesme taşlardan inşa edilmiştir. Taş duvar örgüsünde yer yer tuğla malzemeye de yer verilmiştir. Depolu çeşme tipinde olan yapı, üçgen formda kiremit kaplı bir çatıya ve geniş ahşap saçaklara sahiptir. İki cephesi açık, diğer iki cephesi ise bitişik nizam yapıların duvarları ile sınırlandırılmıştır. Duvar stabilitesini artırmak amacıyla demir bağlayıcılar kullanılmıştır. Cephesi kemerli ve nişlidir; yuvarlak kemer kesme taşlardan inşa edilmiş olup kemerde ağırlıklı olarak trakit taşı tercih edilmiştir. Duvar örgüsünde bazaltik curuf ve trakit kullanımı dikkat çekerken, bazı alanlarda tuğla ile örülmüş yüzeyler görülmektedir (Çelik ve Sel, 2008).

Kitabelerden anlaşıldığı üzere çeşme, Murat oğlu Ali Ağa tarafından 1438 yılında inşa ettirilmiştir ve 1906 yılında Çavuşoğlu Mahallesi sakinleri tarafından tamir edilmiştir. Çeşme aynası üzerinde dikine yazılmış ikinci bir kitabe daha yer almaktadır. Cephede, istirdiy nişleri, antik taş parçaları ve hac motifli süslemeler bulunmaktadır. Taştan oyulmuş yalak kısmı ve taş duvara bağlı ahşap konsollarla desteklenen saçak yapısı dikkat çekicidir. Yapının çatı örtüsü, restorasyon sonrasında Marsilya tipi kiremitten oluklu tuğlaya dönüştürülmüştür. Yapı yakın zamanda onarılmıştır ancak su akışı bulunmamaktadır (Kaya ve Üyümez, 2015).

Çizelge 2. Çeşmelerin Künyesi

Çeşmelerin Künyesi			
Çeşme İsmi	Ali Vezir Çeşmesi	Hodalı Çeşmesi	Aliğa Çeşmesi
3 Boyutlu Görsel			
Mahalle / Konum	Kasımpaşa (Hacı Cafer) Mahallesi	Tacahmet (Kubeli) Mahallesi	Çavuşoğlu Mahallesi

Yapım Yılı (H/M)	1345 / 1926	648 / 1250	842 / 1438 (asıl) 1324 / 1906 (tamir)
Kitabe Durumu	Var	Var	Var (2 adet)
Taş Türü	Mermer + taş temel	Düzgün kesme taş	Kesme taş + yer yer tuğla
Yapım Tekniği	Yığma	Yığma	Karma
Mimari Dönem	Cumhuriyet Dönemi	Anadolu Selçuklu	Osmanlı (Erken + Geç)
Malzeme Özelliği	Profilli alınlıklar, dikdörtgen ayna, oval kurna	Sivri kemerli niş, tonozlu depo	Antik parçalar, istiridye nişi, hac motifleri
Fiziksel Durumu	Sağlam, bakımlı	Hasarlı, yalağı kırık	Sağlam, bakımlı
Su Durumu	Akıyor	Akmıyor	Akmıyor
Restorasyon	Yapıldı	Gerekmiyor	Yapıldı

3.4. Ali Vezir Çeşmesi ile İlgili Bozulmalar

Ali Vezir Çeşmesi'nde tespit edilen bozulmalar; yüzey kirlenmeleri, aşınmalar ve grafiti izleri olarak üç temel başlıkta değerlendirilebilir. Taş yüzeydeki renk değişimleri, çevresel etkiler (toz, nem, yağmur suyu sıçraması) nedeniyle meydana gelmiş olup taşın gözenekli yapısı kir birikimini hızlandırmıştır. Suyun aktığı bölgede tespit edilen yüzeysel aşınmalar, sürekli akış ve taşın erozyon etkisiyle yapısal olarak zayıflamaya neden olmuştur. Özellikle yalak kısmında görülen oyulmalar ve taban taşındaki yüzeysel bozulmalar, kullanım kaynaklı fiziksel aşınmayı açıkça göstermektedir. Ayrıca ön cephede spreyci boya ile yapılmış yazılar da insan müdahalesine bağlı kimyasal kirlenme örneklerindendir. Bu durum, çeşmenin tarihî kimliğine zarar vermekte ve müdahalesiz korunmasının ne kadar önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır. Çizelge 3'te Ali Vezir çeşmesinde meydana gelen bozulmalar gösterilmiştir.

Çizelge 3. Ali Vezir Çeşmesinde Meydana Gelen Bozulmalar

Ali Vezir Çeşmesi			
Bozulmanın Fotoğrafi			
Bozulmanın Adı	Grafiti	Aşınma	Kirlenme
Bozulmanın Türü	Renk Değişimi ve Birikme → Grafiti	Materyal Kaybı → Mekanik Hasar (Aşınma)	Renk Değişimi ve Birikme → Kirlenme
Bozulmanın Sebebi	İnsan kaynaklı müdahale sonucu spreyci boyalar ile yapılan kimyasal ve görsel bozulma. Taşın orijinal dokusu zarar görmüş.	Sürekli akan suyun temas ettiği yüzeyde zamanla mekanik aşınma oluşmuş; taşın dokusu incelmış ve çukurlaşma meydana gelmiştir.	Yağmur suyu sıçraması, yol tozu ve nem birikimi taş yüzeyde lekelenmelere ve renk değişimine neden olmuş.
Cephe Yönü	Ön cephe	Ön cephe	Ön cephe

3.5. Hodalı Çeşmesi ile İlgili Bozulmalar

Hodali Çeşmesi'nde yapılan incelemelerde, özellikle çeşmenin niş kısmında ve suyun aktığı bölgede gözlemlenen delinmeler, bu alanın dış müdahalelere sıkça maruz kaldığını göstermektedir. Delinmelerin bazıları tesisat bağlantısı amaçlıdır ve taş yüzeyde düzensiz hasarlar bırakmıştır. Aynı zamanda cephe üzerindeki yazıt taşının çevresinde de yüzey aşınmaları dikkat çekmektedir. Grafiti uygulamaları burada da insan müdahalesinin bir diğer örneği olarak karşımıza çıkmakta, yazıt taşının sağ tarafında boya kalıntıları görülmektedir. Çeşmenin sağ duvarında da geniş bir yüzeyde grafiti tespit edilmiştir. Bu gibi bozulmalar, yapının tarihi ve estetik değerini zedelemekte, aynı zamanda koruma önlemlerinin yetersizliğini göstermektedir. Ayrıca taşların arasında yer alan derz dolgularında kısmi boşalmalar ve uyumsuzluklar gözlenmiş, bu da yapı elemanlarının bir bütün olarak dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Çizelge 4'te Hodalı çeşmesinde meydana gelen bozulmalar gösterilmiştir.

Çizelge 4. Hodalı Çeşmesinde Meydana Gelen Bozulmalar

Hodalı Çeşmesi			
Bozulmanın Fotoğrafi			
Bozulmanın Adı	Grafiti	Delinme	Kirlenme
Bozulmanın Türü	Renk Değişimi ve Birikme → Grafiti	Materyal Kaybı → Mekanik Hasar (Delinme)	Renk Değişimi ve Birikme → Kirlenme
Bozulmanın Sebebi	İnsan kaynaklı müdahale sonucu spreyci boya ile yapılan kimyasal ve görsel bozulma. Taşın orijinal dokusu zarar görmüş.	Sabitlenme veya tesisat amaçlı açılan delikler. Fiziksel müdahale ile taşın yüzeyi delinmiştir.	Yağmur suyu sıçraması, yol tozu ve nem birikimi taş yüzeyde lekelenmelere ve renk değişimine neden olmuş.
Cephe Yönü	Ön cephe	Ön cephe	Ön cephe (sağ alt)
Bozulmanın Fotoğrafi			
Bozulmanın Adı	Kırık	Aşınma	
Bozulmanın Türü	Çatlaklar ve Deformasyon → Kırık	Materyal Kaybı → Mekanik Hasar (Aşınma)	
Bozulmanın Sebebi	Zamanla oluşan gerilimler, nem, sıcaklık farkı veya darbe etkisiyle taşta ayrılma meydana gelmiştir.	Sürekli akan suyun temas ettiği yüzeyde zamanla mekanik aşınma oluşmuş; taşın dokusu incelmış ve çukurlaşma meydana gelmiştir.	
Cephe Yönü	Sağ yan cephe	Ön cephe (niş içi alt bölge)	

3.6 Aliğa Çeşmesi ile İlgili Bozulmalar

Ali Ağa Çeşmesi'nde yapılan gözlemler, özellikle ön cephede yoğunlaşan insan kaynaklı müdahalelerin (grafiti, delinme ve kırıklar) malzeme üzerinde ciddi tahribat oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Grafiti uygulamaları, taş yüzeyin estetik değerini bozmakla kalmayıp kimyasal içerikli boyaların taşın gözenekli yapısına işlemesi nedeniyle fiziksel yapıya da zarar vermektedir. Delinmeler genellikle sabitleme veya tesisat yerleştirme amacıyla yapılmış olup taş dokuda mekanik bütünlüğün kaybolmasına neden olmuştur. Özellikle mermer köşelerde gözlenen kırıklar ise yapının uzun dönemli çevresel etkilere (sıcaklık değişimi, nem, darbe gibi) karşı direncinin zayıfladığını göstermektedir. Yan cephelerde yer alan kirlenme, harç boşalması ve derz uyuşmazlıkları, su etkisi ve kullanılan malzeme farklılıklarının zamanla yüzeyde deformasyon oluşturduğunu göstermektedir. Çizelge 5'te Aliğa çeşmesinde meydana gelen bozulmalar gösterilmiştir.

Çizelge 5. Hodalı Çeşmesinde Meydana Gelen Bozulmalar

Aliğa Çeşmesinde Meydana Gelen Bozulmalar			
Bozulmanın Fotoğrafi			
Bozulmanın Adı	Grafiti	Delinme	Kırık
Bozulmanın Türü	Renk Değişimi ve Birikme → Grafiti	Materyal Kaybı → Mekanik Hasar (Delinme)	Çatlaklar ve Deformasyon → Kırık
Bozulmanın Sebebi	İnsan kaynaklı müdahale sonucu spreylen boya ile yapılan kimyasal ve görsel bozulma. Taşın orijinal dokusu zarar görmüş.	Sabitlenme veya tesisat amaçlı açılan delikler. Fiziksel müdahale ile taşın yüzeyi delinmiş.	Zamanla oluşan gerilimler, nem, sıcaklık farkı veya darbe etkisiyle taşta ayrılma meydana gelmiş.
Cephe Yönü	Ön cephe	Ön cephe	Ön cephe
Bozulmanın Fotoğrafi			

Bozulmanın Adı	Kirlenme	Grafiti	Derz Boşalması / Harç Uyuşmazlığı
Bozulmanın Türü	Renk Değişimi ve Birikme → Kirlenme	Renk Değişimi ve Birikme → Grafiti	Ayrılma ve Eksilme → Harçta Boşalma / Kabarma
Bozulmanın Sebebi	Yağmur suyu sıçraması, yol tozu ve nem birikimi taş yüzeyde lekelenmelere ve renk değişimine neden olmuş.	İnsan kaynaklı müdahale sonucu spreyci boyalar ile yapılan kimyasal ve görsel bozulma. Taşın orijinal dokusu zarar görmüş.	Su teması, farklı malzeme kullanımı ve yaşlanma nedeniyle derz dolgusunun dökülmesi veya çatlaması
Cephe Yönü	Ön cephe (sağ alt)	Sol yan cephe	Sol yan cephe
Bozulmanın Fotoğrafi			
Bozulmanın Adı	Kirlenme	Delinme	
Bozulmanın Türü	Renk Değişimi ve Birikme → Kirlenme	Materyal Kaybı → Mekanik Hasar (Delinme)	
Bozulmanın Sebebi	Zemine yakınlık, yol tozu, yağmur sıçraması ve nem nedeniyle taş yüzeyde kirlenme ve koyu renklenme oluşmuş.	Sabitlenme veya tesisat amaçlı açılan delikler. Fiziksel müdahale ile taşın yüzeyi delinmiş.	
Cephe Yönü	Sol yan cephe	Sol yan cephe	Sol yan cephe

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında incelenen üç çeşme yapısında, taş yüzeylerde oluşan bozulmalar türlerine göre sınıflandırılmış ve fiziksel, kimyasal ve mekanik etkiler bağlamında değerlendirilmiştir. Gözlemler sonucunda en sık karşılaşılan bozulmalar arasında grafiti kaynaklı renk değişimleri, mekanik müdahale sonucu oluşan delinmeler, malzeme yüzeyindeki kirlenmeler, çatlak ve kırık gibi yapısal deformasyonlar ile derz boşalmaları yer almaktadır. Bu bozulmalar, yapı malzemesinin doğal yaşlanma sürecine ek

olarak dış etkenlere (nem, sıcaklık değişimi, fiziksel darbe vb.) ve kullanıcı müdahalelerine bağlı olarak gelişmiştir. Analiz sonuçları, taş yapılarda bozulma tiplerinin belirlenmesinde detaylı yüzey incelemesinin ve sistematik görsel belgelenmenin önemini ortaya koymuştur. Bu tür analizler, müdahale öncesi hasar tespiti ve uygun koruma yöntemlerinin belirlenmesi açısından teknik bir altlık sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, Avrupa standardı EN 16096:2012 ‘Condition Survey and Report of Built Cultural Heritage’ yönergeleri izlenerek görsel incelemeye dayalı mevcut durum analizinin daha sistematik ve ayrıntılı yürütülmesi önerilmektedir (European Committee for Standardization, 2012).

KAYNAKLAR

- Ahunbay, Z. (1996). Tarihi çevre koruma ve restorasyon (Vol. 5). Yem Yayınevi.
- Caner, E. (2011). Limestone decay in historic monuments and consolidation with nanodispersive calcium hydroxide solutions. Doctoral dissertation, Middle East Technical University, <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/21110>
- Çelik, M. Y., Sel, H. (2008). Afyon’daki tarihi çeşmelerde doğal taş kullanımı. In M. Ersoy, L. Yeşilkaya, A. L. Dinçer (Eds.), MERSEM 2008: Türkiye VI. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu (pp. 40–58). Afyon Kocatepe Üniversitesi Yayınları.
- European Committee for Standardization. (2012). Conservation of cultural property – Condition survey and report of built cultural heritage “EN 16096.”
- Fitzner, B., Heinrichs, K. (2001). Damage diagnosis at stone monuments – Weathering forms, damage categories and damage indices. Acta Universitatis Carolinae Geologica, 1, 12–59.
- Google. (2025, March 27). Afyonkarahisar tarihi çeşmeler haritası. https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1JO5iV0ZlxqxYlgumiEGPG7Jpv_dPoJQ&ll=38.75813288359052%2C30.533361749999983&z=16
- ICOMOS-ISCS. (2008). Illustrated glossary on stone deterioration patterns (Vol. 15). ICOMOS.
- Kaya, F., Üyümez, M. (2015). Geçmişten günümüze Afyonkarahisar çeşmeleri. Afyonkarahisar Belediyesi.
- Küçükkaya, A. G. (2004). Taşların bozulma nedenleri ve koruma yöntemleri. Birsen Yayınevi.
- Liu, S., Bin Mamat, M. J. (2024). Application of 3D laser scanning technology for mapping and accuracy assessment of the point cloud model for the Great Achievement Palace heritage building. Heritage Science, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01252-y>
- Öcal, A. D., Dal, M. (2012). Doğal taşlardaki bozunmalar. Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi.
- Şener, E. V. (2020). Tarihi taş yapılarda görülen bozulmalar ve temizlik yöntemlerinin İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi güney dış cephesi örneği üzerinden değerlendirilmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.

BİLDİRİLER / PAPERS

7.Bölüm

DOĞALTAŞ SEKTÖRÜNÜN KURUMSALLAŞMASININ ÖNÜNDEKİ ENGELLER VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

OBSTACLES AND SOLUTION SUGGESTIONS TO THE INSTITUTIONALIZATION OF THE NATURAL STONE INDUSTRY

H. Acar^{1*}, İ. S. Büyüksağış², M. Gürsoy²

¹ GRANİTAŞ Granit Sanayi ve Pazarlama A.Ş.

² Afyon Kocatepe Üniversitesi. Maden Mühendisliği Bölümü

*Sorumlu yazar: hasimacar@granitas.com

ÖZ

Dünyadaki tüm şirketlerin %80'i, Türkiye'deki şirketlerin de %95 kadarı aile şirkettir. Doğaltaş sektöründe bu oranlar çok daha yüksek olup Dünya'daki doğaltaş şirketlerinin %95'i, Türkiye'de ise birkaç istisna dışında tamamına yakını aile şirkettir. Dünya doğaltaş sektöründe, diğer sektörlerle göre daha az oranda olsa bile, aile şirketi olmalarına rağmen başarılı bir şekilde kurumsallaşmış bazı şirketler de vardır. Tüm sektörler genelinde, kurumsallaşmayı başaramayan aile şirketlerinin ancak %13'ü üçüncü kuşak tarafından sürdürülebildiği gerçeği bulunmaktadır. Kurumsallaşamayan aile şirketlerinin ise yalnızca %2'si dördüncü kuşakta ayakta kalabilmektedir. Bu çalışmada, hem küresel olarak hem de Türkiye şartlarında doğaltaş sektöründe şirketlerin kurumsallaşamaması ve aile şirketlerinin üçüncü kuşaktan itibaren neden ayakta kalamadıkları sorgulanmış ve bunlar için bazı çözüm yolları önerilmiştir. Amaç, hem doğaltaş sektörünün aile şirketlerine sürdürülebilir yol göstermek, hem de ülke değerlerinin kurumsallaşmayı başarmış şirketlerle korunarak geliştirilmesine ışık tutmaktır.

Anahtar Kelimeler: Doğaltaş, aile şirketleri, kurumsallaşma, sürdürülebilirlik

ABSTRACT

Around 80% of all companies worldwide and 95% of companies in Turkey are family companies. These rates are much higher in the natural stone sector, and around 95% of natural stone companies in the world, and almost all of them in Turkey, with a few exceptions, are family companies. In the global natural stone sector, although to a lesser extent than in other sectors, some companies have successfully institutionalized despite being family companies. Across all sectors, only 13% of family companies that fail to institutionalize can be sustained by the 3rd generation. Only 2% of family companies that fail to institutionalize survive into the 4th generation. In this study, the failure of companies to institutionalize in the natural stone sector both globally and in Türkiye and why family companies cannot survive after the third generation are questioned, and some solutions are suggested for these. The aim is to provide sustainable guidance to family companies in the natural stone sector and to shed light on developing the country's values by protecting them with companies that have achieved institutionalization.

Keywords: Natural stone, family businesses, institutionalization, sustainability

1. GİRİŞ

Tüm işletmelerin İtalya’da %99’u, Türkiye’de %95’i ABD ve İsveç’te %90’ı, İsviçre’de %85’i, İspanya’da %80’i, İngiltere’de %75’i, Portekiz’de %70’i, Almanya’da %60’ı aile şirkettir (İnt. Kaynak 1, 2, 3). Gözlemlerimize göre Dünya ve Türkiye doğaltaş sektöründe aile şirketlerinin oranı daha da yüksek olabilir.

Aile şirketlerinin kurumsallaşma süreçleri ya kısıtlı olarak gerçekleşmekte ya da üçüncü nesle gelinceye kadar veya geldiğinde kurumsallaşma süreci başarıyla sağlanamadığından ancak %13’ü kadarı ayakta kalmayı başarabilmektedir (İnt. Kaynak 5). Bu ise ya şirketlerin kapanmasına veya şirketlerin ve sermayenin el değiştirmesine, şirket kültürünün ve prensiplerinin azalması veya yok olmasına neden olmakta, küresel ekonomi içerisinde yabancı kökenli kişi ve şirketlere aktarılmaktadırlar. Nadir de olsa %2 civarında bazı küçük aile şirketleri dördüncü nesle kadar devam edebilmektedir.

Özellikle doğaltaş madenciliğinin diğer birçok sektöre göre daha riskli ve zorlu üretim süreçleri olması, dönemsel olarak pazar ve pazarlama sorunları, ekonomik krizler olması gibi nedenlerle aile şirketlerinin daha sık ve çabuk kapandığı görülmektedir. Eğer şirket çok kısıtlı sermaye ile kurulmuşsa, elinde yeterince işletme sermayesi bulunmuyorsa her ekonomik zorluklarda önce küçülmeye gitmekte, ardından maliyetlerin karşılanamaması nedeniyle kapatılmak veya devredilmek zorunda kalmaktadır. Ayrıca, ailenin yeni üyelerinin ilk nesiller gibi azimli, kararlı, sebatkâr, fedakâr olmayışları şirketin sürdürülebilirliğine olumsuz yansımakta, ilgili işkolunda akademik düzeyde eğitim almış ve uzmanlaşmış yeni nesillerin profesyonelce yaklaşarak kurumsallaşmaya önem vermesi ve gerekli adımları kararlılıkla atmaları ise işi daha verimli ve sürdürülebilir yapmaktadır. Bu çalışmada, özellikle mermer ve doğaltaş sektöründe aile şirketlerinin kurumsallaşmasındaki engeller ve çözüm yolları irdelenmekte, sürdürülebilirlik için bazı önerilerde bulunmaktadır.

2. DOĞALTAŞ İŞLETMELERİNİN KURUMSALLAŞMA ENGELLERİ

Doğaltaş işletmelerinin kurumsallaşmasının önünde 3 büyük engel öne çıkmaktadır. Bunlar aşağıda detaylıca verilmiştir.

2.1. Doğaya ve kurucu lidere bağlı olma

Doğaltaş sektörü, madeni çıkarma açısından doğal kaynaklara ve üretim verimliliğine bağımlıdır. Bir doğaltaş ocağı açarken ve işletirken, pek çok riskin göze alınması gerekir. Doğaltaş firmalarının kurucu liderleri, “sonuç kötü olursa, şapkasını alıp giderler” diye düşünerek bu riski profesyonellere bırakmak istemezler. Özellikle ilk yatırım aşamasında yatırım bütçelerinin küçük olması, fizibilite çalışmalarının sınırlı yapılması ve bu nedenle de gelişmelerin günlük takip edilmesi gerekliliği, kurucuların bu sorumluluğu profesyonellere bırakmasının önündeki en önemli engeldir. Ayrıca, önceleri sektöre yatırım yapan diğer sektörlerde başarılı olmuş bazı kurumsal firmaların, doğaltaş sektöründe başarılı olamaması da olumsuz örnekler oluşturmıştır.

2.2. Modaya bağlı olma

Her 5-10 yılda bir, Dünyada moda olan taş çeşitleri ve karlılıkları değişmekte, doğaltaş şirketlerinin, moda akımlarına karşı öngörülü ve hazırlıklı olması gerekmektedir. Burada da yurt dışı gelişmelerin öncelikli olarak kurucu liderlerin takip etmesi, yurt dışı fuar ve teknik gezilerde öncü olmaları doğal olarak modaya bağlı değişiklikleri öncelikli algılamalarına ve aksiyon alabilmelerine olanak tanımaktadır.

2.3. Küçük işletmelerin kurumsallaşamaması

Türkiye doğaltaş sektöründe irili ufaklı 12.000 civarında işletme ve 150.000 civarında çalışan olduğu tahmin edilmektedir. İşletme başına düşen ortalama çalışan sayısı 25 civarındadır. Yaklaşık 8.000'i 1- 9 çalışanı olan, patronun da bizzat taş işçiliği yaptığı mikro işletmelerdir. 3.000 kadarı 10- 49 çalışanı olan küçük işletmelerdir. 980 tanesi 50-250 çalışanı olan orta boy işletmeler ve sadece 20 tanesi 250 ve üzeri çalışanı olan büyük işletmelerdir. Dolayısıyla kurumsallaşabilmek için gerekli maddi güce ve gerekli insan kaynaklarına sahip işletme sayısı da çok az olup 50'den az çalışanı olan, yıllık satışları 2.000.000 \$ altında kalan (Tablo 1), ARGE-ÜRGE-İnovasyon ve markalaşmaya yeterli bütçe ayıramayan doğaltaş işletmelerin kurumsallaşması pratik olarak pek mümkün görülmemektedir.

Tablo 1. Doğaltaş sektöründe işletme ölçekleri (İnt. Kaynak 4'ten derlenmiştir)

Ölçek	Çalışan sayısı	Yıllık net satışlar (\$/YIL)	İşletme sayısı	Oran
Mikro Ölçekli	1-9	300.000 \$'a kadar	8.000	%66,67
Küçük Ölçekli	10-49	300.000 – 2.000.000 \$ arası	3.000	%25,00
Orta Ölçekli	50-249	2.000.000 – 15.000.000 \$ arası	980	%8,17
Büyük Ölçekli	250 ve üzeri	15.000.000 \$ ve üzeri	20	%0,16
TOPLAM		6.500.000.000 \$	12.000	%100,00

İşletme başına düşen ortalama yıllık net satış: 541.667 \$

Çalışan başına düşen ortalama yıllık net satış: 44,952 \$

İşletme başına ortalama çalışan sayısı: 12,5 kişi

Tablo.1'deki veriler esas alınarak hesap yapıldığında doğaltaş sektöründe en çarpıcı verilerden biri, çalışan başına yıllık ortalama net satış tutarının 44.952\$ gibi çok düşük bir rakam olmasıdır. Bu 44.952\$'ın 10.000 \$'lık kısmı işletme karı ve 20.000\$'ı da işçilik harici giderler olsa, işçilik giderleri için ortalama 14.952 \$/yıl pay kalmaktadır ki, bu da doğaltaş sektöründe çalışanların ortalama brüt maaşlarını 1.246 \$ ile sınırlar. Brüt maaştaki işveren payı gibi kalemler de dikkate alındığında doğaltaş sektöründe çalışanların aylık ortalama net maaşlarının yaklaşık 900\$ ile sınırlı olduğu görülecektir.

Yani doğaltaş sektörü, sadece işverenler açısından değil, aslında çalışanlar açısından da pek verimli bir sektör değildir. Doğaltaş sektöründe çalışan başına yıllık ortalama net satış rakamının çok düşük olmasının bir nedeni de özellikle mikro ölçekli 8.000 kadar işletmede, çalışanların bir kısmının aylık maaş yerine, kısmi zamanlı (part-time) ya da kayıt dışı çalışıyor olmasıdır.

Bütün bunlar dikkate alındığında, doğaltaş sektöründe kurumsallaşmaya en uygun şirketlerin 250 ve üzerinde çalışanı olan ve çalışan başına yıllık satışları 60.000\$ ve üzeri olan şirketler olduğu görülmektedir. Ülke menfaatleri açısından doğaltaş sektörünün en önemli artışı, doğal kaynakların yani doğaltaş rezervlerinin bol olması ve sektörün ithal girdi oranının diğer sektörlerle göre düşük olması nedeniyle, toplamda ülkemize ciddi bir katma değer kazandırabiliyor olmasıdır.

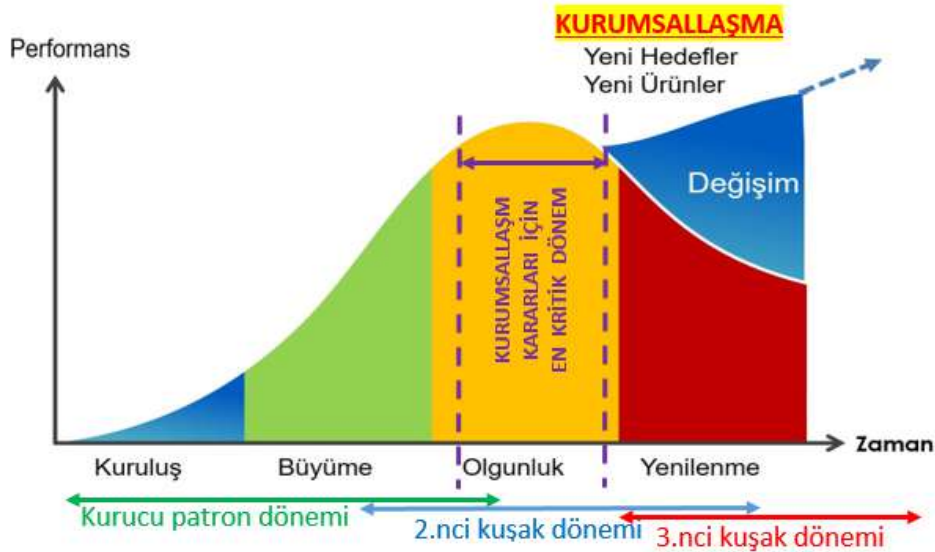
3. DOĞALTAŞ SEKTÖRÜNDEKİ BİR AİLE ŞİRKETİNİN AYNI ZAMANDA KURUMSAL BİR ŞİRKET OLMASI

Dünya doğaltaş sektöründe, diğer sektörlerle göre daha az oranda olsa bile aile şirketi olmalarına rağmen, başarılı bir şekilde kurumsallaşmış şirketler vardır. Tüm sektörler genelinde, kurumsallaşmayı başaramayan aile şirketlerinin ancak %13 kadarının 3'üncü kuşak tarafından sürdürülebildiği gerçeği karşımıza çıkar. Kurumsallaşamayan aile şirketlerinin sadece %2 kadarı 4.'cü kuşakta ayakta kalabilmektedir (Şekil 1).

Kurucu patron döneminde, 2'inci kuşağa iş devri sırasında pozitif değişime hazırlanmayan, 2'inci kuşak döneminde pozitif değişim geçirmeyen aile şirketlerinin %85 kadarı, 3'üncü kuşak döneminde batmaya ya da kelepir fiyatlarla el değiştirmeye mahkumdur (Şekil 2).



Şekil 1. Aile Şirketlerinin Nesillere Göre Ortalama Ömrü (İnt. Kaynak 5)



Şekil 2. Şirketlerin Ömürleri Boyunca Performansları (İnt. Kaynak 6)

4. AİLE ŞİRKETLERİNİN KURUMSALLAŞMA GİRİŞİMLERİNDE BAŞARISIZLIK NEDENLERİ

Kurumsallaşma niyetindeki bir aile şirketinin, öncelikle 2'inci kuşak ile ilgili kariyer planlamasını doğru yapması şarttır. İkinci kuşağa iş devrinde liyakat esaslı kariyer planlamaları yanlış yapıldığı takdirde, aile şirketinin kurumsallaşma niyeti boşa çıkar. Aile şirketlerinin kurumsallaşma girişimlerinde başarısız oldukları nedenler aşağıda sıralanmıştır.

1. Çocukların yönetime hazırlanmasında kariyer planlaması yapılmaması,
2. Ailevi konuların iş ile karıştırılması, aile anayasasının olmaması,
3. Çabuk karar alınıp vazgeçilmesi, imzalı olarak alınan kararların bile uygulanmaması,

4. Kayıt dışı çalışılması,
5. Detaylara takılıp önemli konuların atlanması.

5. KURUMSALLAŞMAK İÇİN GEREKEN ŞARTLAR

1. Sürdürülebilirliği güvence altına alma isteği yeterince güçlü olmalıdır. Kurucular; gelecek kuşakların yönetime yetiştirilmeleri ile ilgili konularda önlem almalıdırlar. Geçmiş başarılarının ve alışkanlıklarının esiri olmamalıdırlar. Edinmiş oldukları gücü paylaşmayı bilmelidirler.
2. Kurucudan sonra gelen kuşaklar; aile şirketini devam ettirme konusunda yeterince istekli, kabiliyetli, eğitilmiş ve donanımlı olmalıdırlar. Kurucudan sonra gelen kuşaklara yetki ve sorumluluklar verilirken, duygusal bağlar değil, liyakat esas olmalıdır.
3. Yetkilerini kısmen de olsa profesyonellere devretme ve kısmen de olsa kurumsallaşma niyetindeki kurucular ve devamındaki kuşaklar, önce kendileri de profesyonel olmalıdır.

5.1. İkinci Kuşağa Doğru Kariyer Planlaması Yapabilmek İçin, Şirkette Oluşturulması Gereken Alt Yapı ve Kültür

1. Uzun soluklu stratejik planlar yapma kültürü geliştirilmeli (Uzun soluklu stratejik planların ne olduğunu bilmeyen ikinci kuşak, aile şirketine yeterince ilgi duymayarak farklı arayışlara girebilir.)
2. Muhasebenin sadece vergi amaçlı değil, her ürün grubu veya her proje için, anlık maliyetler, anlık karlar gibi bilgilerin hızlı ve doğru alınabildiği bir mekanizma haline getirilmeli. Doğru yönetmek için hızlı ve doğru bilgiye erişim en önemli faktördür. Kontrol edemediğimiz bir şeyi, yönetemeyiz.
3. Finansmanın, sadece ne girdi ne çıktı (gelir-gider) olarak değil, çok parametrelili, finansmanı iyileştirmek için hangi parametrelerin düzeltilmesi gerektiğini gösterebilecek bir sistematige kavuşturmak.
4. Yeterli kabiliyette iç denetim ve iç kontrol mekanizmaları kurmak,
5. Üretim, satış, finansman, insan kaynakları gibi çoklu parametreleri bir arada değerlendirebilecek, tekil ve zincirleme riskleri doğru öngörebilen bir risk yönetim sistemi kurmak.

5.2. Aile Şirketlerini Ayakta Tutan 5 Önemli Yaklaşım

i) Değişime açık ve saygılı olmak: Değişime saygı duymak denize saygı duymak gibidir. İçinde boğulabilirsiniz veya akıntıya kapılıp sürüklenip gidebilirsiniz ya da yüzebilir, dümene geçip dünyanın her tarafına açılabilirsiniz. Geleneksel kalıplar içine hapsolan aile şirketleri, uzun vadede başarılı olamazlar.

ii) Birbirine görüşlerine saygılı olmak: Aile şirketlerine ilişkin unsurlar ortaktır ve tahmin edilebilir. Farklı olan bunların, farklı aile bireyleri tarafından farklı algılanış biçimleridir. Aile şirketleri ister Amerika'da, ister Afrika'da, ister Asya'da isterse Avrupa'da olsun, ister Hristiyan, ister Müslüman isterse Budist olsun, veyahut ister üretim, ister ticaret ister turizm isterse inşaat işinde olsun, sorunlar hep aynıdır, ancak algılanış biçimleri farklıdır. Akıllı aileler, ailedeki görüş farklılıklarını telafi edilemez kişilik bozukluğu olarak değil, tartışılabilir, meşru bakış açısı olarak değerlendirirler ve birbirlerinin farklı görüşlerine saygılı olurlar.

iii) Özgür ve demokratik iletişim ortamı: Bazı aile şirketlerinde, yönetimdeki aile bireyleri, birbirleri ile iletişim kurma konusunda, kurumsal şirketlerdeki kadar özgür ve demokratik bir ortam bulamayabilirler. İş sahibi başarılı aileler, özgür ve demokratik iletişimi sağlayabilmek için, birtakım sistemler, yapılar oluştururlar, bu şekilde işin içinde olan(olmayan) aile fertlerinin görüşlerini, duygularını, fikirlerini özgürce açıklayabilmeleri için ortam sağlarlar.

iv) Planlama: Devamlılık için planlama şarttır. Aile şirketlerinin devamlılığı sağlayabilmek için 4 farklı düzeyde planlama yapmaları önemlidir.

Bunlar;

- a) İş ile ilgili stratejik planlar,
- b) Aile bireylerinin liderlik ve kariyer planlamaları,
- c) Aile bireylerinin şahsi servetleri ile ilgili planlar,
- d) Ailenin devamlılığın sağlanmasıyla ilgili planlar.

Bazen iş ile ilgili stratejik planlar, ailenin devamlılığı ile ilgili planlar ile çelişiyormuş gibi görünse de unutulmamalıdır ki, aile işletmeleri gücünü ailenin ortaklaşa yarattığı enerjiden ve bağlılıktan alır.

v) Bağlılık ve sorumluluk: Aile şirketlerinde en temel unsur, aile işine, ailenin amaçlarına, ailenin geleceği ile ilgili yapılan planlara bağlılıktır. Aile içinde, birbirine bağlılık ve sorumluluk kültürü oluşturulamazsa, bir aile şirketinin çocuklar ve torunlar için ayakta kalabilmesi mümkün olmaz.

5.3. Aile Şirketlerinde 4 Önemli Politika

i) Öngörü politikaları: Politikalar gereksinimler duyulmadan hazırlanmalıdır. Bu şekilde, zamanı gelince alınan önlemler kişisel olmaktan çıkar, politika gereği düzenlenmiş olur. Örneğin, gençlerin üniversiteden çıkınca başka bir işyerinde en az 3 yıl çalışmalarının şart olması veya yüksek lisans yapmalarının şart olması gibi, çok önceden belirlenen politikalar net olmalıdır.

ii) Esas amacın anlamını doğru tanımlamak: Örneğin, neden bu kadar çok çalışıldığı, neden çeşitli konularda politikalar geliştirildiği gibi, her ailede amacın anlamı farklı olabilir. Bazı aileler sadece topluma hizmet etmek ister, bazı aileler için değer yargılarının gelecek kuşaklara aktarılması önemlidir. Amacın anlamının bütün aile fertleri tarafından anlaşılması, aile işletmelerinin zor zamanlarda zorlukların üstesinden gelmelerini kolaylaştırır.

iii) Süreç-sorunları çözmek için düşünme, bir araya gelme ve tartıma: İşletme sahibi aileler, her zaman önceden hangi politikalara ihtiyaç duyacaklarını kestiremeyebilirler. Bazen sürpriz sorunlarla karşılaşabilirler. Ailenin bir araya gelip, iyi bir iletişimle, tartışarak, herkesin kazanabileceği çözümler üretebilmesi, ailenin iyi bir süreç yönetimi yapabildiğini gösterir.

iv) İyi bir ebeveyn olmak: Aile işletmelerinin esas amacının gelecek nesillere iş yaratmak olduğu bir gerçektir. Ancak unutmamak gerekir ki ebeveynler rol modellerdir ve ebeveyn olarak da rol model olma sorumlulukları vardır.

6. SONUÇLAR

Doğaltaş sektöründe 250 ve üzeri çalışanı olan, yıllık net satışları 12.500.000 \$ ve üzeri olan, 125.000 \$ ve üzeri ARGE-ÜRGE-İnovasyon bütçesi ayırabilen, markalaşmak isteyen aile şirketleri aşağıdaki aşamalarla kurumsallaşmayı deneyebilir:

1) Aile Anayasası Oluşturmak: Aile şirketlerinde, kurumsallaşma amacı olsun olmasın, tüm aile bireyleri tarafından kabul edilen iyi bir “aile anayasası” olmalıdır. İyi bir aile anayasası olmadan ve işlerliği test edilmeden yapılacak kurumsallaşma girişimleri başarısız olmaya mahkumdur.

2) Yönetim Kurulunun Yapısını ve Görevlerini Değiştirmek: Yönetim Kurulu toplantılarında aile meseleleri yerine, işe odaklanarak objektif profesyonel toplantılar yapabilmek üzere, aile bireylerinden oluşan yönetim kuruluna en az 2 profesyonel üye eklenmelidir. Tercihen, üyelerden biri mali-idari konularda, diğeri teknik konularda deneyimli birer uzman olmalıdır. Ancak, uzman

görüşlerine göre, yönetim kuruluna alınacak profesyonel üyeler bankacı, avukat veya mali müşavir olmamalıdır. Şirkette bankacı, avukat, mali müşavir kökenli insanlara ihtiyaç varsa, bu kişiler yönetim kurulunda değil, ancak “DANIŞMAN” olarak çalışmalıdırlar. Yönetim kuruluna alınacak profesyonel üyelerde aranacak en önemli özellikler, analitik zekâlı, inovatif düşünceli, vizyoner kişilikli olmalarıdır.

3) En Uygun Genel Müdürü Atamak: Profesyonellerin de bulunduğu Yönetim Kurulu, her türlü icra görevlerini genel müdüre devretmelidir. Genel müdür, icra konusunda birlikte çalışacağı bir icra kurulu oluşturmamalıdır. İcra kurulu oluşturma işine yönetim kurulu müdahale etmemelidir. Ancak, genel müdürü danışır, icra kurulu oluşturma konusunda yönetim kurulu fikir verebilir. Atanan genel müdür, aile içinden dahi olsa (ki tavsiye edilmez), asla yönetim kuruluna alınmamalıdır. Çünkü yönetim kurulu, icranın başından, yani genel müdürden hesap soran makamdır. Bu nedenle, genel müdürün aynı zamanda yönetim kurulu üyesi olması, genel müdürden objektif hesap sorulabilmesini kısıtlar.

Çalışan sayısı 50–249 arası, yıllık net satışları 2.500.000-12.500.000 \$ arası, ARGE–ÜRGE–İnovasyon (veya markalaşma) bütçeleri 25.000-125.000 \$ arası olan orta büyüklükte doğaltaş şirketleri de çok isterlerse, kurumsallaşma girişiminde bulunabilirler. Ancak gerek finansal güç gerekse insan kaynakları bakımından, kurumsallaşma girişimlerinin başarılı olma şansı daha düşüktür. Bu nedenle, orta büyüklükteki aile şirketlerinin, kurumsallaşma çalışmalarını, şirketi büyütme çalışmaları ile birlikte ele alması daha doğru olur.

Orta büyüklükte aile şirketleri de genel müdür atayabilir. Ancak, yönetim kurulu üyelerinin icra görevlerini tamamen genel müdüre ve genel müdürüm başkanlığını yaptığı icra kurulunu tamamen devretmeleri için, büyük ölçekli bir şirket haline gelmeyi sağlamaları en önemli hedefleri olmalıdır. Kurumsallaşma konusunda tereddütleri olan, bu konuda fazla ileriye girmek istemeyen aile şirketlerinin sürdürülebilirliği açısından alternatif çözüm, şirketin inovatif ve aile bireylerine heyecan verici hale getirilmesidir. İnovatif yeni ürünler, yeni pazarlar aile bireylerinin işe ilgisini artırır, özellikle 3’üncü kuşakların işe sahip çıkma olasılığını çok yükseltir.

KAYNAKLAR

URL 1:

<https://kosano.org.tr/wp-content/uploads/2017/10/TAiDERAileisletmeleriDernegisununmu.pdf>

URL 2: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/224454>

URL 3:

https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/261059/yokAcikBilim_10307117.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

URL 4:

<https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Do%C4%9Fal%20Ta%C5%9Flar%20Sekt%C3%B6r%20Raporu%202021.pdf>

URL 5:

<https://ticaret.satso.org.tr/haber/1819/sirketlerin-yuzde-80i-ailevi-nedenlerle-cokuyor.aspx>

URL 6:

<https://www.youtube.com/watch?v=C45RrbLCnyI>

DAVETLİ KONUŞMACILAR

INVITED SPEAKERS

8.Bölüm

CIRCULAR ECONOMY IN MARBLE SCRAPS AND GOOD PRACTICES

N. Careddu^{1,2,*}

¹ *Università degli Studi di Cagliari, Department of Civil, Environmental Engineering and Architecture, via Marengo 3, 09123 Cagliari, Italy*

² *Institute of Environmental Geology and Geoengineering, IGAG, CNR, Cagliari, Italy*

* ncareddu@unica.it

ABSTRACT

Circular economy (CE) represents a strategic paradigm for the transition toward a sustainable industrial model, grounded in waste reduction, reuse, and resource enhancement. However, CE actions should be implemented by companies not only for ethical and social reasons, but above all to achieve economic benefits. Within the natural stone industry, this approach translates into the optimization of the entire material life cycle, from extraction to processing, and ultimately to waste/scraps management. The distinctive features of the sector—characterized by a high volume of by-products and scraps—make the adoption of circular practices particularly relevant. These include the reuse of stone materials in construction and the recovery of useful mineral species for industrial applications. The paper is focussed on the types and characteristics of scraps derived from carbonaceous stones (marble and limestone) quarries and processing plants with particular emphasis to the microfine scraps. Subsequently, real-world case studies of stone material reuse will be presented. Finally, the concept of the storage area will be examined, reframing it not as a landfill, but rather as a temporary storage dedicated to the enhancement of secondary raw materials.

Keywords: natural stones, calcium carbonate, circular economy, quarrying

INTRODUCTION

The dimension stone industry has experienced a global net quarrying production of 145 million tonnes in 2023 (Montani, 2025). It is important to note, however, that global gross quarrying production reached almost 316 million tonnes, of which nearly 48% was classified as quarrying waste.

Regarding stone-processing activities, global production has reached 86 million tonnes, resulting in the generation of 59 million tonnes of processing scraps. Overall, this means that for every 100 tonnes of material extracted, approximately 71% ultimately becomes waste on a global scale; Figures 1 and 2 summarize the current situation. Moreover, Figure 1 shows a continuous growth with exception of the last data. Such a high waste-to-product ratio constitutes a major environmental, economic, and social challenge (Careddu, 2019): this amount should find an alternative use to simply being sent to landfill.

By the way, it should be stressed that there are countless virtuous examples of companies that increase the overall yield by allocating higher amount of scraps to by-products (as aggregates, micronised products, opus incertum, etc.).

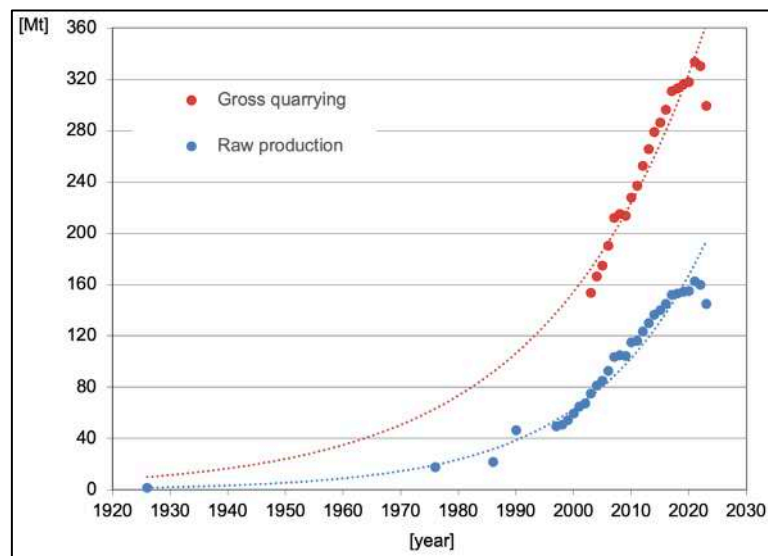


Figure 1. World stone industry: raw production and gross quarrying (up to and including 2023). Own elaboration based on data from Montani (2025).

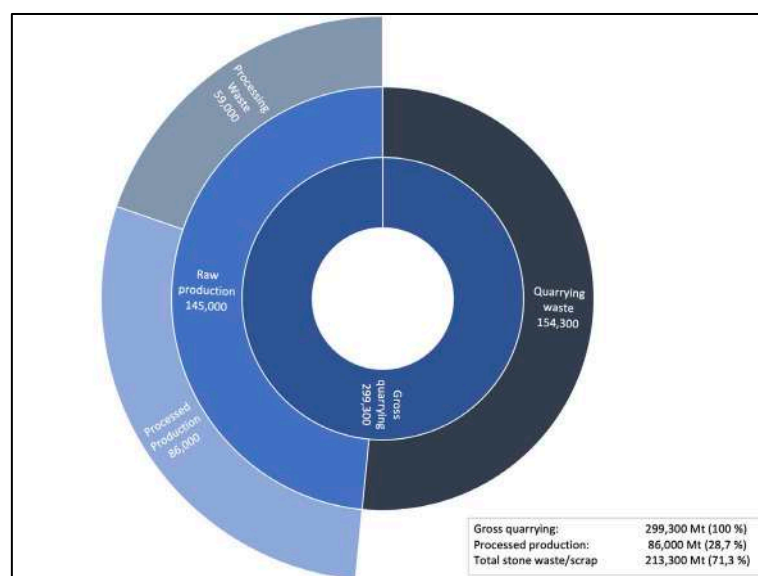


Figure 2. Dimension stone world production in 2023. Own elaboration based on data from Montani (2025).

From a commercial standpoint, carbonaceous stones (including marble, limestone and travertine) represent 55,4 % of total dimension-stone production, followed by granites (41,2 %) and a minor share of other lithologies such as basalt, quartzite, trachyte, and sandstone. Recent statistics (Montani, 2022) estimate that the annual production of carbonaceous stone scraps from the dimension stone industry amounts to roughly 130 million tonnes, including an unknown amount destined for aggregates, powders and other uses. The main producers of carbonaceous stones are Turkey, Italy, Greece, China and India.

Over the past decades, the marble industry has undergone strong development, driven mainly by the worldwide increasing of numerous small and medium-sized enterprises aimed to both quarrying and subsequent block-processing. The disposal of produced waste/scraps represents a substantial economic

burden for these companies: non-commercial blocks (due to insufficient quality as defective and/or unshaped blocks that are not economical), rubble (*pezzame*), broken slabs and tiles (*cocciamé*) and fine scraps (*marmettola*, sludge) have traditionally been considered as waste destined for landfill. Such an approach is increasingly incompatible with current environmental protection requirements and the growing emphasis on resource sustainability.

Consequently, numerous studies have recently investigated opportunities for re-use of those scraps; regarding the not-commercial blocks, they can be used as reef blocks and breakwaters, retaining embankments in rivers, lakes and as material for retaining walls. Recently, a nice and interesting example has been shown in one of the quarries in Orosei (eastern Sardinia), where the use of non-economic blocks has been proposed to build barriers against bottom-trawling (UniCA, 2023a).

Rubble is intended as blocks smaller than 1 m; they can be used as retaining material and, by crushing for aggregates production as well as to manufacture higher added-value products. A high value-added product is a good that, compared to the cost of the raw materials used to produce it, has a higher market value. For example, aquarium sands can reach the price of 12 €/kg, which is a price that is 50 times higher than that of classic commercial aggregates. Same things for the broken slabs and tiles which can be used also to produce *opus incertum* for outdoor paving. In any case, the economic transport radius must be carefully assessed emphasised below.

When talking about fine scraps, we must consider where they are produced. *Marmettola* are the quarry's fine scraps, and it is not so easy to reuse it. Infact, it is necessary to assess the technology used to produce it (drilling, diamond wire, chain saw for delimiting the bench or mounted on a backhoe loader for cutting blocks). The scraps that they produce are different in shape and grain size. The real problem is the oil/hydrocarbon pollution due to the working equipment in the quarry. This is why this kind of scraps is not easy to be reused. However, by combining these scraps with green binders, it is possible to bypass the problem of pollution (UniCA, 2023b).

The second type of fine scraps are the processing sludges, that is, the micronized material recovered under the filter press from the water treatment plants. It should be considered not as waste but as primary or secondary raw materials to be used in other production processes (Marras et al., 2010a). Current research highlights the potential of carbonaceous sawdust as a replacement for costlier raw materials in building applications (Singh et al., 2017). Various authors have demonstrated the feasibility of incorporating marble-industry residues into concrete blends (Marras et al., 2010b; Martínez-Martínez et al., 2020), self-compacting concrete (Topçu, et al., 2009), concrete paving blocks (Gencel et al., 2012), cement-based adhesives (Büyüksağış et al., 2017), gypsum plasters (Marras et al., 2017), and cementitious ceramics (Marvila et al., 2021). Additional studies explored applications in red ceramics (Devant, 2011) and brick manufacturing (Marras et al., 2010a; Cobo-Ceacero, 2019), as well as in porcelain stoneware (Díaz and Torrecillas, 2007), engineered stone slabs (Lee et al., 2008), and composite materials (Pappu et al., 2020). However, all the applications cited above are considered lower-added value products and strongly affected by the economic transport radius. Several studies (Careddu and Sanciú, 2008) have demonstrated how various aggregates products, even high-quality ones, produced by crushing quarry scraps, could not be sold more than 50 km away from the quarry. This is another important detail to keep on mind because it is tied to economy of the production.

When considering the sludge coming from high CaCO₃ grade marbles and/or limestones, it should be considered that the free on board (FOB) price of calcium carbonate depends on particle sizes, CaCO₃ grade and, for certain uses, colorimetry. Table 1 shows the chemical analysis of Carrara marble and Orosei limestone: they could be both considered as pure carbonates. Moreover, as shown in Figure 3, the average size of the microfine scraps is approximately 4-5 µm.

Table 1. Chemical composition of Carrara marble and Orosei limestone

Chemicals	Carrara marble [%]	Orosei limestone [%]
CaO	53.66	54.90
MgO	0.35	0.46
MnO	0.02	0.005
SiO ₂	3.40	0.08
Al ₂ O ₃	0.33	0.08
Fe ₂ O ₃	0.13	0.04
TiO ₂	0.01	0.005
P ₂ O ₅	0.003	0.02
Na ₂ O	0.03	0.02
K ₂ O	0.03	< 0.01
LOI	41.86	43.82
TOT	99.82	99.43

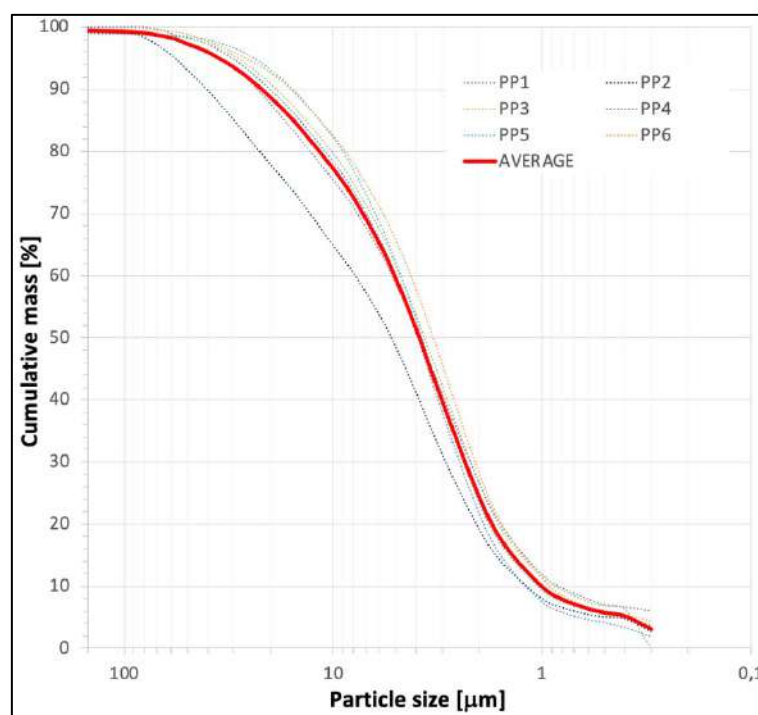


Figure 3. Particle size distributions of Orosei limestone sludge collected in six different stone-processing plants (PP) and average curve.

This refers to a market value (Table 2) of more than 100 \$ per tonne for something that is often thrown away in landfill. For this reason, it is necessary to think seriously to sell this microfine scrap for the manufacture of high added-value industrial products.

Table 2. Current FOB prices for ground calcium carbonates (GCC) (updated after Harben, 2002).

Grade	Mean particle size [μm]	Top size [μm]	FOB price, bagged [€/t]
Coarse	27	200	35 - 43
Medium	12 - 22	50 - 100	43 - 60
Fine	3 - 10	15 - 35	85 - 120
Ultrafine	<1 - 2	5 - 10	155 - 260

Calcium carbonate is used in a huge number of industrial processes which, obviously, require high quality standards for the CaCO_3 supplied (Careddu et al., 2014): cosmetics and pharmaceuticals have stricter calcium carbonate standards than cement production.

THE PHILOSOPHY FOR A REAL CIRCULAR ECONOMY

What is CE? The Ellen MacArthur Foundation (2010) gave the following definition: “The circular economy is a system where materials never become waste and nature is regenerated. In a circular economy, products and materials are kept in circulation through processes like maintenance, reuse, refurbishment, remanufacture, recycling, and composting”.

However, in the real-world things tend to unfold differently; Figure 4 show a cycle in where each stage produces waste. Turning back time, up until fifteen years ago, these diagrams were simple cycles, without those little arrows pointing outwards to indicate waste production.



Figure 4. An example of a CE diagram that emphasises the technological aspects of the circular economy. (Courtesy by EIT RawMaterials GmbH); www.eitrawmaterials.eu.
Copyright © 2022 EIT RawMaterials.

What lies behind the concept of the “circular economy”? The term “economy” is still there! It means that the CE should not be pursued simply because it is fashionable, but also – and most importantly - because it must bring economic benefits to the company or community that adopts this practice.

Following this philosophy, the first question a company must ask itself is: “Does our company produce waste/scraps?”. If yes, the second question is: “Do we want to find ways to recycle/reuse/sell it?”.

If a company answers yes to the second question, then it should question whether:

- the company knows the characteristics of its scraps (size, amount, petrography/mineralogy, chemistry, physical/mechanical properties, colour, etc.);
- the company knows what the scraps could be used for.

At this stage, undertaking a comprehensive and methodologically rigorous market analysis would constitute a strategically advantageous course of action. In fact, whilst producing something is easy,

producing quality items is harder, albeit feasible. The challenge is likely to be the distribution of the product, and its marketing.

Talking about circular economy applied to real cases, with particular attention to carbonate rocks as marbles and limestone, companies have to remind themselves that their goal is to make a profit; they must decide whether to sell their scraps for the manufacture of low value-added products (that is, building and construction products), or for high value-added products (as paper production, for instance), or for both by diversifying their sales lines (Careddu and Marras, 2015).

Surely, as cited in the introduction, it is proved that using the microfine scraps from marble/limestone processing in the mix design for manufacturing different building products, improves the absorption performance of clay bricks, the compressive strength of the cement conglomerate and both the flexural strength and adhesion of the gypsum plaster.

Having said about the widespread uses of calcium carbonate in manufacturing higher value-added industrial products, some examples can be cited. For instance, Marras and Careddu (2018) and Marras et al. (2022) compared the Orosei limestone microfine scraps with the calcium carbonate standards required in tires production and white washable paints for walls production. The production tests first, met the requirements for featuring better than the commercial calcium carbonate. The assessment of the quality of the products made with the use of limestone scraps gave unexpected results: by working in cooperation with two companies (a tyre factory and a paint factory) it was found out that the rubber had higher than expected strength, and the paint had higher than expected durability and resistance to scrub.

Another interesting high added value application, which is currently ongoing with the support of the Italian Ministry for the Environment and Energy Sustainability, is the capture of heavy metals in wastewater by using marble processing microfine dust through surface functionalization (Tuveri et al., 2025). With this technique it is possible to capture heavy metals on the surface of limestone/marble dust. The study is only at the beginning, but it is quite promising; researcher have already achieved excellent results in capturing cadmium and chromium.

Some other considerations can be drawn on how to use marble/limestone scraps, that is to say: follow the money! Companies must follow the market demand.

With regard to paper manufacture, calcium carbonate is required by the industry for paper filling and paper coating, and it is essential for a high press room performance, to save ink, obtain print quality, and to market printed products at competitive prices.

Fine calcium carbonate is used for rock dusting which is the normal preventive for dust explosions because the rock dust absorbs heat from the combustion of coal particles and prevents the transfer of combustion from particle to particle in a dust cloud (i.e., it takes away the degree of confinement necessary for an explosion).

The number of pets is increasing worldwide. The reason of the increase is because of a higher and higher demand for cat litter; calcium carbonate is used in cat litter, often as an alternative to or in combination with clay, to provide benefits like odour control, clumping, and a softer texture.

Finally, the demand for natural products to combat plant parasites is also on the rise. Kaolin was used initially, despite its cost, whereas calcium carbonate is undoubtedly cheaper.

A CHANGE OF PARADIGM: FROM LANDFILL TO TEMPORARY STORAGE OF SECONDARY RAW MATERIALS

However the company decides to use its scraps, it will find that it is essential to organise as better as possible the work in the quarries as well as in the stone-processing plants. This means that, with a view to recovering and reusing scraps, the company cannot simply dump everything in landfill in a disorderly manner, as is often the case. That method of dumping marble waste/scraps is no longer compatible with the concept of sustainable development! Companies must change their paradigm from landfill to temporary storage of secondary raw materials.

As an example, the project of a Consortium Centre for development and logistics of stone materials for secondary processing can be cited (Careddu et al., 2013). Following the “Raw Materials Initiative” (Commission of the European Communities, 2008), which aims to identify the critical needs for raw materials and strategies to support economic development and employment in the EU itself, the project has been proposed in the Orosei limestone producing area (eastern Sardinia, Italy).

The project has different goals: 1) the maximum valorisation of the Orosei limestone, with the completion of the production chain and the enhancement and reuse of the scraps; 2) the environmental recovery of the area to be used for both production and logistics of the Orosei Marble Consortium, and for the temporary storage of materials assigned to the primary and/or secondary processing; 3) the socio-economic development of the region; 4) the building of multipurpose services centre for:

training activities aimed at international marketing and processing advanced technologies for stone quarrying and processing;

a library specialized in Dimension Stone sector;

an archaeological museum where fossils will be displayed: countless fossils have been found in those quarries. There is an agreement between the companies and the archaeological heritage authority whereby, if a fossil is found, the company stops work, calls the authority and archaeologists rush to collect evidence. After that, quarrying work can resume;

a lecture room and events concerning mainly the activities of the Orosei industrial district.

Lastly, in special outdoor areas will be displayed, following an historical route, equipment and plants as witnesses of industrial archaeology also to report the technological development of quarrying and stone processing in Orosei from late Sixties till today.

This is very important because raising public awareness about mining/quarrying activities is strategic and essential.

CONCLUSIONS

The implementation of circular economy principles within the marble and limestone industry represents a strategic opportunity to reconcile environmental sustainability with economic growth. The requalification of scraps—ranging from non-commercial blocks to microfine sludges—demonstrates how waste can evolve into valuable secondary raw materials, supporting both industrial innovation and territorial development. The valorisation of high-purity calcium carbonate residues for advanced applications, including construction materials, paints, rubber, and wastewater treatment, confirms the potential of by-products as high added-value resources. However, achieving a fully circular model requires not only technological adaptation but also a profound change in mindset: storage areas must be reinterpreted as temporary repositories for reusable materials rather than permanent landfills. The establishment of consortium-based logistics and research centres, as exemplified in the Orosei initiative, further highlights how cooperation, knowledge transfer, and planning can transform an environmentally critical sector into a model of sustainable industrial excellence.

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to thank the organizing committee of MERSEM 2025 and, in particular, the Professor I.S. Büyüksağış. for inviting him as a keynote speaker The studies cited here were supported by the following fundings:

Autonomous Region of Sardinia (Grant number 124/2015, L.R. of 7th August 2007, n. 7);

Italian Ministry of the Environment and Energy Sustainability (call: Bando per il cofinanziamento di progetti di ricerca volti allo sviluppo di tecnologie per la prevenzione, il recupero, il riciclaggio ed il trattamento di rifiuti non rientranti nelle categorie già servite da consorzi di filiera, all'ecodesign dei prodotti ed alla corretta gestione dei relativi rifiuti – Edizione 2021).

REFERENCES

Büyüksağış, I.S., Uygunoglu, T., Tatar, E. (2017). Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. *Constr. Build. Mater.* 154,734–742.

Careddu, N. (2019). Dimension stones in the circular economy world. *Resources Policy*, 60, 243–245.

Careddu, N., Marras, G. (2015). Marble processing for future uses of CaCO₃-microfine dust: a study on wearing out of tools and consumable materials in stoneworking factories. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, 36:3, 183-191.

Careddu, N., Marras, G., Siotto, G. (2014). Recovery of sawdust resulting from marble processing plants for future uses in high value added products. *Journal of Cleaner Production* 84, 533-539.

Careddu, N., Sanciu, G.A. (2008). Produzione e commerciabilità di inerti prodotti dagli sfridi delle cave di roccia ornamentale nel polo estrattivo Buddusò-Alà dei Sardi e raggio economico. *Quarry and Construction*, 549, pagg. 20-28. Ed. Pei (in Italian).

Careddu, N., Siotto, G., Siotto, R., Tilocca, C. (2013). From landfill to water, land and life: the creation of the Centre for stone materials aimed at secondary processing. *Resources Policy* 38, 258–265.

Cobo-Ceacero, C.J., Cotes-Palomino, M.T., Martínez-García, C., Moreno-Maroto, J.M., Uceda-Rodríguez, M. (2019). Use of marble sludge waste in the manufacture of eco-friendly materials: applying the principles of the Circular Economy. *Environmental Science and Pollution Research* 26 (35), pp. 35399-35410.

Commission of the European Communities (2008). The raw materials initiative - meeting our critical needs for growth and jobs in Europe. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, Brussels, COM (2008) 699 final, 4.11.2008.

Devant, M., Cusidó, J.A., Soriano, C. (2011). Custom formulation of red ceramics with clay, sewage sludge and forest waste. *Appl. Clay Sci.* 53, 669–675.

Díaz, L.A., Torrecillas, R. (2007). Porcelain stoneware obtained from the residual muds of serpentinite raw materials. *J. Eur. Ceram. Soc.* 27, 2341–2345.

EIT RawMaterials GmbH (2024). Link: www.eitrawmaterials.eu (last accessed: November 7th, 2025).

Gencil, O., Ozel, C., Koksall, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., Brostow, W. (2012). Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *J. Clean. Prod.* 21, 62–70.

Harben, P.W. (2002). *Industrial Minerals HandyBook*, a guide to markets, specifications & prices (4th ed.). Industrial Minerals Information Pub., Surrey, UK.

Lee, M., Ko, C., Chang, F., Lo, S., Lin, J., Shan, M., Lee, J. (2008). Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. *Cem. Concr. Compos.* 30, 583–587.

Marras, G., Careddu, N. (2018). Sustainable reuse of marble sludge in tyre mixtures. *Resources Policy* 59 77-84.

Marras, G., Careddu, N., Internicola, C., Siotto, G. (2010a). Recovery and reuse of marble powder by-product. In: *Proc. Global Stone Congress 2010*, 2-5 March 2010, Alicante, Spain. S3-01. Ed. AIDICO (Instituto de la Construcción), València. ISBN: 978-84-614-1147-4. Also in *Marmomacchine Magazine*, n. 214, 2010, pagg. 34-48. Ed. Promorama, Milan, Italy. ISSN: 0392-6303.

Marras, G., Careddu, N., Siotto, G. (2017). Filler calcium carbonate industrial applications: the way for enhancing and reusing marble slurry. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Special Issue 2 © Sapienza Università Editrice, Roma. Pp. 63-77.

Marras, G., Carcangiu, G., Meloni, P., Careddu, N. (2022). Circular economy in marble industry: From stone scraps to sustainable water-based paints. *Construction and Building Materials* 325, 126768.

Marras, G., Siotto, G., Parra, J.L., Careddu, N. (2010b). Potential applications of waste material deriving from marble processing plants. In: Ersoy, M., Çelik, M.Y., Yeşilkaya, L. (eds.), *Proceedings of the 7th International Marble and Natural Stones Congress of Turkey (Mersem VII)*, 14-15 October 2010, Afyonkarahisar, Turkey. pg. 55-61. ISBN: 978-605-01-0023-5.

Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., Eliche-Quesada, D., Sanchez-Soto, P.J., Christogerou, A., Kanellopoulou, D.G., Angelopoulos, G.N. (2020). New waste-based clinkers for the preparation of low-energy cements. A step forward toward circular economy. *International Journal of Applied Ceramic Technology* 17(1), pp. 12-21.

Marvila, M.T., de Azevedo, A.R.G., Alexandre, J., Colorado, H., Pereira Antunes, M.L., Vieira, C.M.F. (2021). Circular economy in cementitious ceramics: Replacement of hydrated lime with a stoichiometric balanced combination of clay and marble waste. *International Journal of Applied Ceramic Technology* 18(1), pp. 192-202.

Montani, C. (2022). *XXXIII World Marble and Stones Report 2022*. Aldus Casa di Edizioni in Carrara, Italy.

Montani, C.C. (2025). Marbles and stones: current trends and development prospects in the global market. In: *Directory 2025*, Associazione Italiana Marmomacchine (Ed.), 28-95. Milan, Italy.

Pappu, A., Chaturvedi, R., Tyagi, P. (2020). Sustainable approach towards utilizing Makrana marble waste for making water resistant green composite materials. *SN Applied Sciences* 2(3), 347.

Singh, M., Srivastava, A., Bhunia, D. (2017). An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. *Constr. Build. Mater.* 134, 471–488.

The Ellen MacArthur Foundation (2010). Link: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org> (last accessed: November 7th, 2025).

Topçu, I.B., Bilir, T., Uygunoğlu, T. (2009). Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 1947–1953.

Tuveri, E., Biggio, D., Liscia, S., Fantauzzi, M., Elsener, B., Ennas, G., Porcedda, G.E., Careddu, N., Rossi, A. (2025). Sardinian limestone and Carrara marble by XPS. *Surf. Sci. Spectra* 32, 014010.

UniCA (2023a). National Geographic e Università: insieme per il progetto Poseidone. In UniCA magazine, July 23rd, link: <https://magazine.unica.it/national-geographic-e-universita-insieme-per-il-progetto-poseidone/> (last accessed: November 4th, 2025). In Italian.

UniCA (2023b). Premiato il Progetto Solidum. In UniCA magazine, October 2nd, link: <https://magazine.unica.it/premiato-il-progetto-solidum/> (last accessed: November 5th, 2025). In Italian.

MINE TECHNOLOGIES FOR GEO-SENSING AND MODELLING AND THEIR APPLICATIONS IN MARBLE AND NATURAL STONE QUARRIES

M. Elmouttie^{1,*}, W. Stasinowsky¹, B. Zhou¹, Y. Duan¹, K. Hoehn¹

¹*Mineral Resources, CSIRO, Australia*
(*Corresponding Author: marc.elmouttie@csiro.au)

ABSTRACT

This paper explores advanced mine technologies for geo-sensing and structural modelling, with applications in marble and natural stone quarries. Techniques such as discrete fracture network (DFN) modelling, probabilistic design, and high-resolution sensing are discussed. The integration of geophysical sensing and computational modelling enables improved quarry design reliability and yield optimisation. Mining based case studies demonstrate the use of DFN-based analysis for structural stability and blast design, supported by sensing technologies including borehole radar and distributed fibre optics. These innovations have the potential to be deployed to enhance safety, reduce uncertainty, and optimise block recovery in dimension stone operations.

Keywords: Discrete fracture networks, geophysical sensing, marble quarry yield optimisation

INTRODUCTION

Australia's mining industry is one of the most significant contributors to the national economy, accounting for around 13% of GDP and underpinning export revenues (International Trade Administration 2025). The country hosts hundreds of operating mines across diverse commodities, including iron ore, gold, coal, copper, bauxite, lithium, nickel, zinc, rare earths, and uranium (Geoscience Australia 2025). These operations are geographically concentrated as shown in Figure 1. Although relatively small, dimension stone mining in Australia focuses on extracting high-quality stone for building and decorative purposes, with each state contributing distinct materials. South Australia is the leading producer, offering granite, slate, limestone, marble, and sandstone from regions such as the Eyre Peninsula and Mount Lofty Ranges. Victoria is renowned for its extensive bluestone (basalt) quarries, particularly around Melbourne and the Western District, and also produces granite, sandstone, marble, and slate. Other states, including New South Wales, Queensland, and Western Australia, supply sandstone, granite, and slate, though reporting is less detailed. Tasmania is notable for dolerite, marketed as bluestone, while the Northern Territory has limited but significant granite and marble operations. Dimension stone is widely used in building facades, paving, monuments, and interior decoration.

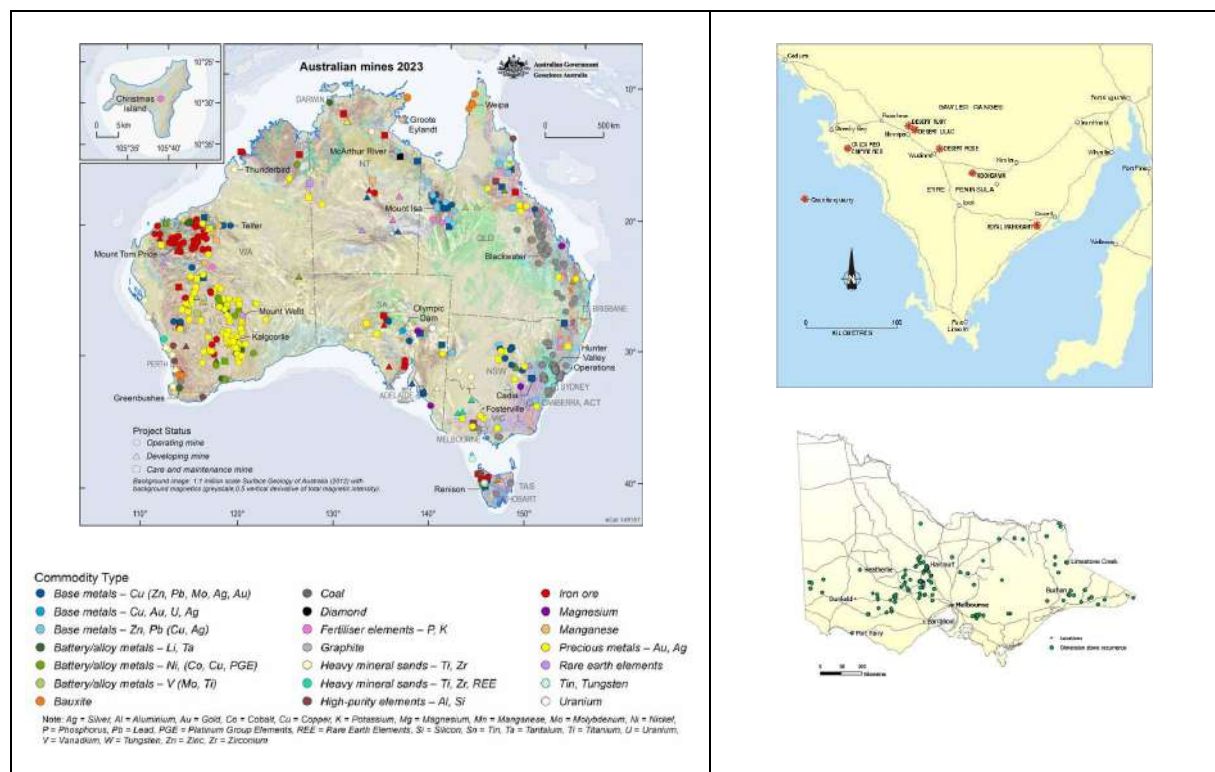


Figure 3. (left) Australian mines colour coded by commodity type (Geoscience Australia 2023) and (right) locations of dimension stone quarries in South Australia (Energy Mining 2025) and Victoria (Resources Vic, 2025)

Although not widely deployed in the dimension stone industry, there are a number of geosensing and modelling techniques that have been developed for the mining industry that are potentially of value, particularly in the areas of mine design optimisation and geotechnical design.

GEOSENSING SUPPORTED PROBABILISTIC DESIGN AND SIMULATION

CSIRO, in collaboration with Rio Tinto, has pioneered a systems-based approach to reliability-based design that addresses uncertainty across the entire slope design process (Figure 2 - Creighton et al, 2022). This methodology incorporates formal quantification and propagation of uncertainty through a transparent and auditable framework, ensuring robust and defensible design decisions. While initially developed for open-pit slope stability, the approach is applicable to underground mine design, tailings storage facility (TSF) design, and quarry operations, providing a comprehensive tool for managing geotechnical risk in complex environments.

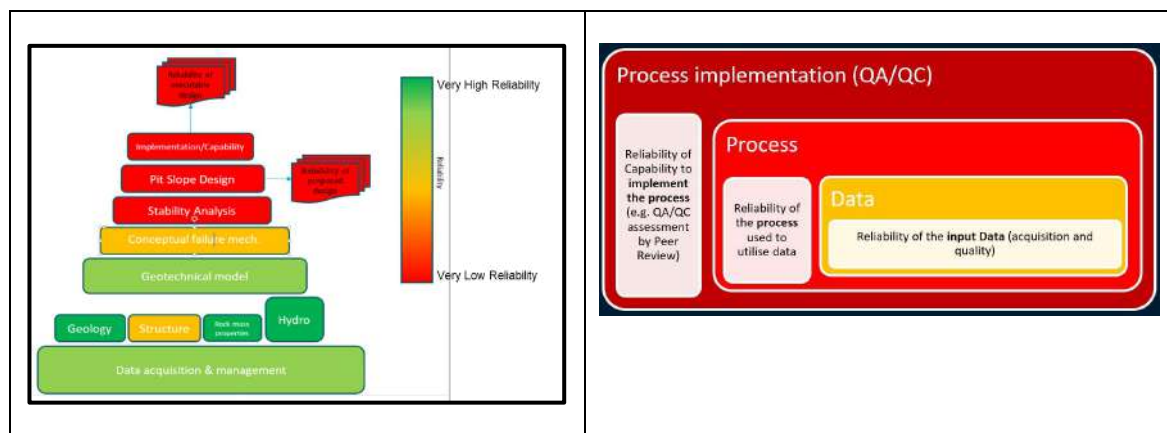


Figure 4. Slope design reliability hierarchy (left) and conceptual model of nested reliabilities in design components (right). (Creighton et al 2022)

For both geotechnical and quarry optimisation considerations, structural modelling is foundational and involves characterizing key geological features that influence rock mass behavior. These include faults, joints, fractures, bedding planes, and foliation. Accurate representation of these features is essential for reliable structural models, as they govern stability and failure mechanisms as well as rock and stone quality assessment in quarries and mines. Key attributes of interest include location within the geotechnical domain, orientation, persistence, spacing, and surface properties such as roughness, waviness, and infill. Common simplifications during characterization often involve assumptions about centroid distributions, planarity, shape, and the number of discontinuity sets, as well as neglecting isotropic components (Elmouttie et al., 2012). While these assumptions can simplify modelling, they introduce uncertainty that must be managed through robust design approaches. Comprehensive understanding of discontinuity characteristics enables more reliable structural models and supports advanced methods such as discrete fracture network (DFN) analysis for quarry and mine design.

The Siromodel software package (CSIRO 2025) was developed to provide an accessible tool for geotechnical engineers conducting first-pass analyses of slope stability in open-cut mines. Its primary motivation was to enable DFN-based analysis using structural data derived from digital mapping, while also quantifying uncertainty. The software's core functionality includes DFN generation, polyhedral modelling (Elmouttie et al, 2010), rigid block stability analysis, and Monte Carlo simulation and analysis (Figure 3), offering a comprehensive platform for probabilistic geotechnical design and risk assessment.

DFN generation within Siromodel offers robust functionality for representing complex fracture networks in rock masses (Figure 4). The software supports both deterministic and stochastic approaches, enabling flexible modelling of structural variability. Sampling methods include scan-line, areal, and volumetric techniques, ensuring comprehensive data integration. Numerous statistical distributions can be applied to control fracture size, orientation, and spacing, while structural domains allow for localized variability. Advanced features include support for curved structures through triangulated surfaces and joint set termination, providing realistic representation of geological conditions. These capabilities underpin accurate stability analysis and probabilistic design workflows for quarry and mine applications.

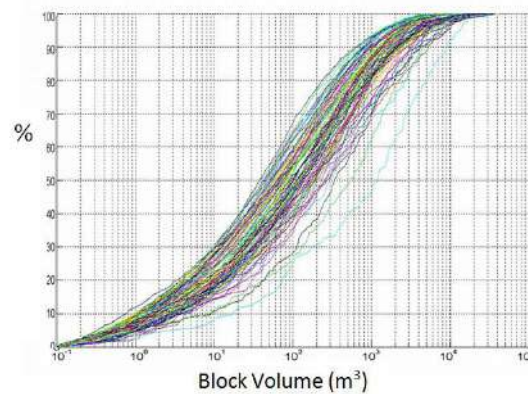


Figure 5. Example Monte Carlo simulation of in-situ block size distribution

Siromodel extends its capabilities beyond DFN generation with advanced polyhedral modelling and stability analysis tools. The polyhedral modelling module employs a topology-based face-tracing algorithm derived from the modified Jing and Stephansson (1994) approach, enabling the creation of blocks with arbitrary complexity and support for internal cavities and bounding surfaces. This allows realistic representation of rock mass geometry for stability assessments. Complementing this, the rigid block stability analysis module uses a modified Warburton (1983) vector algorithm to evaluate failure modes such as single-plane sliding, double-plane sliding, and block topping (Figure 4).

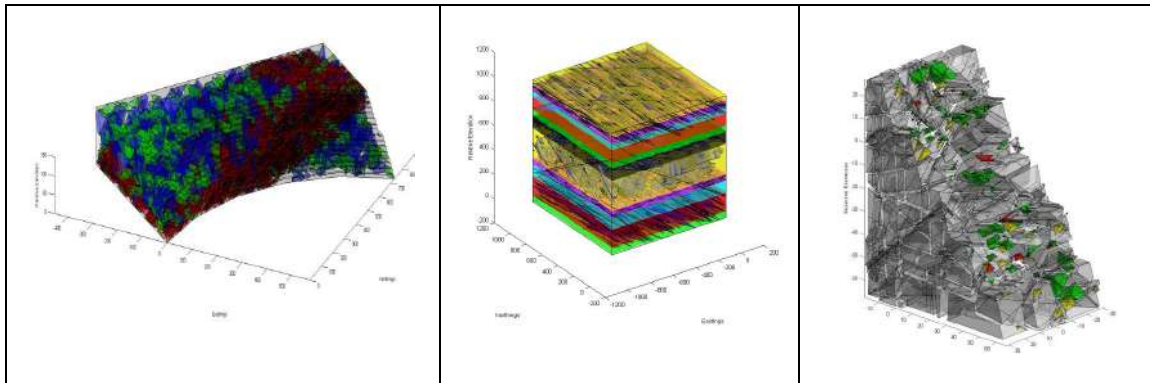


Figure 6. Example DFN for a section of open pit with shear zone (left) and sedimentary geology with distinct fracture populations (middle) and exploded view of blocky rock mass with daylighting unstable blocks colour coded according to stability classification (right).

A quarry excavation case study illustrates the practical application of excavation sequence modelling. DFN based Monte Carlo simulations are employed to generate distributions of in situ block size distribution and associated statistics, conservatively assuming internal fracturing reduces block size (Figure 5). These examples demonstrate how integrated modelling and sensing can enhance reliability and efficiency in dimension stone operations.

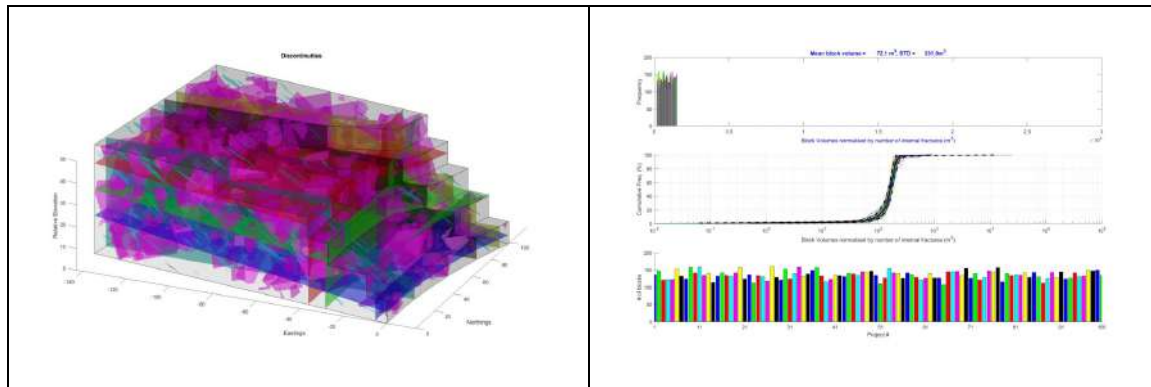


Figure 7. DFN (left) and resulting in situ block size distribution and statistics, conservatively assuming internal fracturing results in block size reduction

GEOSENSING TECHNOLOGIES OF INTEREST

Several geo-sensing technologies offer promise for detection of structures in marble, granite and other dimension stone applications to support DFN based quarry design optimisation. For detection of fractures intersecting drill-holes, traditional methods such as optical televiewer (OTV) and acoustic televiewer (ATV) are most effective. For detection of non-intersecting fractures, and in particular, fractures sub-parallel to boreholes, other technologies are needed. Borehole radar (BHR) technologies provide advanced capabilities for subsurface characterization in mining and quarrying applications. Forward-looking BHR enables prediction of coal seam tops by detecting intersections of direct and reflected arrivals before the drill bit reaches the seam supporting proactive decision-making during drilling (Zhou and van de Werken, 2015; Zhou et al., 2020).

Sideways-looking configurations allow detection of poorly sampled sub-vertical fractures and bedding planes (Huo et al., 2021), which are geotechnically significant and for rock quality assessment. Figure 6 shows an example of borehole radar profile acquired from a borehole filled with very conductive water (Huo et al., 2021). On this radar section, there are many distinguished V-shaped borehole guided events (BGE) such as those labeled with ① ~ ④. The V-shaped event ④ at ~70 m is from a lithologic boundary because the two branches of the reflections have opposite phases. Other V-shaped borehole guided events have the same phase signs for their corresponding reflection branches indicating fractures, for example, BGE ① at ~50 m, BGE ② at ~52 m and BGE ③ at ~55 m. Fractures may also be detected from direct reflections such as those highlighted in Figure 7 (c). The blasthole radar systems use larger diameter drill rods (~200 mm diameter) which can facilitate real-time look-ahead functionality via 5GHz Wi-Fi. However, measurement-while-drilling (MWD) with current slim-hole BHR tools, approximately 40 mm in diameter, cannot be accomplished with Wi-Fi and must record data internally as separate runs using post-survey analysis for fracture mapping. Alternative solutions, such as higher-frequency custom transmission or adapted oil-industry technologies with lower data rates, are being investigated

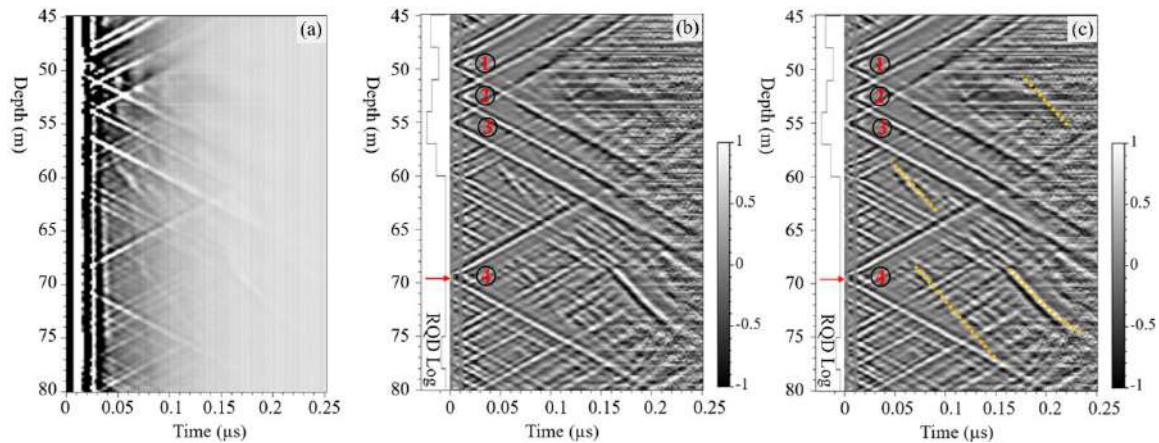


Figure 8. The bi-static BHR data acquired from a borehole filled with conductive water (high salinity) in Canada: (a) Raw bi-static BHR profile with borehole guided waves; (b) Enhanced guided wave events, after suppressing the direct arrivals and with $0.05 \mu\text{s}$ AGC applied. The RQD log in (b) has a high value to the right. (c) Same as (b) with direct reflected joints highlighted.

Distributed fibre-optic sensing technologies offer a versatile platform for monitoring seismic activity, strain, and temperature in underground and surface mining environments. These systems enable continuous, real-time measurements along the length of low cost optical fibre, providing high-resolution data for geomechanical analysis. The fibre is typically deployed via borehole grouting or shallow back-filled trench (Figure 7).



Figure 9. Distributed fibre optics deployment including CSIRO mobile monitoring trailer

Microseismic monitoring using fibre optics has proven effective in exposing strata behavior during longwall retreat, offering insights into deformation and failure mechanisms. Similarly, strain sensing applications in sub-level cave operations enhance understanding of stress redistribution and ground response. Fibre-optic systems also support microseismic monitoring in block cave mines, delivering critical information for hazard prediction and operational safety. By integrating seismic, strain, and thermal measurements, distributed fibre-optic sensing represents a powerful tool for comprehensive geotechnical monitoring in complex mining settings. With an appropriately designed network, this can assist in definition of fracture networks in natural stone settings, allowing improved forecasting of quarry yields and optimisation of excavation designs.

In addition, borehole distributed acoustic sensing with fibre cables can provide abundant information on geological conditions. As shown in Figure 8, reflective wavefields can be observed at

different depths along the borehole fibre cable. The depths of the channels that record these reflective waves closely correspond to the boundaries of lithological layers where seismic velocity changes. Furthermore, the boundaries of the geological strata show strong correlation with the wavefield discontinuities recorded by the fibre cables. Duan et al. (2025) found that more than 90% geological layers can be identified from the borehole recordings.

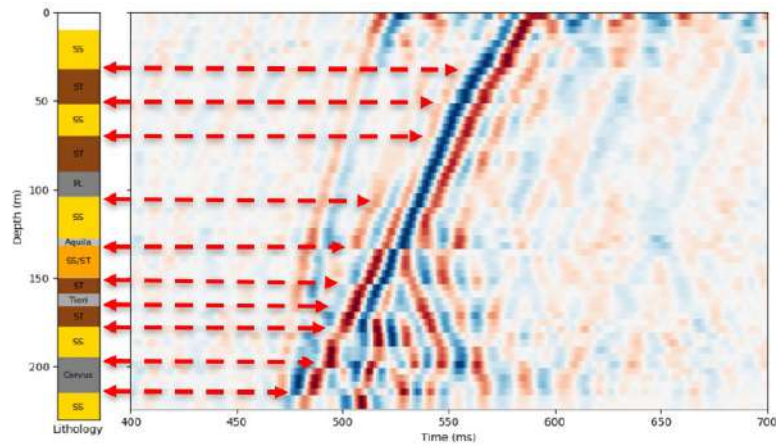


Figure 10. Discontinuities observed in the DAS wavefield recorded by the borehole fibre cables, and their correlation with the lithologies of the borehole.

Recent research in silicon photonics (Shekhar et al., 2024) aims to overcome challenges associated with fibre-optic interrogators by reducing system complexity and cost. Traditional interrogators are often bulky and expensive, limiting scalability for large-scale sensing applications. Integration of optical components on silicon chips enables the development of compact, energy-efficient, and highly scalable interrogation systems. These advances leverage photonic integrated circuits to replace discrete optical components, significantly improving performance and reducing footprint. With support from the Queensland Government Quantum and Advanced Technologies Commercialisation Infrastructure Program grant (QCIP022, Qld Government, 2025), CSIRO is currently establishing the Queensland Advanced Photonics Packaging Facility (Q-APP) to play a critical role in this innovation pipeline, providing capabilities for packaging, assembly, and testing of silicon photonic devices.

CONCLUSIONS

The diversity of operational and R&D experiences in the Australian mining sector have highlighted a number of opportunities for improving geosensing and simulation for the marble and dimension stone sector. The main benefits of such advancement include improved safety, productivity and sustainability.

ACKNOWLEDGMENTS

The author acknowledges ACARP and the Australian mining industry for their support and collaborations on the research presented in this paper.

REFERENCES

Creighton, A., Bixley, M., Elmouttie, M., Hassall, M., Macciotta, R., and Juldz, A. (2022). A reliability-based design acceptance criteria approach for inter-ramp and overall open pit slopes. Slope Stability 2022, Tucson, AZ United States, 17-21 October 2022.

CSIRO (2025) <https://research.csiro.au/msci/projects/mining/siromodel/>

Duan Y., Angel M., Luo X., Lin X., Harpley D., van de Werken M., Shen B., 2025, Identification of geological layer depths using distributed acoustic sensing in vertical boreholes, Bowen Basin Symposium 2025, Mackay, Australia, 15-17 September 2025.

Elmouttie M, Poropat G, Krähenbühl G. (2010) Polyhedral modelling of rock mass structure. Int J Rock Mech Mining Sci. Volume 47, Issue 4, Pages 544-552 doi:10.1016/j.ijrmms.2010.03.002.

Elmouttie, M., Poropat, G.V., Meyers, A.G. (2012) Quantifying the significance of isotropic joints in structural analysis. Computers and Geotechnics, Volume 42, May 2012, Pages 21-36 doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.12.005

Energy Mining 2025. <https://www.energymining.sa.gov.au/industry/minerals-and-mining/mineral-commodities/dimension-stone>

Geoscience Australia 2023. https://www.ga.gov.au/_data/assets/image/0017/146105/149157_02_0_web.jpg

Geoscience Australia 2024. <https://www.ga.gov.au/digital-publication/aimr2022/world-rankings>

Geoscience Australia 2025 <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/aimr/preliminary-tables>

Hudson, J.A. (1989). Rock Engineering Systems.

Huo, J., Zhou, B., Mason, I., and Zhao, Q., 2021, An Application of Reflected Guided Borehole Radar Waves to Detection of Subhorizontal Structures: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 59(9), 7201-7210.

International Trade Administration 2025 <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/australia-mining>

Jing, L. & Stephanson, O. Topological identification of block assemblages for jointed rock masses. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 31 (1994), pp. 163-172

Qld Government, 2025. “More than \$50 million on offer for quantum and advanced technologies”, <https://statements.qld.gov.au/statements/100718>

Resources Vic 2025. <https://resources.vic.gov.au/geology-exploration/quarry-materials/dimension-stone>

Shekhar, S., Bogaerts, W., Chrostowski, L. et al. Roadmapping the next generation of silicon photonics. Nat Commun 15, 751 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44750-0>

Warburton PM. Application of a new computer model for reconstructing blocky block geometry—analysing single block stability and identifying keystones. In: proceedings of fifth international congress on rock mechanics. Melbourne; 1983. p. F225–F230.

Zhou, B., and van de Werken, M., 2015, Conductively guided borehole radar wave for imaging ahead of a drill bit: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12 (8), 1715-1719. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7093167/> .

Zhou, B., van de Werken, and Huo, J., 2020, Coal top detection by conductively-guided borehole radar wave imaging for open cut blast-hole drilling: Geophysical Prospecting, 68(3), 982–998. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2478.12874>.

THE DUAL IMAGO METHOD: A VISUAL STRATEGY TO RESHAPE THE QUARRYING WORLD

O. Pandolfi ^{1,*}, N. Santoro ², L. Pia ¹, S. Dundar ¹, C. Meanti ¹

¹ *Studio Di Ingegneria Pandolfi (*Corresponding Author: pandolfi@studiopandolfi.it)*

¹ *Independent Geomatics Researcher, Mercogliano, Italy*

ABSTRACT

The new dual IMAGO technology: an accurate, hyperreal visual strategy for stone quarries. The dual IMAGO is a ground-breaking strategic technology that explores and raises awareness of the way a stone quarry evolves over time. A new way to manage the quarrying process in an accurate, hyperreal ecosystem: a visual platform, Visual Remote Sensing, and a method for an integrated representation of all data from the quarry. This article describes the dual IMAGO method, which is constantly being improved and tested in many quarries across the world. For the first time, VRS (Visual Remote Sensing) can capture the breath of the mountain, the infinitesimal geotechnical and operational phenomena as they develop over time. This method is the offspring of Orlando Pandolfi Studio's systemic strategy applied to quarries, a complex world, and Nicola Santoro's Unorthodox Geomatics (UOG) [1] that allowed us to feel and view information comprehensively, as Knowledge Maps, which is essential to steer a quarry-development strategy. The dual IMAGO is the patent-pending method of Orlando Pandolfi Studio and Nicola Santoro.

Keywords: Imago

INNOVATING THE WAY OF EXPLORING VIA THE DUAL IMAGO VISUAL METHOD

Ruling the Complexity of a Quarry Uncomprisingly

Developing a quarry to sell first-rate stone materials means successfully ruling the complexity of a world-system [2][3].

Professionals know that developing a quarry is neither easy nor complicated: it is complex in the broadest sense of the word.

So, we should not think that workers' problems can be solved by a few more or less accurate predictive scientific models or just an empirical sixth sense and first-hand skills. In either case, we would be very far from reality and would not offer any effective solutions.

It is indeed a complexity that encompasses scientific, technical-mining, digital 4.0, aesthetical, social, and ethical categories and that can be solved through a combination of explicit and tacit knowledge [4], bringing together the empirical expertise of people who work on the field every single day and the technical-scientific knowledge of those who design, manage and supervise.

A holistic and cooperative approach is therefore needed, one that brings together different levels of knowledge while pulling down communication barriers, reducing workplace safety, environmental, landscape hazards, as well as social and economic risks.

What's more, not using the innovative tools that technology and computer science provide us with nowadays would make no sense.

Digitisation and IT data representation technology should not, however, distort reality, they should imbue it with knowledge instead, make it easily understandable, so as to raise awareness.

In the last decade, Orlando Pandolfi Studio has found that the best way to investigate the evolution of a quarry over time and space [5] is a combination of two methodological tools, such as:

- a) Systemic integration;
- b) Visual representation.

With tool a), Systemic integration, the quarry is viewed and thought of from the perspective of Risk-Based Thinking, according to a process approach.

In Figure 1, the quarry is viewed within the context of the seam and territory it interacts with, with some hazardous areas. The recommended management strategy would be based on a well-balanced combination of technical skills and scientific expertise. Obviously, in this way decisions become interactive and work their way into continuous improvement.

Figure 2 lists some specific lean-management steps that need to be adjusted and integrated along the way.

After developing dozens of management systems in other industries, Orlando Pandolfi Studio has worked out an integrated set of solutions based on a digitised process approach in a platform where risk analysis, procedures, methods and technical documentation have been fed into a single, synchronously-manageable corpus.

Then, the massive implementation of machinery 4.0 in the quarries and the integration of geotechnical sensors in the management platform has led to combine the digital data with the manually collected data.

Such method has been shared with lots of quarries that are currently using it.

When it was drawn up back in the early 2000s, it was a pioneering method and it still performs quite well in data collection and management.

Regrettably, in many quarries the management systems are not handled on integrated platforms but still rely on paper records, spreadsheets or document databases.

The standard AI tools do not improve a comprehensive understanding and actually prevent the practical, effective use of field data.

Sometimes, systems remain quite useless and mysterious items, mediated by third-party consultants. This is precisely the opposite of what should pave the way for the implementation of this system.

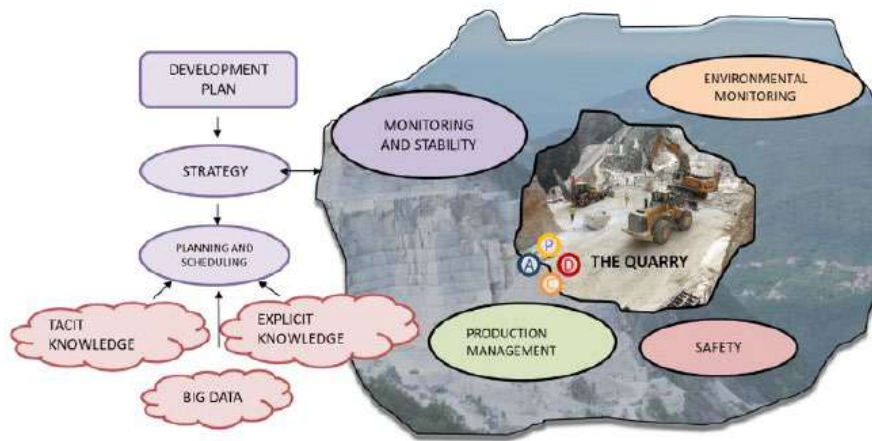


Figure 1. The quarry within its seam and territory, and integrated approach with a view to continuous improvement.

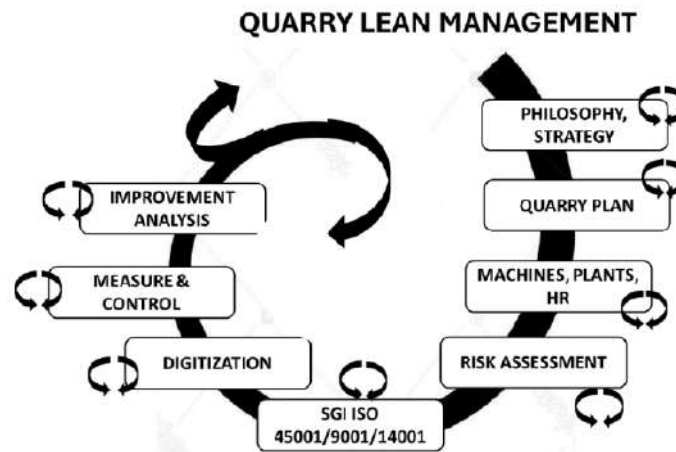


Figure 2. Lean management of a quarry for an iterative approach to quarry management.

However, the management platform was in need of a heart: a method that could collect data from all sensors and show them in 3D space and time, sorted by different levels of accuracy of up to less than a millimetre and in a hyper-realistic manner, for better understanding.

All such information needed to be integrated.

An extensive technology scouting process had revealed that in the scientific world integrated solutions, either commercial or being developed, that could be really desirable, feasible and economically-viable were few and far between.

But do you know what really takes the biscuit? The time a geotechnical engineer proclaimed a sad, cowardly: it can't be done! But a solution did exist, it was already there.

Actually, Unorthodox Geomatics (UOG) had already been developed back then. In this kind of geomatics, a pixel turns into a visual transducer from which information about light across the electromagnetic spectrum can be seamlessly extracted up to kilometres away. Data are captured by large-volume n-dimensional photography, which Nicola Santoro described in a number of articles and in the above-mentioned texts.

Therefore, Unorthodox Geomatics has the powerful solution that had been looked for and the unifying medium that can compose a dual of the quarry, interoperable and connected to the real one, a spatial framework for evolutionary maps of integrated knowledge. So, the two lines of research have teamed up with disrupting results.

A masterly use of light, a conveyor of information, permeated mining engineering applied to the stone industry. The outcome is a visual strategy for the quarry as a complex world, with the first integrated, accurate and hyper-real visual method to understand and rule its evolution, its phenomena and its operational, cultural and social processes.

This paved the way for the development of the new cost-effective dual IMAGO technology (patent applied for by Orlando Pandolfi Studio and Nicola Santoro), built on an ecosystem:

- a) A single working method;
- b) A family of VRS tools (Visual Remote Sensing);
- c) A visual platform.

Figure 3 shows the entire dual IMAGO ecosystem with OBSERVER TERRA 01.

The image from the platform shows quarry Ortensia no. 136, located in Carrara and run by Carrara-based Marmo Canaloni who actively took part in the development of the test by successfully using the platform and all its modules.



Figure 3. Components of the ecosystem. The image shows Quarry “Ortensia” no. 136, located at Colonnata, Carrara and run by Marmo Canaloni. It also shows images from the first 2023 tests, presented at the 6th World Landslide Forum, Florence (Italy) 14-17 November 2023. The initial state $t=0$ of the survey from 100 metres away (the measuring interval is the grey point cloud on the top right) and its geometric deformation at $t=1$, visible on the left. This is a chromatic map on a scale of a hundredth of a millimetre upwards. Finally, on the bottom right, the image of the proprietary instrument OBSERVER and two vector analyses of drapes at a distance of 250 metres.

The view is perfectly defined when the dual IMAGO method kicks off.

Orlando Pandolfi Studio’s Vision (Forma et Materia) provides the first ever visual strategy to knowledgeably navigate ever-changing worlds.

So, the value proposition (fine imaging to carve out an evolving world) is the first ever integrated, accurate, hyperreal visual method to investigate and manage the working world, split into three cyclic steps: Observe, Feel, Act.

Of course, such concepts apply to many different worlds: underwater, cultural heritage, wind power, mechanics, shipbuilding, etc. This article will mainly deal with applications in stone materials.

The method is based on “feeling”, on perceiving an evolving world, while accurately capturing data, and therefore information, to understand and build Knowledge Maps, to navigate more easily the complexity of the evolution of a real-life quarry.

In the world of stone, the ultimate sense is sight. Hearing, touch and smell are complementary to the workers’ everyday experience and are passed down as tacit culture.

So, photogrammetry is the ultimate optical instrument.

So far, the dual IMAGO method has been successfully implemented in 25 quarries across the world and helps plan, interact with and monitor quarries to predict their behaviour and improve control over them.

In this article, we will describe a few practical applications, from the study of rocky masses to machinery 4.0 to traditional monitoring, but mostly one-of-a-kind Visual Remote Sensing (VRS) application.

When applied in the pilot plants, this technology delivered excellent results, as they responded to the quarry-workers’ problems.

A FEW TECHNICALITIES ABOUT THE DUAL IMAGO

In the tests run by Nicola Santoro under the Team’s coordination, the results from the proprietary technology dual IMAGO have been compared with the currently available ones.

The analysis was reviewed and scientifically validated by Professor Claudio Margottini⁵ and presented at some conferences: the 6th World Landslide Forum (Florence, Italy, 13/17 November 2023), the technical workshop “Opere geotecniche per argini e rilevati: innovazione, ricerca ed applicazioni” (Argenta, 11-12 September 2025) and the AIUla International Symposium on Sustainable Conservation of Rupestrian Heritage Sites (AIUla, 25/27 November 2025). The first development of the dual IMAGO concerned in situ monitoring which is also essential in quarries to get a better understanding of slopes and deformation trends, to plan and check stabilisation measures, to zone the territories, and to work out alerting procedures to protect human lives. Actually, in situ monitoring can be equated to a “non-structural” risk-mitigation measure.

The assessment of the test was explained in a scientific report by Professor Claudio Margottini at the 6th World Landslide Forum (Florence (Italy), 13/17 November 2023), as summarised below.

Exploratory monitoring effectively helps understand the features of landslides, including their geometry and volumes, displacements, danger levels and evolutionary trends.

Appropriate monitoring instruments are required to assess the stability of a slope [5][6][7]. Typical current slope-monitoring instruments include clinometers, strain gauges and piezometers. Though such instruments provide high accuracy, reliability and ease of measurement, they have their limits in terms of drilling and installation in hardly accessible or bumpy areas.

According to Kromer et al. (2019) [8], Kim and Gratchev (2021) [9] and Núñez-Andrés et al. (2023), close-range photogrammetry has proved to be extremely effective in the monitoring of rockslides, with millimetric measurements. For accurate, constant measurements of localised slopes for long time spans, close-range photogrammetry is an excellent monitoring technology and has remarkable advantages in terms of reducing the number of staff as well as being usable for instant monitoring and early alert systems. Therefore, this trial aims at creating a long-term, constant slope-monitoring system based on close-range and/or long-distance photogrammetry.

In the light of the above, it is clear that for a proper monitoring of displacements and deformations in rocky masses, extremely accurate measurements and high-resolution representations of the rocky mass are required, so as to detect displacements on a geotechnical scale. This means that the level of detail must easily reach the sub-millimetric scale, and measurements should not be limited to individual points but should include wide areas of the rocky mass instead.

As laid down in the Linee Guida per il Monitoraggio delle Frane [4], midrange cameras can capture centimetric pixels and can be used to analyse millimetric displacements.

We thought it would be interesting to look for a fresh approach to developing new workflows in photogrammetry.

From a scientific point of view, our trial pursued these goals:

- The achieved level of metrological accuracy and level of definition and detail are comparable to those of traditional geotechnical instruments, though the scope of the investigation includes wide portions of the rocky mass (metrological intervals);
- The most consistent, automatic, remote and real-time monitoring system is implemented;
- 3D visual monitoring of areas between metrological intervals, including evolution over time, is achieved.

To achieve such goals, i.e. to work with metrological photogrammetry, an ecosystem consisting of one or more automatic monitoring devices and a constellation of validated metrological markers was designed and built. In this way, a single photogrammetric corpus was put together and combined with other, traditional monitoring systems, acting as a robust framework.

A hybrid workflow, consisting of commercial codes and proprietary algorithms, was designed and developed to continuously process data from the monitoring systems through differently-configured photographic devices.

Such method directed the dataflow from complete control of the photographic device to 3D reconstruction in a photogrammetric setup, with the results flowing into the dimensional measurement system.

Then, the point clouds were processed into a sub-millimetric density on areas that can be fairly wide, even in the region of a dozen square meters, defined as metrological intervals and validated by traditional geotechnical sensors, sometimes in combination with an updated version of metrological markers. Traditional geotechnical sensors, equipped with displacement measurement systems and temperature probes, corrected the effect of the physical factors.

Successfully tested as a prototype, the procedure embedded some typical measurement concepts of precision mechanics into geotechnics. The difference lies in the final result: extremely dense point clouds (millions of points) viewed in near-real-time via a cloud platform, then fed into commercial analytics software to measure the three-dimensional displacements.

ANALYSIS OF TEST RESULTS

A number of tests were conducted in 3D metrological intervals, i.e. quarry volumes bound by an outer surface and inner parts.

Each phenomenon needs a different level of accuracy. Our trial focused instead on specific intervals.

Firstly, on a quarry wall to observe geotechnical displacements, in which a hundredth of a millimeter is a usual monitoring unit. The challenge for us was doing that with a long-distance (100 metre) visual sensor.

Figure 4 shows the marble bench the test was performed on.

Figure 5 shows a comparison between points captured by a laser scanner and by the dual IMAGO.



Figure 4. Bench tested with VRS dual IMAGO.

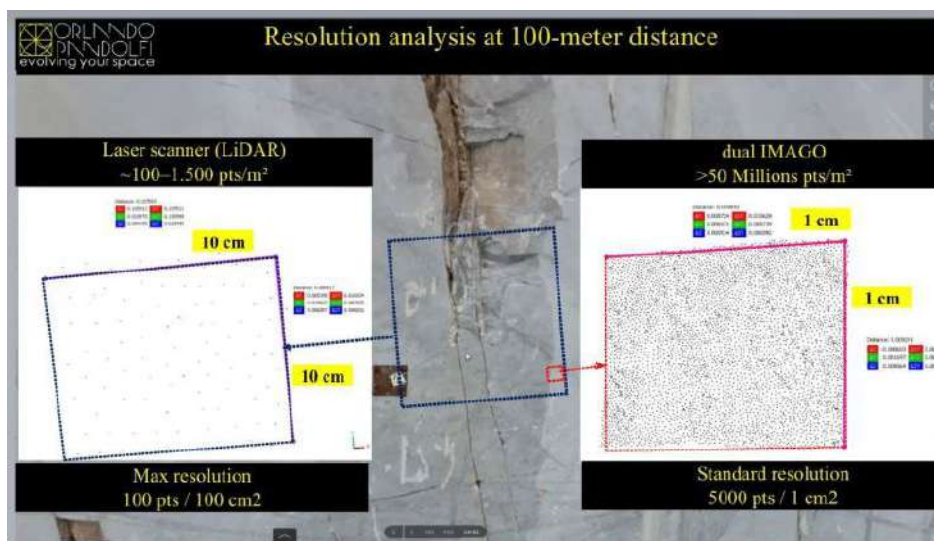


Figure 5. Analysis of resolutions using this method from 100 meters away

The huge difference really stands out.

Figure 6 and Table 1 were eventually composed out of such tests and easily available data from other methods of representation.

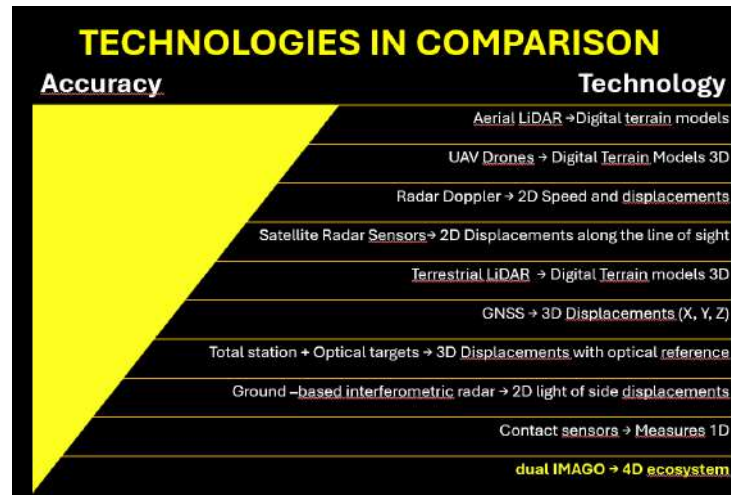


Figure 6. A comparison between technologies in terms of accuracy.

Table 1. A comparison between technologies.

Method	Accuracy	Resolution	Point density	Strength / Weakness
Mobile mapping	±2-5 cm	Medium	~200-1.000 pts/m ²	Fast coverage; lower precision
Photogrammetry	±5-30 mm	Medium-High	~10-1.000 pts/m ²	Economical and flexible; depends on GCPs and image quality
Radar/InSAR	±1-10 mm (relative)	Low-Medium	<10 pts/m ²	Excellent for temporal monitoring; lacks geometric detail
Laser scanner (LiDAR)	±1-10 mm	High	~100-1.500 pts/m ²	Highest density and detail; high cost
Total station	±1-3 mm	Spot	1 point/shot	Very high local precision; inefficient for surfaces
Structured light	±0.1-0.5 mm	Very high	>1M pts/m ² @1m	Extremely fine detail; limited range
dual IMAGO	0.01 mm	Extremely high	>1M pts/m ² @100m	4D, maximum accuracy and hyperrealism even at long distance

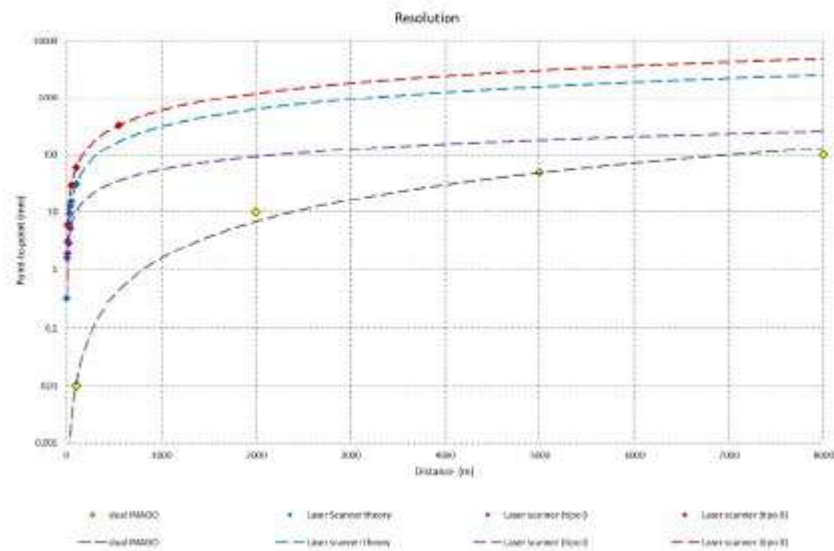


Figure 7. A comparison between technologies in terms performance at different distances.

Figure 8 shows instead an interesting chart that correlates the complexity and size of the surveyed object through a comparative analysis between technologies.

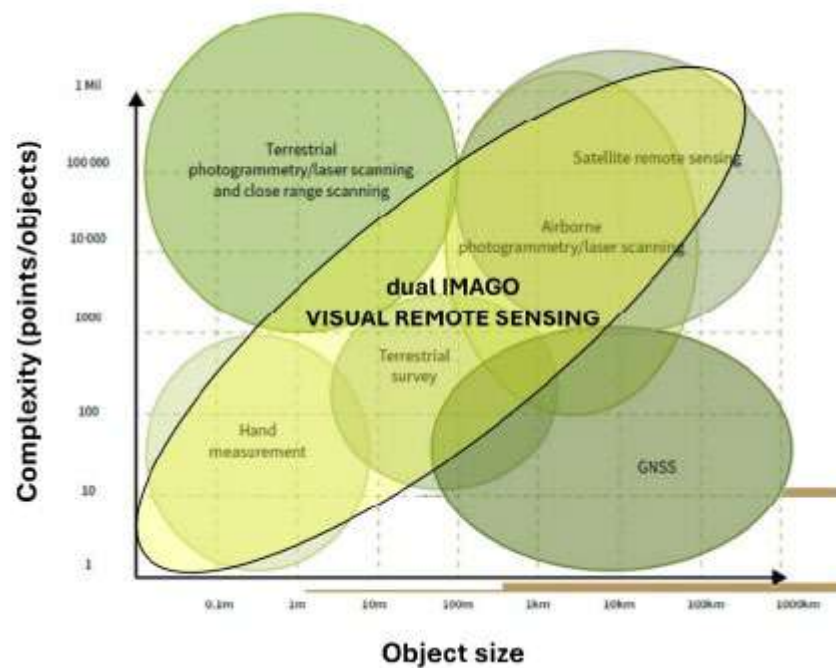


Figure 8. Conceptual comparison between monitoring technologies (RCU 2025, modified)

FORM AND MATTER: AESTHETIC KNOWLEDGE AND THE HOLISTIC MODEL, AS PIVOTAL TO STONE ENGINEERING

How can the dual IMAGO be applied to the stone world?

How can a new technology meet such an ancient and time-honoured world?

Marble is eternity: since time immemorial, it has handed down the depth of man, his inner life, his craftsmanship, the knowledge and the essence of the civilization that turns it into a masterpiece.

This is the background for understanding what “developing” a quarry means: extracting matter from the rocky peaks and shape our loftiest thoughts.

This suggests that the real challenge, in mining engineering applied to dimensional stone quarries, is going beyond, expanding the feel, taking a holistic view of an extraordinarily complex feat.

Only in this way will the questions of architects, artists, businessmen and all those who wish to bequeath a fragment of their own eternity, of their own faith or of their own ideal, be answered.

And it’s really sad to see that engineering is all too often confined to the role of a mere technical agent, with no strategy, vision or depth, even in circumstances of the highest cultural and operational level. This is the precondition, or better, the cultural heritage.

Giving the world a form that outstandingly fulfils our deepest need for aesthetics, ethics and scientific accuracy is, in fact, a huge challenge.

To respond to a high-profile market based on a first-rate brand policy, an engineer needs to be a “Renaissance man”; in other words, an engineer needs to shape his feelings like a new Leonardo da Vinci or Michelangelo.

After decades of research, studies and design in Italy and abroad, it is exceedingly clear that explicit knowledge, built on scientific knowledge, cannot but blend into the quarrymen’s tacit knowledge and the artist’s creativity.

Only that way can an engineer become a faber: a creator of proper semantic solutions, a genuine messenger of a dialogue between humans, rocks and the future.

So, an engineer is part of a cognitive community, of a system of ideas, of integrated methods, good practices and scientific instruments that must bring about unique and potentially eternal stone products.

Quarries need to be developed according to what the market wants, by leveraging quality and uniqueness without falling into the regressive spiral of lower sales prices. Figure 9 clearly shows the weight of the BRAND over the sales BUDGET. The chart can also be used as a management tool.



Figure 9. The Engineer and Marble as Art.

This is the holistic visual outlook that is pursued by the Research Team and that inspires the ground-breaking problem-solving method herein described.

After decades working as a consultant for stone quarries in many different parts of the world, despite adopting culturally-adapted quarry-management strategies, the problems a quarryman will raise with a consultant are always the same. Reducing the high uncertainty of the business.

The questions asked about the seam are almost invariably these:

- 1.Where is the most valuable and fit-to-market stone material?
- 2.How can I have the greatest yield, and therefore higher profits, from the development of my quarry?
- 3.How can I reduce workplace safety hazards, the instability of the rocky mass, and environmental, landscape and social risks?
- 4.Do I have enough technical expertise, human resources, machines and development methods?
- 5.And lastly how can I handle all this through a consistent and reliable data and information flow?

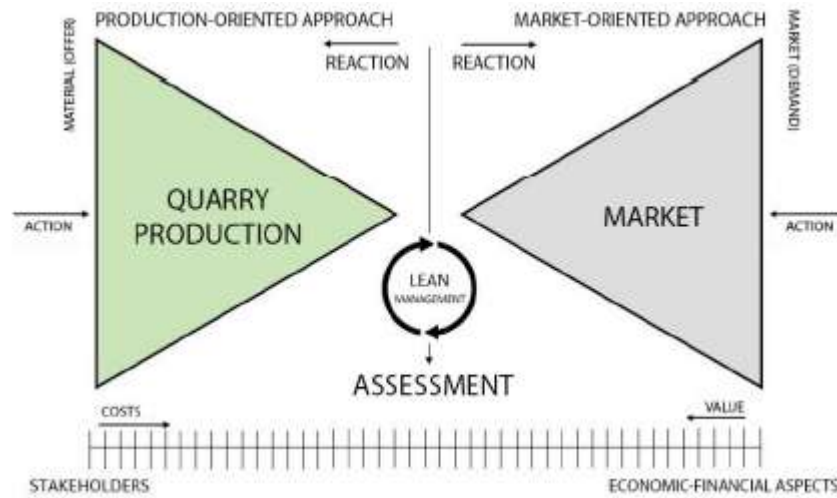


Figure 10. The fit-to-market approach: the situation at an exploratory stage.

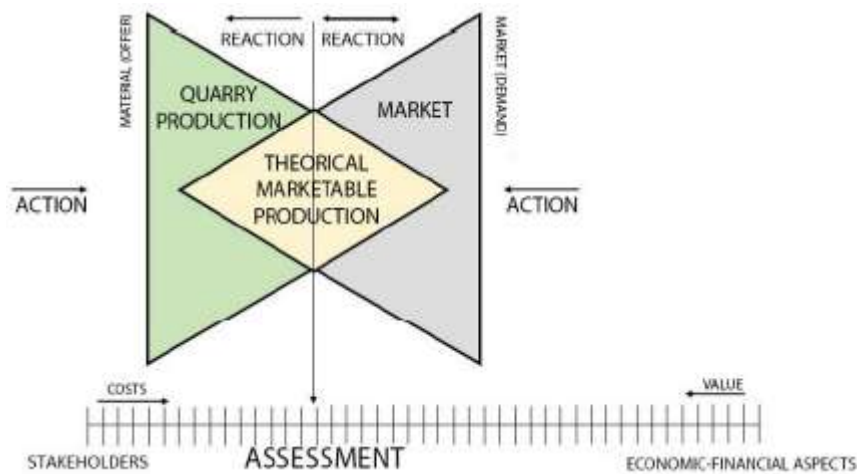


Figure 11. Push-pull strategy: a successful business.

In a nutshell, the key question is: how to rule the complexity of a quarry as it constantly evolves?

Properly answering this question through integrated, effective, feasible and sustainable solutions is the obsession that Orlando Pandolfi Studio has been inspired by for decades.

The development of science, technology and the industry's increased awareness of and care for risk reduction have led to progressively improve the solutions. Finally, digitization

has provided disrupting solutions that are a quantum leap and have eventually paved the way for the dual IMAGO approach to integrated holistic solutions in quarrying techniques. The article also describes some new lines of research developed by Nicola Santoro that exemplify the versatility of the dual IMAGO in a wide range of applications (patent applied for by Orlando Pandolfi Studio and Nicola Santoro).

THE QUARRY AS A SYSTEM AND KNOWLEDGE MAPS

Systems and models

The goal of developing a quarry is making sure that the products meet the market requirements while ensuring the stone products are desirable, reducing workplace safety hazards, monitoring the instability of the rocky mass, protecting sustainable environmental and social balance in keeping with the surroundings and properly managing the seam over time. These are therefore factors of technical feasibility implemented via technology, including innovative technology, and development-appropriate methods. Finally, economic viability is the prerequisite to achieve a fair return from the business as well as make a positive contribution to the local community and to the region.

In its sedimentological, operational and time dimensions, a quarry is a complex, real production system [10], standing out for its combination of a constantly-interacting physical, phenomenal and decision-making components, in which Factors of Production (machinery and equipment, human resources, and development method, including its management processes) interact with an ever-evolving rocky mass. A proper strategic management of development over time implies a good knowledge of evolution, even for predictive purposes.

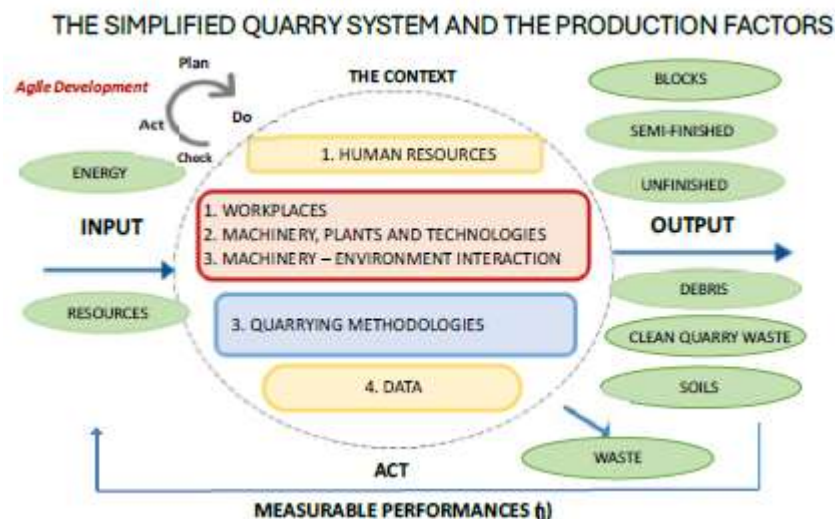


Figure 12. A synoptic table describing a systemic view of a quarry, by factors of production.

As a natural and technical system [11][12], a quarry system may be defined as an open set of interconnected systems evolving over time according to their own laws and external stimuli, generating observable and measurable behaviours. Therefore, a quarry system must be equipped with monitoring and communication instruments that are digitally interoperable

with a receiver. A quarry system is an inexhaustible source of data all through and even after the end of the development, even while the area will be rewilded.

In the light of this, a model is not a mere replica of reality, it is an epistemic device that can be used to represent, understand and rule a system that is more complex than human cognitive faculties can directly grasp. As emphasised by Giere (1988)[13], a model is a selective, deliberate representation built for a specific informational or operational purpose.

With dimensional stone quarries, the analog world, our reality, need to be represented by multiple models to include different categories: geological, mechanical, morphological, time-related and operational. Such categories must be analysed by direct observation but need a formal framework as well as measurement and processing instruments.

Specialised epistemic modelling by categories helps us select data from the quarry system more accurately, using algorithms and methods to iteratively calibrate and optimise the models.

Digital models must not overshadow the analogue world [14] and, most importantly, the initial assumptions must be as compliant with the system as possible, avoiding any inconvenient use of generative AI tools or geostatistical operators that are over-simplistic or cannot be accurately georeferenced. In addition, models must be strictly validated at regular intervals by measuring real values in space and time, in critical areas.

So, the approach taken to the dual IMAGO must be based on an accurate measurement of phenomena, with a view to continually refining knowledge as is typical of HLS management systems.

The IMAGO outdoes the concepts of digital twin and BIM representation, by improving the geometrical features of the model, making it dynamic and as compliant with the system as it can be, as well as making 3D(t) models, which would be hardly comparable in their spatiality, consistent and interoperable in the visual representation. For example: predictive numerical simulation models, RGB models, infrared models, and other geophysical models that are commonly used in the industry.

Today, integrating information from different models is very difficult with the current spatial representation technology, such as GIS, BIM, or platforms specialising in sensor technology. It is also quite difficult to set out a comparative semantic analysis using a lot of non-interoperable software.

Usually, the digital twins that are currently on the market are fairly inaccurate from a geomatical point of view and have few epistemological tools.

So, the goal of our research was finding the nest method to overcome such shortcomings by creating a software and hardware ecosystem that could transfer to the system or set of models the knowledge required to effectively understand and handle the system.

An accurate analysis is conducted in some volumes-measurement intervals selected in the systems or by observing which we can subtly understand the evolution of phenomena.

To do this, a new way of applying geomatical concepts had to be resorted based on

Nicola Santoro's UOG approach and adapted to Orlando Pandolfi Studio Team's stone world.

Epistemological models and dynamic Knowledge Maps

Hereinafter we will provide a glossary of methodological terminology that we adhered to while developing the ecosystem and algorithms that bring two different worlds together.

The IMAGO model (the method's underlying model) is defined as a three-dimensional point cloud that stands for the underlying geometry of the quarry system. Such points form a dense cloud of purely dimensional features, i.e. they define the shape and size of the object with no other attributes. At time (t)_n, the Imago cloud evolves: the status of the point cloud at time (t)_n may be identified as P(t)_n thus capturing any geometrical change (e.g. deformations or displacements) that may happen in the system's time evolution. In some advanced context, time can even be considered a fourth coordinate (X, Y, Z, t) per point, so as to formally keep track of any geometric transformation over time. Likewise, sets of points, subsets of the model's constituent points, spatial ones, such as those that form the outer surface of the cloud or some inner surfaces, their thickness tending to zero in some applications or volumetric subsets, part of the overall volume, e.g. those suggesting potential displacements between discontinuities, can be analysed as well. Likewise, points can be defined as A(t)_n and V(t)_n and become the basic elements of the evolutionary monitoring we are going to explain below.

In addition to basic geometry, we want to associate each P(t)_n, A(t)_n or V(t)_n with a number of epistemological features, i.e. informational attributes of different levels or categories of knowledge. Such attributes may include: quality of the rock (geological or geotechnical properties), local temperature, state of stress, and any other measurable phenomenon or interesting information. These are, then, the layers of non-homogeneous information set in space as Information or Knowledge Maps, called Knowledge Maps, maps that, in other words, add levels of knowledge to the basic model, IMAGO.

Each of those Knowledge Maps may be thought of as an additional level of information "permeated" in the geometrical point cloud. Basically, every P(t)_n, A(t)_n or V(t)_n of the IMAGO cloud can be associated with differently-correlated additional attributes K(t)_n, including vector relations, which carry specific informational indicators (e.g. rock's quality, temperature, etc.). Such approach is similar to what happens with intensity- or colour-enriched point clouds: every element retains its position and adds a scalar or a categorical attribute. We can think of such additional information as extra point clouds that share the same position as the IMAGO, but have a different informational aura for each phenomenon. In other words, different layers of knowledge are permeated into the same spatial structure, each one pertaining to a different phenomenological dimension. Now, let's define the formal relations that connect the basic point clouds with the permeated Knowledge Maps. The purpose is to describe, in one single logical expression, how every element of the IMAGO can be associated with the attributes of different categories of knowledge, so that, every time, any map can be replaced with a different one in the same geometrical model.

Geometrical basis – IMAGO is the set of points that define the basic geometry of the system (the initial point cloud).

$$\text{IMAGO} = \{ p \mid p = (x(p), y(p), z(p)) \in \mathbb{R}^3 \}$$

where x(p), y(p) and z(p) are the coordinated functions of each point.

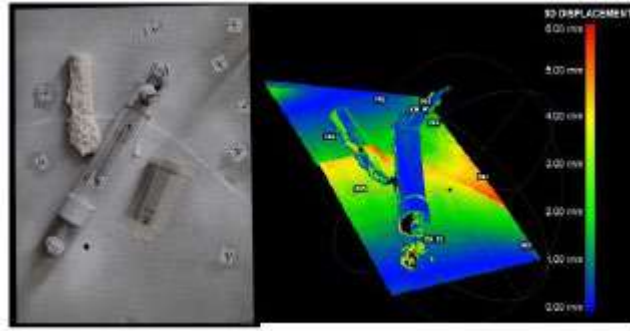


Figure 13. The Figure shows the two stages of the epistemological model for displacements at the instant $t=0$ and at the instant $t=1$.

Categories of knowledge—Let's take $\mathcal{C}=\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ as the set of epistemic categories herein considered. A domain of Values D_c is defined for every category $c \in \mathcal{C}$ that is the set of potential instances associated with such category. The D_c domain can be numeric, qualitative or symbolic, depending on the property described.

Knowledge Map – For each category C , a mapping function is added to the space-time continuum (the set of discrete observation times, working with separate chronological states). The function $fc(p, t)$ assigns a C -type attribute of knowledge to $P(t)_n$, $A(t)_n$ or $V(t)_n$ at time t . If the attribute does not change over time or if we take a fixed instant t_0 , we can simplify that by denoting $fc(p) = fc(p, t_0)$ at that instant.

$$Mc(t) = \{(p, k) \mid p \in \text{IMAGO}, k = fc(p, t), k \in D_c\}$$

Integrational relation – A relation R integrating geometry with knowledge can now be defined. Formally, R is introduced as the set of tetrads (x, y, z, k) such that the spatial point (x, y, z) belongs to the IMAGO and k is an attribute of knowledge associated with such point. As multiple categories of knowledge exist, the chosen category is specified as a parameter.

$$Rc(t) = \{(x, y, z, k) \mid (x, y, z) \in \text{IMAGO}, k = fc((x, y, z), t), k \in D_c\}.$$

The above logical relations describe how to overlap a map of knowledge with the basic geometry (Figure 14). The geometrical structure of the object will not change, while the last component does change, depending on the overlapped knowledge. In this way, the same IMAGO point cloud can describe different qualities by simply replacing the map of knowledge acting as an informational aura around some points or sets of points.

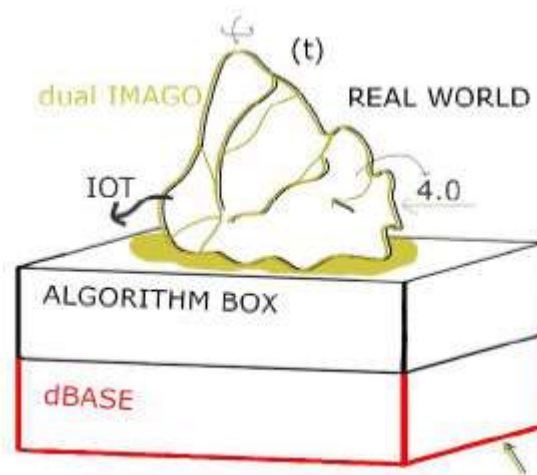


Figure 14. Schematic diagram of the dual IMAGO

The same reference point cloud (IMAGO), while its informational attribute changes. So, the selected Knowledge Map acts as a superimposable and interchangeable level of information. Such logical-mathematical expression offers the option to describe different categories on one and the same geometrical model by simply replacing, not altering, the underlying object. The clouds are permeated, consistent and replaceable with each other as they share the same underlying geometry, so one can switch from a map of knowledge to another, while keeping the geometric skeleton of the object in place.

THE DUAL IMAGO ECOSYSTEM

The visual platform

The platform has the typical multitier architecture (N-Tier) used in enterprise web applications, as sketched in Figure 15. The flow starts from the client (computer, laptop, mobile device) sending HTTP requests to a Web Server, which manages the entire application. Therefore, the devices (PC, notebook, smartphone, tablet) send an HTTP Request to the Web Server.

The client contains no application logic: it only acts as a source of requests.

The components of the architecture are explained in Figure 15:

- Client → sends the requests
- Web Application Framework → manages security, routing, logs, and exceptions
- Controllers (API and MVC) → receive the requests
- Service Proxy → adds security and logging
- Business Layer → processes the application logic
- Database/Cache Server → manage persistent and temporary data

It is a robust software model, which is typical of enterprise web applications, with high

scalability, simplified maintenance and a clear separation of roles.

Finally, the web application includes an Enterprise Application Framework, responsible for the cross-cutting features:

- Authentication – User identification.
- Authorization – Management of authorisations and roles.
- Routing – Mapping of requests to the right controllers.
- Logging – Recording of events and activities.
- Exception Management – Centralised error management.
- Data Access Management – Communication with data sources.
- Caching – Management of temporarily stored resources

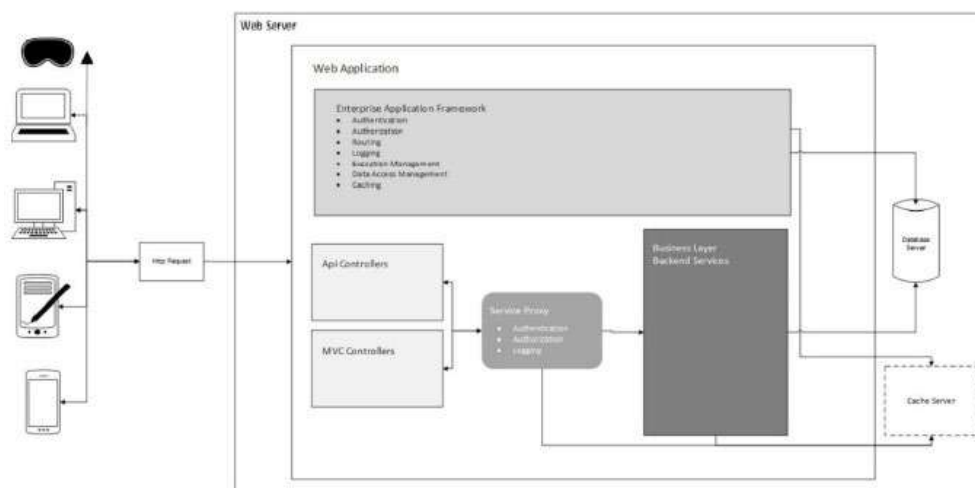


Figure 15. The N-TIER architecture of the dual IMAGO platform

Observer

The first ever UOG instrument has been developed. It is a robotic instrument built on multiple axes that visually interacts with the real world and with the dual IMAGO.

It comes in different versions, depending on the work setting. For land applications, such as quarries, landslides, rocky slopes and rock monuments, there is the OBSERVER-TERRA. For underwater applications, the machine is completely different and an OBSERVER-AQUA has been developed that can dive to 90 metres and is currently being tested at sea. For aerial applications, there is the OBSERVER-AER which is currently being tested.

Dual IMAGO Terminology

This section lists the definitions of the terms that are most widely used in the development of the dual IMAGO technology, which are being updated.

Table 2. dual IMAGO terminology

Term	Definition
Accuracy	The dual IMAGO elements can be measured with high accuracy, much more accurately than the industry's 3D simulations. Accuracy achieved: 0.05 mm. Accuracy is checked at the testing stage, and in any case it undergoes measurement error analysis, as with any other standard method.
Definition	The level of detail that can be accurately measured in three-dimensional reconstructions. Definition achieved: 0.02 mm using the OBSERVER 100 m from the monitored volume.
Measurement interval (VRS volume)	Surface areas set up with physical equipment made of steel and metal parts in which the accuracy of the measurement is achieved through mechanical metrology-like methods.
Synchrony	Essential to assess highly-accurate 4D persistent monitoring processes.

Traceable data	Collected data are traceable, in other words they can be associated with the time and place they refer to or come from, as well as being integrated with in the form of metadata. In particular, each photo can be associated with multiple files and links.
Extensiveness and massiveness	The high accuracy of the measurement taken in the VRS volume is maintained across a wide neighbourhood.
Use of platform	The platform can be used either in the cloud or locally.
Immersive	The platform can be used in immersive MX mode for users to have an all-enveloping experience.
Interoperability	The platform has been designed to exchange different types of data with IoT, sensors and management platforms. The purpose is making the quarry technologies as integrable as possible.
Hyperrealism	The space organisms represented in the dual IMAGO have high volumetric and surface definition, with a high density of points or meshes. When processed, they lead us far beyond what can be seen, across the full light spectrum. In addition, this method can associate space with chemical and physical properties via Knowledge Maps using hyperspectral and thermal instruments, magnetic field detectors and acoustic devices.
Knowledge Maps	Multidimensional maps that show, in a visual form and by colour scales, any surface change in the parameters measured on the surface of the VRS volume.
Measurability	All the elements of the worlds created by the dual IMAGO are measurable and can be used to define phenomena by induction.
Multiplatform	The platform has been configured to be used by the main commercial digital platforms and is constantly updated.
Observer	An automatic or semiautomatic visual data-acquisition system.
Holistic	The integrated platform can be used to collect information about factors of production and, above all, input and output data from the local space system. In addition, the visual platform can also represent point clouds $[x, y, z, A]$, where $[A]$ is a multidimensional vector, and physical, chemical and other phenomena with the Knowledge Maps.

opMAP	A simplified functional, nonmetric 2D operations map of the quarry to record information about development methods and approximate volumes.
Space organisms	They are active complex systems in a spacetime setting, in which the evolution of activity factors and input and output flows, including KPIs, partly depend on their position in space.
Data persistence	Data that describe the evolving space and the phenomena that take place there are retained for long enough to thoroughly observe changes for extended periods of time.
Visual platform dual IMAGO	An integrated, modular visual platform containing all technical-management development information, as well as
	geological, geotechnical, physical and dimensional information, assigned to a 3D space over time. The platform is used to view and analyse data but it is also a data analytics tool supported by advanced databases. Lastly, it can be used to easily and flexibly work on clouds at the design stage. The dual IMAGO is a sort of accurate and cooperative blackboard shared by business managers and consultants, which, through the integration of statistical analyses, can also steer the tactical management of the quarry and plan long-term strategies, with a continuously-improving design.
Real time	Information is processed and provided to the user in a very short time, which depends on bandwidth and latency as well as on the time it takes for data to be processed back and forth. The platform features a real-time module for instant processing of data from the survey.
Scalable	The platform is scalable as it is provided with algorithms and automatisms for data exchange/processing.
VRS volumes	Volumes of rocky mass, both <i>in situ</i> and detrital, which undergo remote visual monitoring using the patent-pending dual IMAGO technology.

THE DUAL IMAGO MODULES AND THE KNOWLEDGE MAPS

Background

As discussed above, epistemological or Knowledge Maps collect data directly from the model in the form of signals from geotechnical sensors or from IoTs set on machinery or equipment 4.0. Likewise, the information collected by the management systems and the quantitative and qualitative analysis of tacit knowledge are focused on specific volumes and monitoring intervals.

In the platform, Knowledge Maps come in the form of integrated and interoperable modules, which are improved and integrated in later releases.

Some of such modules, which are already available as integrated visual consultancy, are described below.

SYSTEMA

Over the years, Orlando Pandolfi Studio has developed specialist quarry management systems, thus playing a part in the creation of an integrated management system⁶ in compliance with ISO 9001 (quality), ISO 14001 (environment) and ISO 45001 standards (occupational health and safety)⁷.

The process approach entails mapping the processes and their interactions, after identifying the property, criteria and control methods, the resources and indicators (KPI) for each input and output; risk-based thinking applies to all processes to detect and deal with risks and opportunities that could affect the results and compliance. Continuous improvement is ensured by PDCA cycles (Plan-Do-Check-Act) run over each process: planning goals and checks, doing, measuring and analyse data (quality, environment, accidents/near-misses), acting through corrective and improvement actions; self-audits, nonconformance management, customers' and staff's feedback, and management review close the loop and realign all goals and resources. In an integrated system, these unique principles reduce duplicate documents, bring about consistent decision-making processes, and make quality, environmental protection, and health and safety effectively balanced.

In a marble quarry developed with diamond-wire cutting technology and chain saw machines, the work process can be divided into primary ones, i.e. those that directly pertain to the quarry-development process, and ancillary ones.

Standard processes are listed in Figure 16, which has been widely used by the author in his documents, from risk assessment to systemics, since 1998. Figure 17 describes the method whereby different methodological approaches are integrated into one development process; this means that the bench-cutting process should properly be assessed from different points of view, for a comprehensive risk assessment.

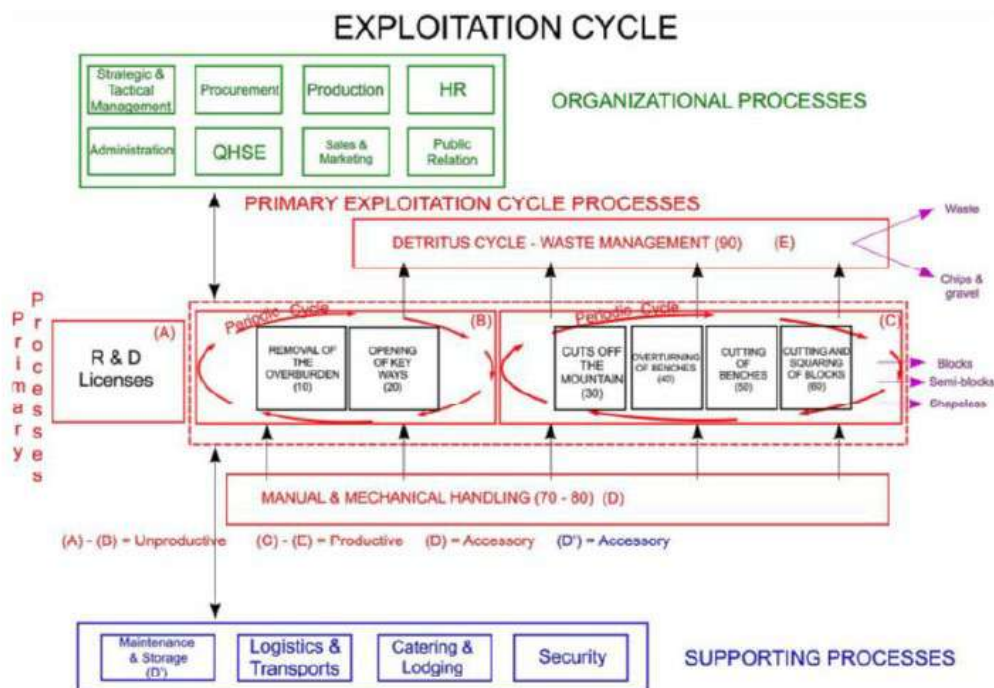


Figure 16. Standard process in a stone quarry.

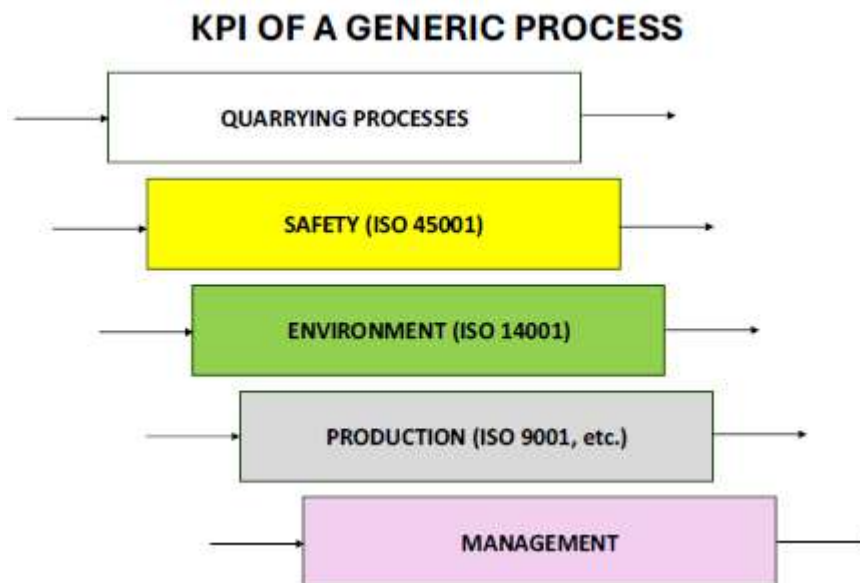


Figure 17. KPIs of the same production process from different approaches

MATERIA

MATERIA is one of the most important modules, which has been used by Orlando Pandolfi Studio since 2018 in a number of quarries in Italy and abroad to rate the quality of materials and assess the seams, by grading traditional and advanced geostatistical analyses (Figure 18).

It is clear that for decades now the general trend in marble is using methods borrowed from general mining engineering to assess the seams and especially the fracturing state, including RMR – Rock Mass Rating (Bieniawski) [15], Q-system (Barton, Lien & Lunde) [16] and the Rock Mass Index RMi (Palmström 1995–2001) [17].

At the same time, in terms of the aesthetics and therefore the textures of the materials, for years there have been attempts at working with continuous coring and analysing the physical cores. Such methods have raised quite a few problems with the definition and spatial position of the material.

Years ago, Orlando Pandolfi Studio developed a technique whereby digital cores can be properly placed in space and turned into point clouds that are consistent with the model, thus creating an epistemic map.

By combining such techniques with classic geostatistical methods, high-quality Knowledge Maps of the seams could be traced, while still focussing on making data understandable for the final customer, i.e. the people who run the quarry.

In particular, the combination of digital cores in different locations across the quarry enabled Nicola Santoro to develop an AI technique that reconstructs dense clouds of the deep layers: this means a 3D surface survey turning into a tomographic survey (Figure 19).

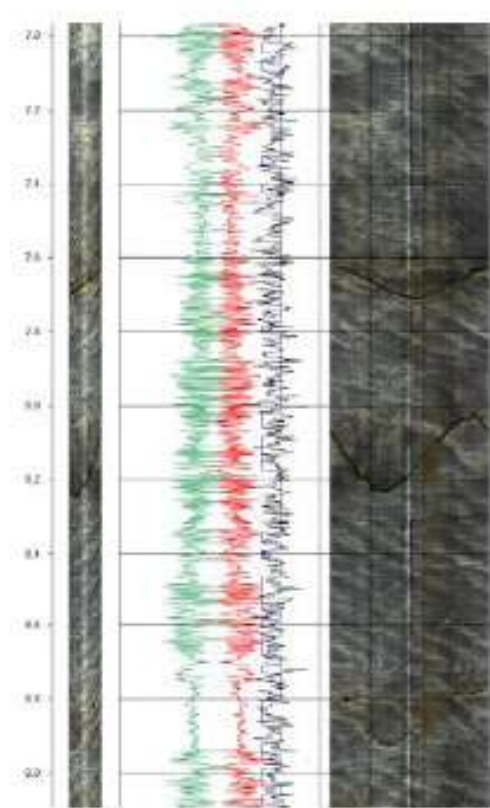


Figure 18. Digital cores, a three-dimensional rendering of the borehole.

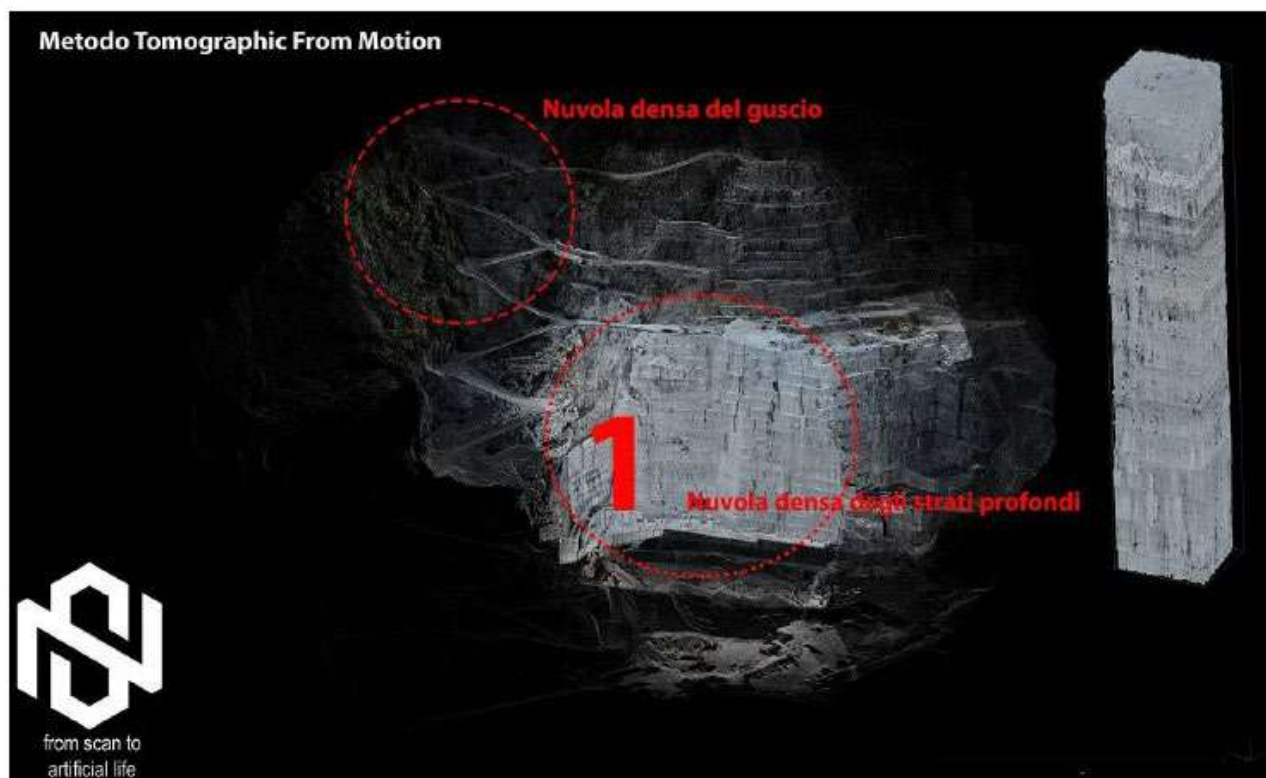


Figure 19. Reconstruction of a dense cloud of deep layers in a marble quarry in Carrara

RATIO

RATIO is another, very important module of the dual IMAGO visual platform, which is essential to assess the state of stability before, during and after the excavation, both open-pit and underground.

Stability issues in marble quarries can be grouped into two macro-categories:

- a) Local displacements;
- b) Tensile instability.

In quarry faces and marble walls, the most frequent type a) displacements include:

- planar sliding;
- wedge failure;
- toppling;
- rockfalls.

Category b) covers caving events that are not directly associated with interactions between discontinuities but with the state of stress induced in the rocky mass by the excavation.

In either case, there are quite a few analytical methods that have been known for some time and used in marble quarries as well, that can be used to roughly calculate some safety factors. Then, risk-mitigation measures (consolidation) are perfected, but, as it often happens for other elements herein mentioned, they are addressed separately from the phenomena occurring during the development of the quarry.

The dual IMAGO method helps interact with the quarry all through the stability-assessment process. Actually, the platform analyses the geo-mechanical characterisation more thoroughly by means of analytics tools on the discontinuities and geometrical features of the rocky mass. It integrates with statistical motion-analysis tools and FEM/FDM numerical models [18], and generates an epistemic model by integrating the Knowledge Maps of the safety factors (Figure 20).

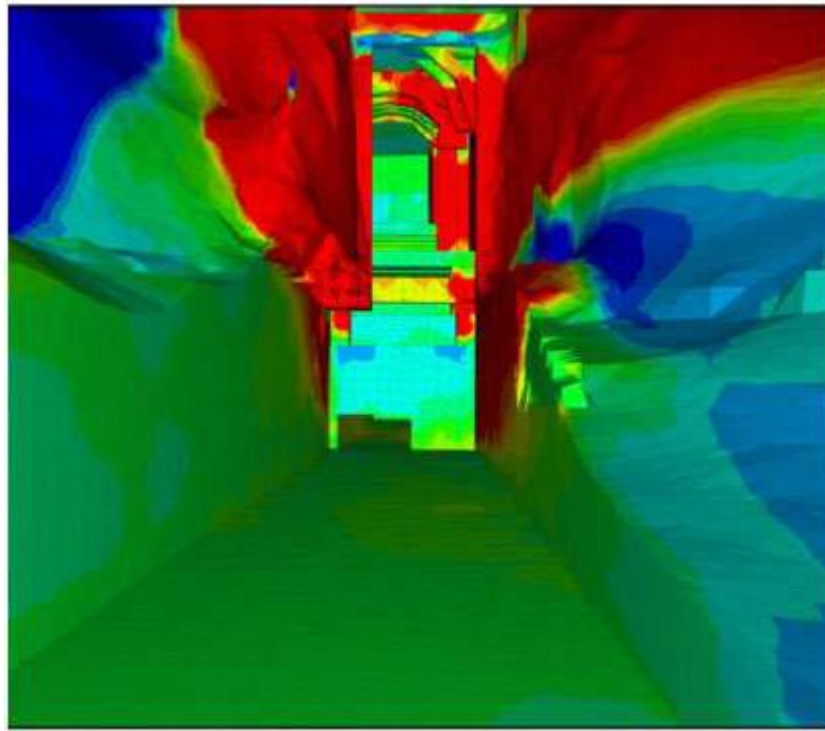


Figure 20. Numerical model: visual representation of safety factors (Professor Pierpaolo Oreste – Politecnico di Torino)

SENSORIUM

SENSORIUM is the beating heart of the dual IMAGO platform.

By now, the continuous and/or periodic monitoring of physical, chemical and mechanical properties are the normal practice in many of the most important quarries in Italy and abroad. The problem is that in most cases the data are in the hands of a technician who is not part of the quarry or who otherwise does not constantly communicate with the owner, the project manager or the foreman.

The SENSORIUM module provides a real-time view of data from different types of sensors. Data are represented both numerically and graphically (Figure 21), and an integrated dashboard display has been added, which helps understand and take matters into one's hands in real-time.

In addition, the devices can also help analyse data through integrated AI analytics tools.

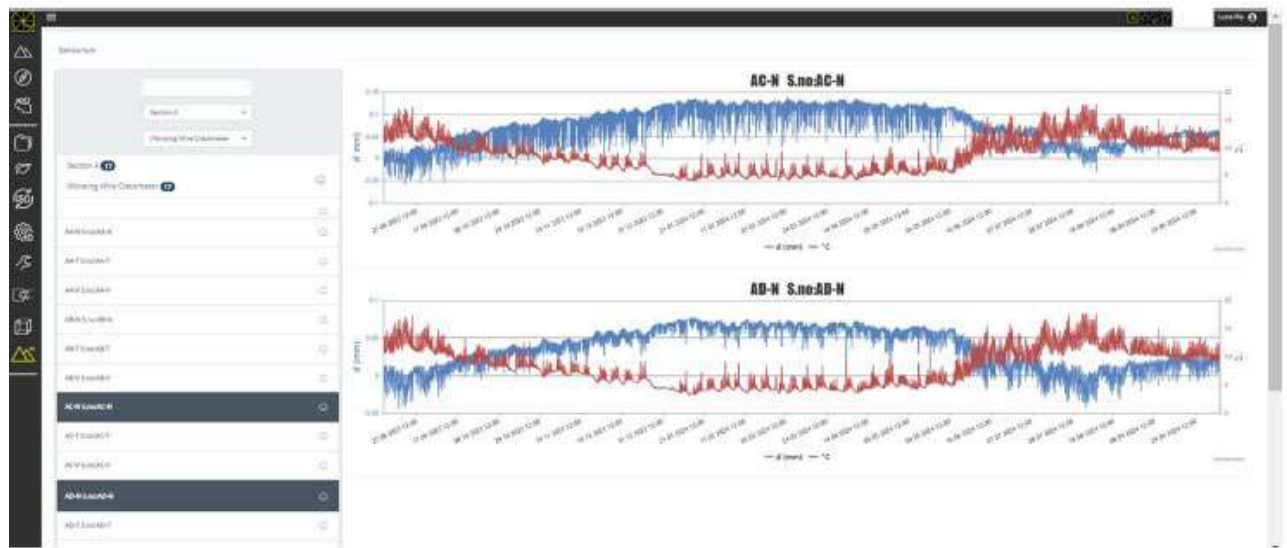


Figure 21. Integrated graphic representation of data from different traditional geotechnical sensors

Machina 4.0

At present, the Industry 4.0 module integrates more than 300 machines of different categories, including material handling, cutting, and processing equipment.

In contrast to previous-generation machinery, Industry 4.0 systems enable human operators to interact directly with machine management software and to perform bidirectional data exchange (input/output), based on a wide range of sensors installed on and connected to the machines themselves.

This paradigm therefore requires the adoption of a dedicated digital data management system, which in some cases is provided by the original equipment manufacturers (OEMs). In the context of marble quarries, however, such proprietary tools are often difficult to adopt, primarily due to their limited customization capabilities, as they are designed to be as generic and broadly applicable as possible.

Unlike other management solutions currently available on the market, the proposed module is fully integrated with corporate management systems and production workflows and is specifically designed and configured for each individual company.

The machine activation procedure includes a preliminary analysis and digitalization of the company's production cycle, followed by the integration of the machine into the management module. This approach enables the harmonized integration of heterogeneous machines, originating from different manufacturers and belonging to different functional categories, while adopting a unified set of operational paradigms.

Each activation process is complemented by structured training and operational instruction for both the machine operator and the Master user, who is additionally provided with a dedicated mobile application that facilitates on-site data exchange between the machines and the dual IMAGO platform in an efficient and user-friendly manner.

Finally, the platform enables real-time verification of machine operational status and production process key performance indicators (KPIs), presented in both graphical and tabular formats (Figure 22), and supports the automated generation of a wide range of PDF reports.



Figure 22. Machina 4.0. KPI examples.

Maintenance

The dual IMAGO Maintenance Module is an integral component of production and safety processes, designed in full compliance with ISO 45001. It is not conceived as a standalone system, but as a structural element of quarry operational management, linking machinery, personnel, and activities within a single, controlled, and fully traceable workflow.

The module operates both at office level (data recording, maintenance planning, and analysis) and in the field as a core module integrated into the dual IMAGO application. It includes dedicated maintenance checklists (Figure 23) for the main categories of quarry equipment: cutting machines (chain saws and diamond wire saws), handling machinery (wheel loaders and excavators), and other operational assets. Maintenance activities are recorded in real time, significantly reducing errors, delays, and non-conformities.

The collected data feed a continuous analysis system that converges into the Bussola, the central dashboard of dual IMAGO. Within this framework, maintenance is transformed into strategic information: equipment status, recurring critical issues, and impacts on safety and production are clearly visualized, enabling rapid, preventive, and fully documented decision-making.

N°	Dettagli	Luoghi di lavoro	Codice interno	Tipo	Costruttore	Matricola	Stato
1			02	Macchina da perforazione / Perforatrice	BEC / aperil bf 800	000159	
2			03	Macchina da perforazione / Perforatrice	Lochtmans / FAST 65	E008	
3			04	Macchina da perforazione / Perforatrice	Lochtmans / FAST 65	E052	
4			05	Macchina da perforazione / Perforatrice	Lochtmans / FAST 80	E157	
5			06	Macchina da movimentazione / Pala meccanica	Caterpillar / 988B	TW001812	

N°	Dettagli	Tipologia di controllo	Periodo	Intervallo	Oppure	Periodo	Intervallo	Prossimo intervento
1		Sostituzione impianto a motore: filtri secondari e primario impianto alimentazione (separatore acqua), olio motore e filtro (sostituzione rapida)	Contatore macchina	250				96,54297 / 250

N°	Dettagli	Tipologia di controllo	Periodo	Intervallo	Ultimo intervento	Prossimo intervento
1		Campione di liquido del circuito di raffreddamento (livello 1) - Prelievo	Mensile	3	07/11/2025 05:49:55	50

N°	Dettagli	Tipologia di controllo	Periodo	Intervallo	Ultimo intervento	Prossimo intervento
1		Controlli e lubrificazione: Lubrificazione boccole cilindro sterzo, controllo gonfiaggio pneumatici, scarico acqua e sedimenti serbatoio carburante	Settimanale	1	09/12/2025 08:36:44	
2		Filtri e cuscinetti: Pulizia/apertura/sostituzione filtro cabina (principio e aria fresca), lubrificazione cuscinetti di inclinazione assiale	Settimanale	1	09/12/2025 08:36:45	

Figure 23. Maintenance check-lists.

VISUAL REMOTE SENSING VRS

Tests and Test Results

This section deals with the results of some of the most interesting tests conducted so far, starting with the first publication for the sixth World Landslide Forum through to the latest applications from Autumn 2025.

These are field projects conducted in the marble quarries of Carrara and in the Montevergine region (Avellino) using a robotic observer and a manual observer.

The test results corroborated the working hypotheses about data density and accuracy after remote capture through local inspections.

Application in a Rockface

A rockface test was conducted on a bench of marble quarry “Ortensia” no. 136 in Carrara, run by Marmo Canalani S.r.l.

In this case, the wall was reconstructed at two time instants from shooting angles about 100 metres apart, with the analysis pushed to the detail of one hundredth of a millimetre.

Visual data were acquired at the instant $t = 0$ of the selected monitoring volume, as shown in Figure 23.

A cloud-computing approach was taken to the comparison of data from the two time instants. The main test result is therefore a 4D Knowledge Map of the three-dimensional displacements of the points (Figure 24).

The three-dimensional displacement was associated with any point in space at the instant $t=1$.

A colour in an ascending scale of blue-green-red was associated with each value.

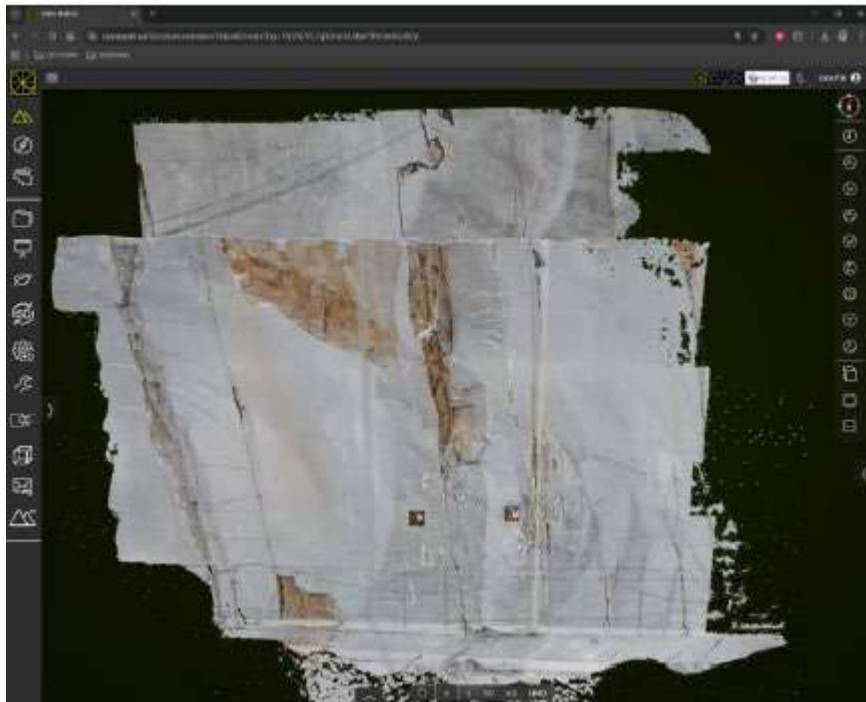


Figure 24. Reconstruction of the VRS at the instant $t=0$ by dual IMAGO

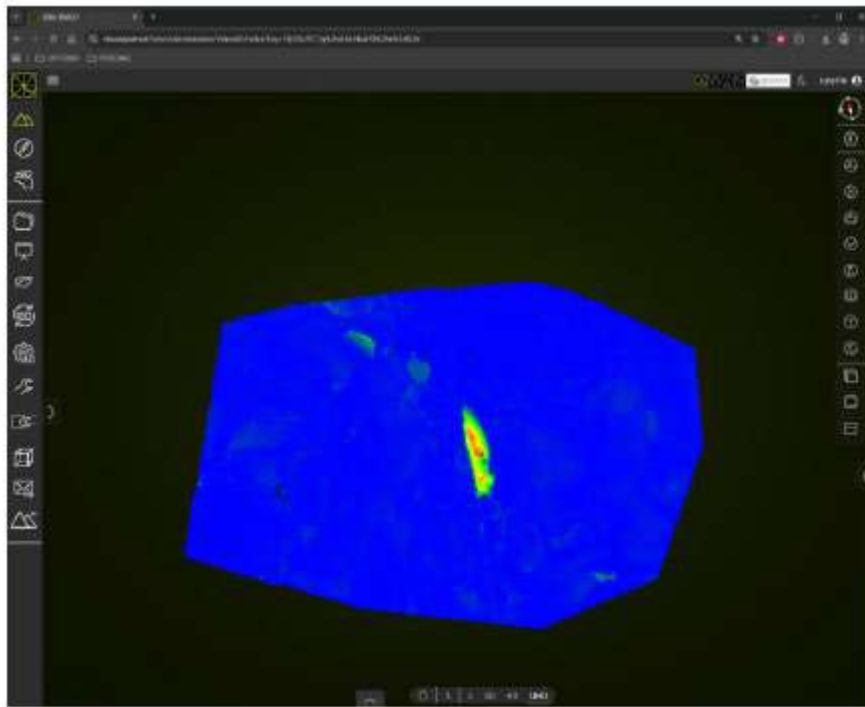


Figure 25. Analysis of three-dimensional displacements at the instant $t=1$.

Application in a Quarry Waste Dump

A test in a quarry waste dump (locally known as ravaneto) was conducted on a ridgeway of marble quarry “Ortensia” no. 136 in Carrara, run by Marmo Canaloni S.r.l.

Volume VRS3.1 was selected to estimate the potential of the test so that the VRS monitoring system could eventually be extended to other areas as well.

Volume V3, marked out within the quarry, includes two sub-volumes:

- Detrital volume, which mainly consists of the road up to the upper yard;
- Rocky volume, above the road.

A test sub-volume VRS3.1 was marked out within the detrital volume, underneath a road under construction and a rampart between time $t = 0$ (May 2025) and time $t = 1$ (July 2025).

A map of the displacements was analysed by comparing data from the two time instants, with a cloud-computing approach.

There is no traditional monitoring in VRS3.1 to compare data with.

The selected accuracy and resolution for the analysis of displacements in the detrital volume was in the region of a centimetre, even if a millimetric accuracy was used in the reconstruction.

Actually, the dual IMAGO concept is based on a representation of the evolution of reality, with a minimal loss of data, and therefore complexity, with multiple levels of

information to be extracted.

The map of time-related displacements is entirely stored in the database, so it is eventually “distilled” into the chosen form.

In late May 2025, visual data were acquired at time $t = 0$ of VRS3.1 (Figure 26).

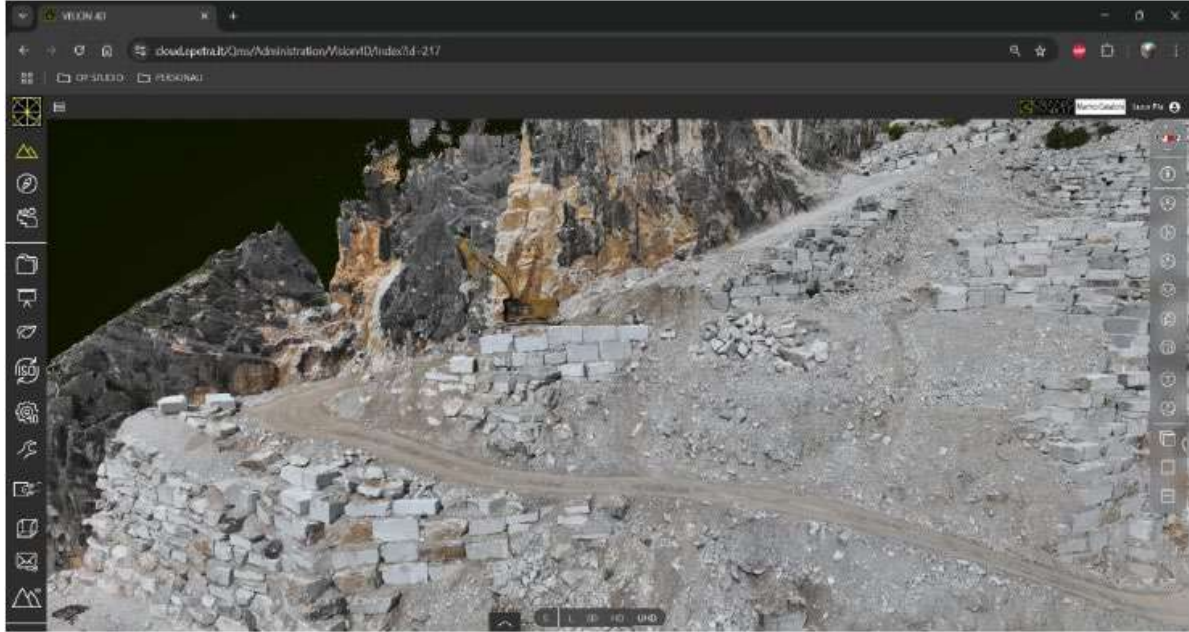


Figure 26. Reconstruction of the VRS3.1 at the instant $t=0$ by dual IMAGO.

In early July 2025, visual data were acquired at time $t = 1$ of VRS3.1 (Figure 27).

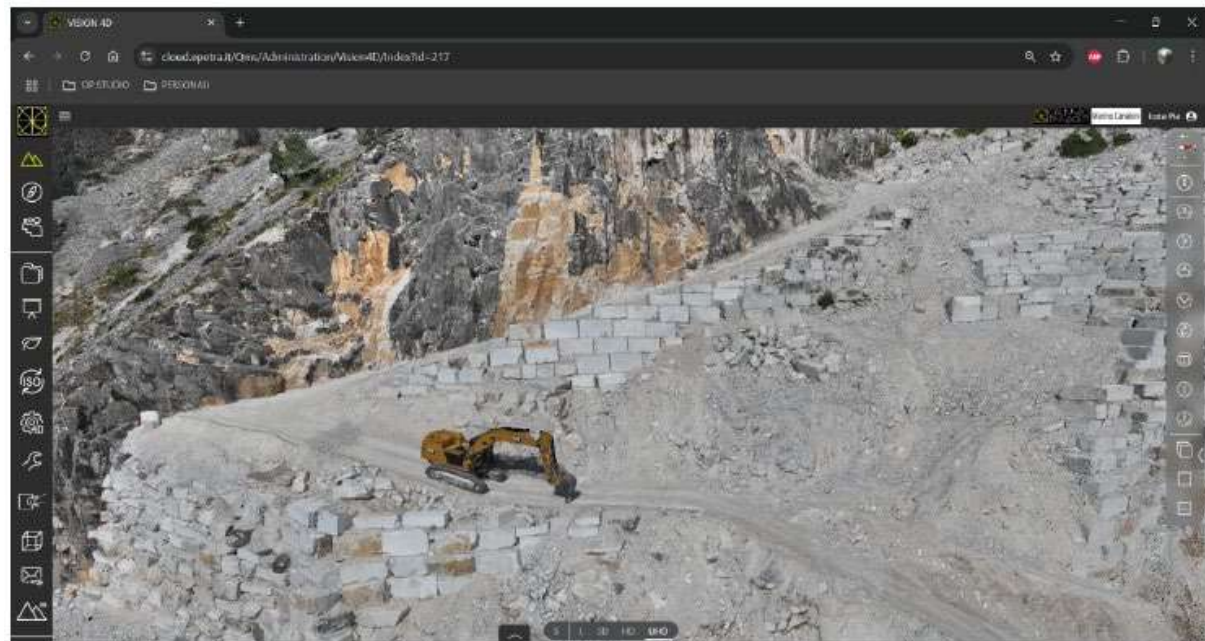


Figure 27. Reconstruction of the VRS3.1 at the instant $t=1$ by dual IMAGO.

As described above, a cloud-computing approach was taken to the comparison of data at the two time instants. So, the main test result is a 4D Knowledge Map of the three-dimensional displacements of the points (Figure 28).

The three-dimensional displacement was associated with any point in space at time $t=1$.

A colour in an ascending scale of blue-green-red was associated with each value.

The analysis focussed on displacements that delivered interesting values for this kind of test, and left out displacements smaller than 0.01 m (nonsignificant for the selected level of accuracy) or bigger than 0.10 m (caused by the mechanical equipment).

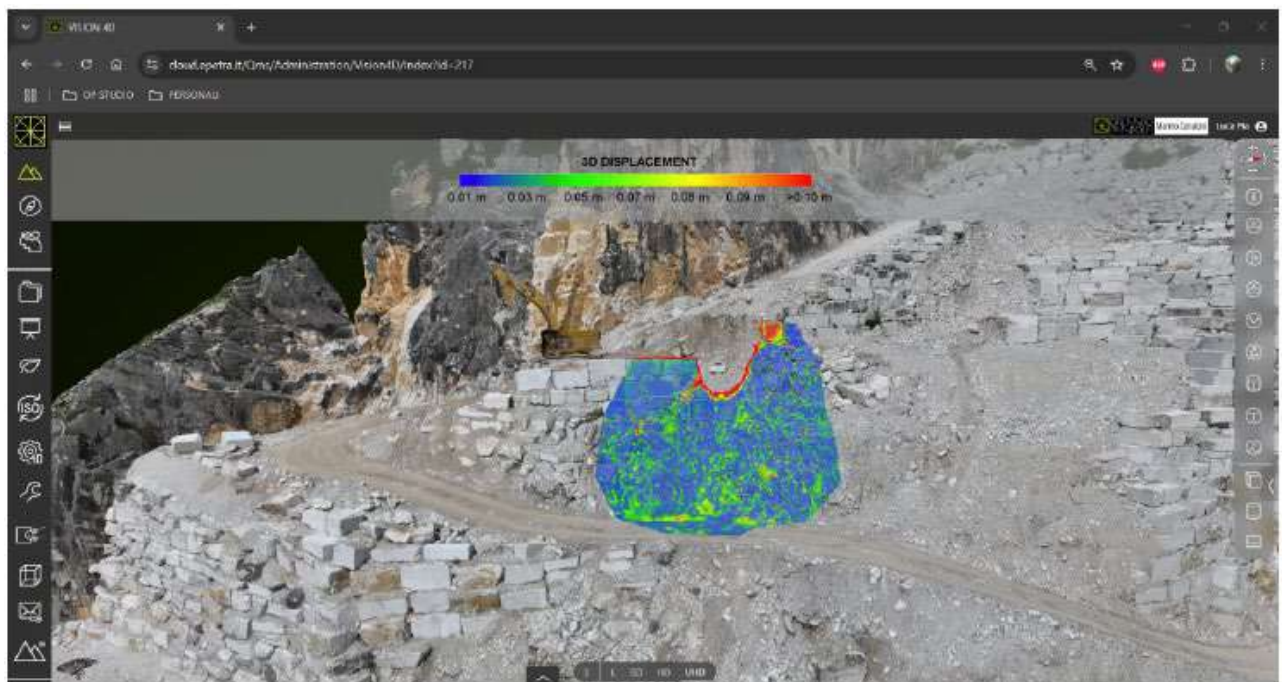


Figure 28. Reconstruction of the VRS3.1 – 3D displacement t_1-t_0 by dual IMAGO

Application in a Rockfall Net

Another experimental test conducted by Nicola Santoro was the scanning of a rockfall net (Figure 29), to inspect and monitor it from thousands of metres away using a centesimal GSD with non-contact technology.

The test results are used to analyse hundreds of thousands of square metres of nets and deliver ultra-fast analyses of the consistency, spatial deformation over time and deterioration of the structural mesh, while extracting the rock and mesh for a structural stability analysis.

It is a challenge driven to the assumedly impassable limits of the measuring and monitoring technology: steel meshes are threadlike objects, a few millimetres thick, and are observed from kilometres away, both day and night (coloured), with no artificial lighting. In 2025, no drone or commercial instrument will reconstruct a dense cloud of a few-millimetre mesh from hundreds of metres away while measuring its diameter. We have been the first ever to develop a cutting-edge method for scanning rocky masses, first on a scale of a hundredth of a millimetre, then on a scale of a thousandth of a millimetre, and not just for the stone world.



Figure 29. Night scan of a rockfall drape

RESEARCH EFFORTS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

The Team led by Nicola Santoro, the inventor of Unorthodox Geomatics, continue working in research for a number of industries. Other VRS applications, i.e. metrological-grade ultra-long-range photogrammetry, are described below.

All such research efforts are focussed on light, an efficient extraction of data that may be relevant to engineering, and photogrammetry by ultra-high-resolution photography, the genetic code that inspires our progress. An explanation about the use of Artificial Intelligence is in order here: now, there are two types of algorithms that go hand in hand with and often supervise geomatics. Generative and nongenerative ones.

No generative algorithms were used in our research work because the goal is improving the efficiency of the transducer called pixel, not adding more acceptable ones. Generative AI requires well-considered supervision and, in our job, it works well in predicting scenarios, where models have to be adjusted, a very important issue. Of course, photogrammetry is statistics and probability theory, and so is measurement, which is never exact. An extremely strong bond needs to be held between the analogue world and the digital world: a cornerstone of geotechnical and structural monitoring is what we call the structural avatar, the dual IMAGO, an endless flow between changes in the physical world and its digital representation. A structural avatar, the dual IMAGO, is much more than a digital twin, it is the epistemological model we have discussed so far. Visual Remote Sensing (VRS) is solely based on photogrammetry (Figure 30-31). Unlike the most commonly used methods, it can take measurements from a huge distance, even with no sunlight-grade natural or artificial light or even when smothered in airborne particles, such as dust from machining processes, or fog.

Just like classic photogrammetry, it is based on a photographic product but uses state-of-the-art technology to extract information in critical conditions or information that could not be acquired by standard photographic devices. So, we can detect the geometric morphology in total darkness, while a traditional source of light will still be there for the geomatician's surveys (Figure 32).

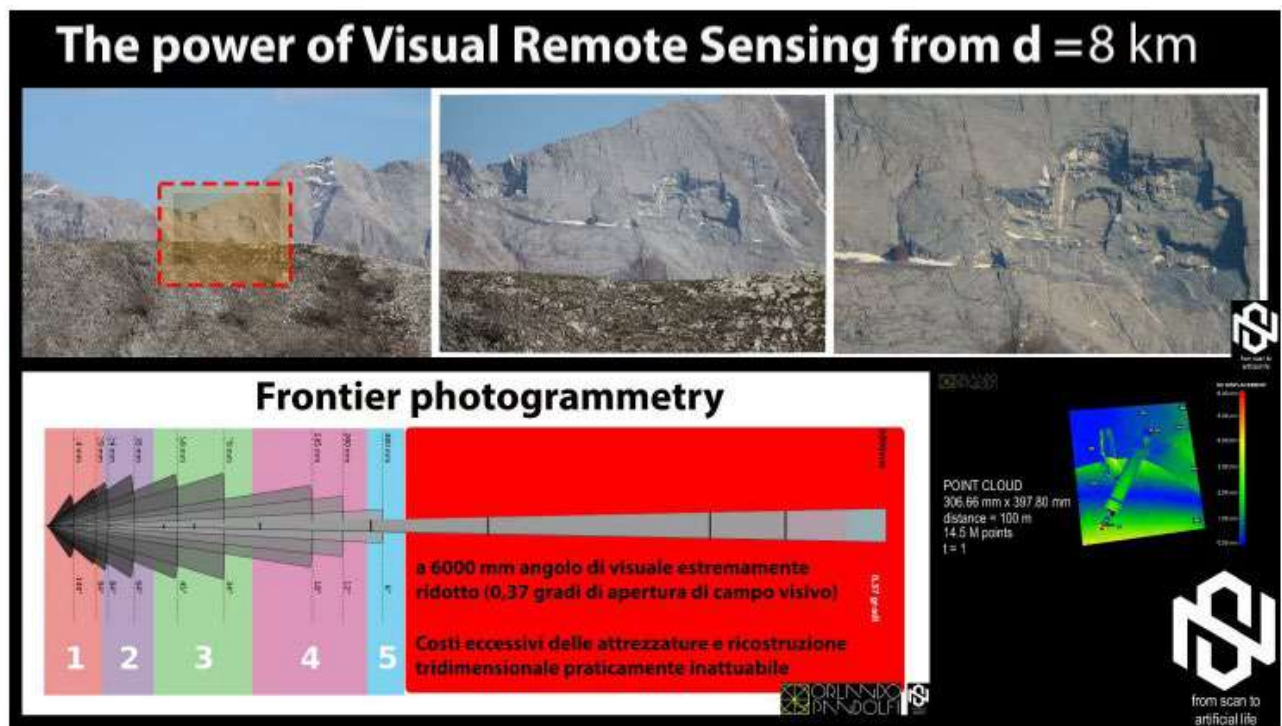


Figure 30. Frontier photogrammetry

We designed and built an optical chain and algorithms to obtain highly-detailed technical photographs from an extremely long distance.



Figure 31. This slide demonstrates image resolution captured at a precision of one hundredth of a millimetre. Our system combines advanced optics and custom algorithms to capture ultra-high-resolution technical images from great distances.

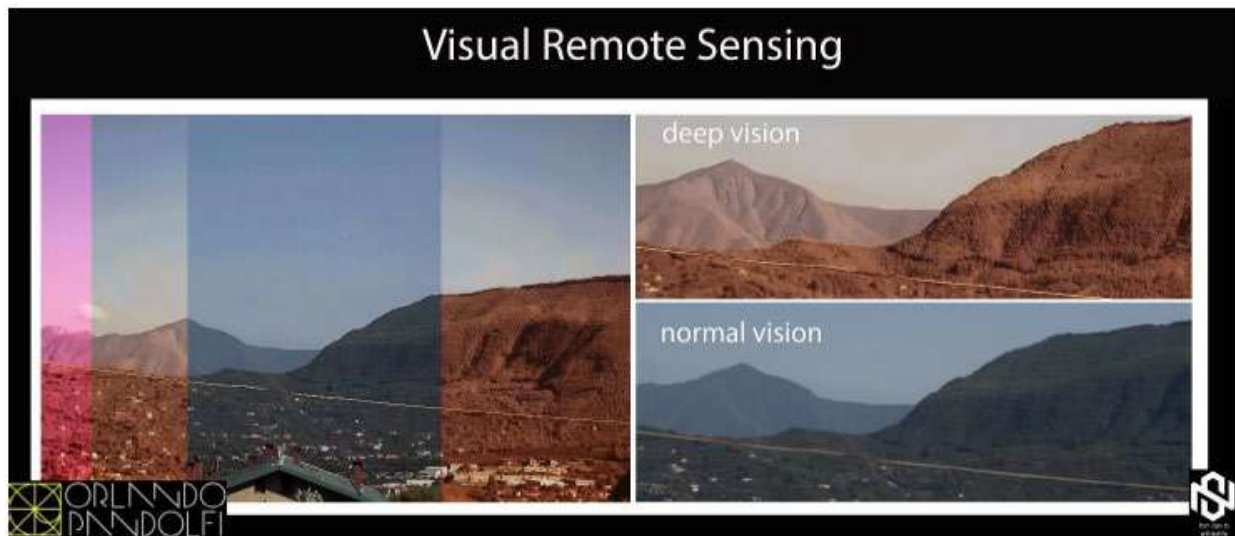


Figure 32. Deep vision.

At the current stage of technological development, we have a visual system capable of simultaneously capturing both the sea surface and the seabed. We believe that future advancements will lead to the creation of a visual sonar, operating from a great distance above the sea surface.

We exploit light at specific wavelengths to obtain more information, penetrating dust, fog, and atmospheric disturbances. This allows us to monitor the quarry even at night, in the absence of visible light.

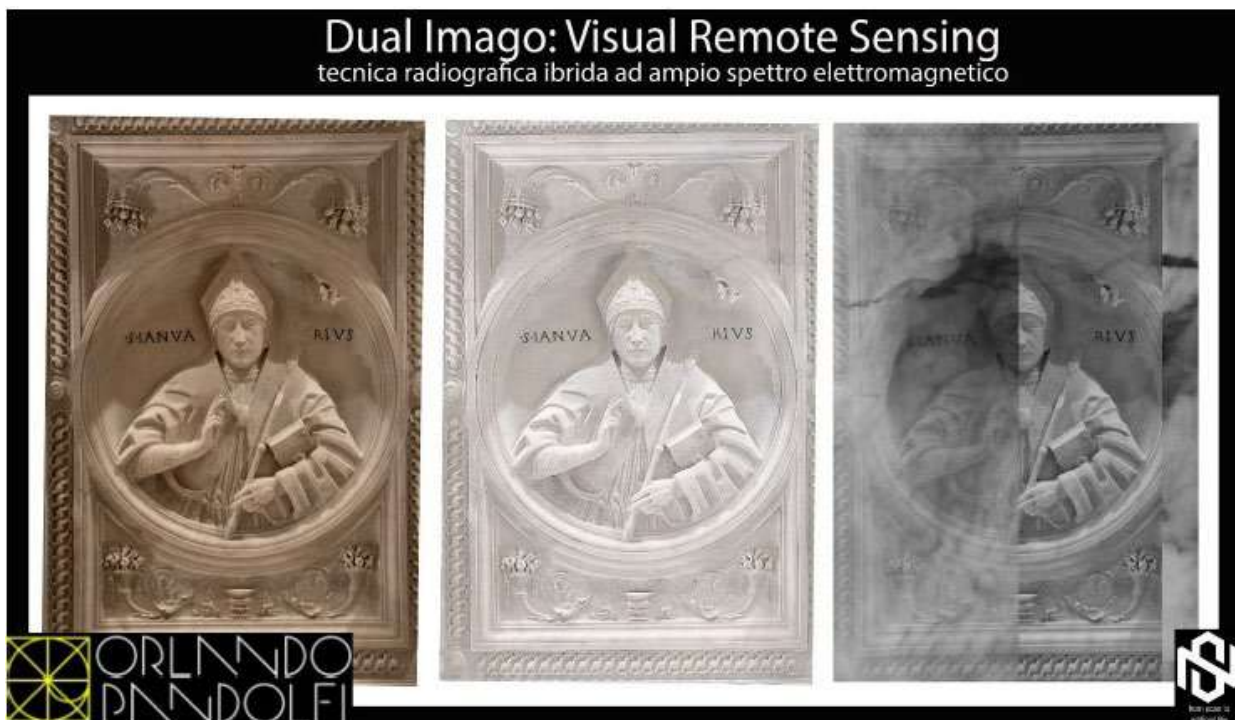


Figure 33. Optical tomography. We are inside the Naples Cathedral, in the Crypt of San Gennaro. The ceiling is covered in Carrara marble. A deep scan was successfully performed, allowing a complete reconstruction of the fracture pattern, which is normally invisible.

The most important image (Figure 33) of the frontier studies Nicola Santoro is engaged in has been put at the end of this article. It is Visual Remote Sensing applied to deep sea, with photos taken from different heights that give us a fairly accurate analysis of the depths of the sea and change man's perception of the seabed. A separate article will be written about this.

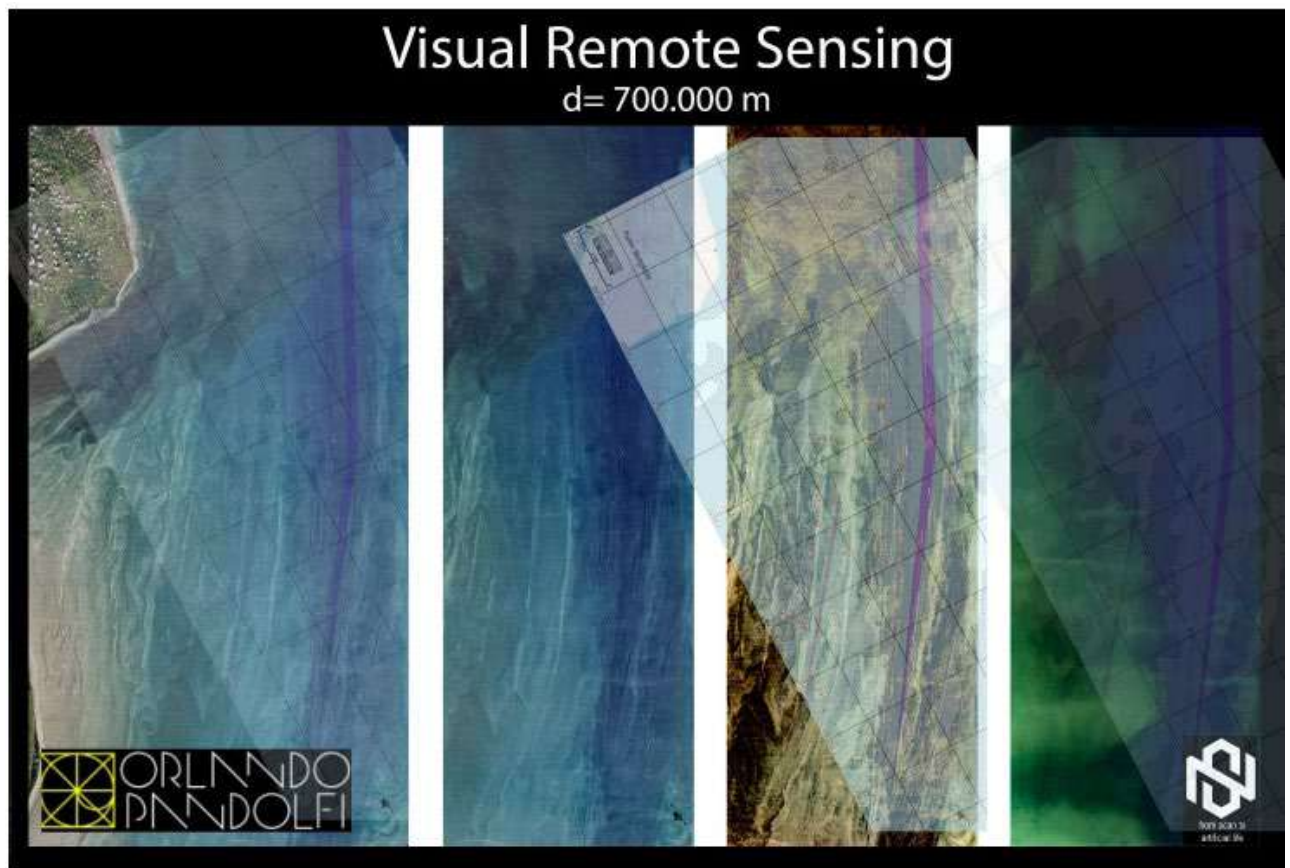


Figure 34. Strait of Malacca. We are looking at a two-layer image: the sea surface and the underwater morphology.

REFERENCES

[1] Felitti, M., Mecca, L. R., & Santoro, N. (2022, 26 aprile). Metodi avanzati di indagine chimica su ponti e viadotti: analisi del degrado del ponte sul Basento a Potenza. Ingenio.

<https://www.ingenio-web.it/articoli/metodi-avanzati-di-indagine-chimica-su-ponti-e-viadotti-analisi-del-degrado-del-ponte-sul-basento-a-potenza/>

[2] Morin, E. (1977–2004). La méthode (Vols. 1–6). Éditions du Seuil.

[3] Morin, E. (1990). Introduction à la pensée complexe. ESF.

[4] Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation. Oxford University Press.

[5] A.N.I.M. & Pandolfi, O. (2021, 22 luglio). La prima assistente digitale, visuale e

integrata, per coltivare il marmo con semplicità. Quarry & Construction Web.

<https://www.quarryandconstructionweb.it/rubriche/collaborazioni/la-prima-assistente-digitale-visuale-e-integrata-per-coltivare-il-marmo-con-semplicit%C3%A0.htm>

[6] Segoni S, Piciullo L, Gariano SL (2018) Preface: Landslide early warning systems: monitoring systems, rainfall thresholds, warning models, performance evaluation and risk perception. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18(12): 3179-3186.

[7] Dei Cas L., Trigila A., Iadanza C. (eds) *Linee Guida per il monitoraggio delle frane. Linee Guida SNPA 32/2021.*

[8] Kromer R, Walton G, Gray B, Lato M, Group R (2019) Development and optimization of an automated fixed-location time lapse photogrammetric rock slope monitoring system. *Remote Sensing* 11(16): 1890.

[9] Kim DH, Gratchev I (2021) Application of optical flow technique and photogrammetry for rockfall dynamics: A case study on a field test. *Remote Sensing* 13(20): 4124.

[10] Gharajedaghi, J. (1999). *Systems thinking: Managing chaos and complexity—A platform for designing business architecture* (3rd ed., 2011). Butterworth-Heinemann.

[11] von Bertalanffy, L. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications*. George Braziller. (Reprint 2003)

[12] Checkland, P. (1981). *Systems thinking, systems practice*. Wiley.

[13] Giere, R. N. (1988). *Explaining science: A cognitive approach*. University of Chicago Press.

[14] Floridi, L. (2011). *The philosophy of information*. Oxford University Press.

[15] Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

[16] Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support (Q-system). *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236.

[17] Palmström, A. (2001). Measurement of blast-induced damage and the rock mass response using R_{Mi} (Rock Mass index). In *Proceedings of the International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting* (pp. 23–38). Balkema.

[18] Oreste, P., Oggeri, C., Canali, F., & Scolari, M. (2024). The Cava Madre of Candoglia: The centuries-old cavern from which the marble is extracted for the construction and the perpetual conservation of the Milan Cathedral. *Geoheritage*, 16.

[19] Felitti, M., Mecca, L. R., & Santoro, N. (2022). *Diagnosi del degrado: Metodi avanzati per lo studio dei materiali e dell'ambiente costruito*. Maggioli Editore.

<https://www.mondadoristore.it/diagnosi-del-degrado-metodi-avanzati-per-lo-studio-dei-materiali-e-dellambiente-costruito-libro-nicola-santoro-matteo-felitti-lucia-rosaria/p/9788891658890>

[20] Felitti, M., Mecca, L. R., & Santoro, N. (2022, May 12). Geomatica non ortodossa per rilievi e monitoraggi con modelli 3D intelligenti. GeoSmart Magazine.

<https://geosmartmagazine.it/2022/05/12/geomatica-non-ortodossa-modelli-3d-intelligenti/>

[21] Pandolfi, O. (2022, October 20). Quarry risk awareness in the digital twin era. Workshop “Improving Occupational Health and Safety in Marble Sector Project”, Afyon, Turkey.

[22] Santoro, N. (2022). La diagnostica per immagini nell’ingegneria civile: Casi applicativi sui ponti. Ediltecnico.

<https://ediltecnico.it/diagnostica-strutturale-per-immagini-ingegneria-civile-casi-applicativi-sui-ponti/>

[23] Pandolfi, O. (2023, May 6). The twin marble quarry: La trasformazione digitale nella coltivazione delle pietre ornamentali. SaMoTer – ANIM, Futuro e innovazione nelle attività estrattive.

[24] Santoro, N. (2023, October 11). Dal rilievo 3D superficiale al rilievo tomografico. GeoSmart Magazine.

<https://geosmartmagazine.it/2023/10/11/dal-rilievo-3d-superficiale-al-rilievo-tomografico/>

[25] Pandolfi, O. (2023, November 16). Innovative monitoring and modelling for rock slopes’ stability: The Carrara marble quarries. World Landslide Forum 2023, Florence, Italy.

[26] Pandolfi, O. (2023, June 5–8). 3D advanced technologies applied in the virtualization process of the quarries. 23rd China Xiamen International Stone Fair.

[27] Pandolfi, O. (2023, September 26–29). E!PETRA The Twin Marble Quarry. Marmomac. Verona, Italy.

[28] Pandolfi, O. (2024, March 16–19). Safety monitoring and control measures of open-pit stone quarry sides’ slopes. Xiamen International Stone Fair, Xiamen, China.

[29] Pandolfi, O. (2024, September 24–27). Safety monitoring and control measures of open-pit stone quarry sides’ slopes. Marmomac, Verona, Italy.

[30] Santoro, N. (2024, November 2). Geomatica non ortodossa per monitoraggio strutturale e geotecnico. GeoSmart Magazine.

<https://geosmartmagazine.it/2024/11/02/geomatica-non-ortodossa-per-monitoraggio-strutturale-e-geotecnico/>

[31] Dessena, A., Careddu, N., Sitzia, F., Pandolfi, O., Pia, L., & Santoro, N. (2025, June 16–20). Digitalization of quarrying process and environmental parameters. 8th Global Stone Congress, Drama, Greece.

[32] Margottini, C., Pandolfi, O., & Santoro, N. (2025, September 11–12). Dual IMAGO: Innovativo metodo di visual remote sensing submillimetrico per il rilievo e monitoraggio di precisione del territorio anche da lunga distanza. II Seminario Tecnico Nazionale “Opere geotecniche per argini e rilevati: innovazione, ricerca ed applicazioni”, Argenta (FE), Italy.

[33] Pandolfi, O., Santoro, N., & Pia, L. (2025, September 17–19). Dual IMAGO: An innovative cost-effective technology of visual remote sensing for underground mining. REMTECH EXPO, Ferrara Fiere, Italy.

[34] Pandolfi, O. (2025, September 26). Metodo visuale dual IMAGO: dalle cave all’arte, umanesimo e ingegneria. Marmomac, Verona, Italy.

[35] Santoro, N. (2025, September 22). Duomo di Napoli: Il rilievo 3D e innovazioni della geomatica. GeoSmart Magazine.

<https://geosmartmagazine.it/2025/09/22/duomo-di-napoli-rilievo-3d-innovazioni-geomatica/>

[36] Margottini, C., Pandolfi, O., & Santoro, N. , (2025, 25/27 November). AIUla International Symposium on Sustainable Conservation of Rupestrian Heritage Sites.

[37] Baldin, A., Furlanetto, L., Roversi, A., & Turco, F. (1986). Manuale della manutenzione degli impianti industriali. FrancoAngeli.

[38] Cardile, D., Mayer, G., & Moder, P. (2018). Trasformazione digitale: Strategie e strumenti per le PMI del futuro. Egea.

[39] Casani, M., & Majonchi, M. (2017). Come usare al meglio l’Internet delle cose: Guida IoT per manager e imprenditori. Tecniche Nuove.

[40] Chen, K. (2021). Digital twin. Royal Collins Publishing Company.

[41] Furlanetto, L., Garetti, M., & Macchi, M. (2007). Ingegneria della manutenzione: Strategie e metodi. FrancoAngeli.

[42] Kranz, M. (2018). Connetti la tua impresa all’IoT: Come introdurre nuovi modelli di business, sbaragliare i concorrenti e trasformare il tuo settore. FrancoAngeli.

[43] Leonardi, E. (2012). Disegnare i processi: Il metodo ZOOM UP. La persona e il gruppo. La comunicazione interna. FrancoAngeli.

[44] Ronchi, M., & Cancia, M. (2019). Digital transformation: Metodi e strumenti per guidare l’evoluzione digitale delle imprese attraverso design, marketing e comunicazione. FrancoAngeli.

[45] Schwab, K. (2016). La quarta rivoluzione industriale. FrancoAngeli.

[46] Sinibaldi, A. (2009). La gestione dei processi in azienda: Introduzione al business process management. FrancoAngeli.

[47] Sinclair, B. (2017). IoT Inc.: How your company can use the Internet of Things to win in the outcome economy. McGraw-Hill Education.

[48] Sirinanda, K. (2022). Sustainable mining in an AI-driven world. Independently published.

DESTEKLEYEN KURULUŞLAR

9.Bölüm



SPONSORLAR

10.Bölüm





AFYONKARAHİSAR TİCARET VE SANAYİ ODASI



NEW
Spirit

Warehouse: 97. Sok No:11 Fethatopasa Atagehir-Istanbul
Main Factory: Organize Sanayi Bölgesi 1.Cd 3. Sk No:7
Merkez-Afyonkarahisar

www.alimoglu-marble.com
☎ +90 (272) 221 10 55



ALIMOĞLU
MARBLE

SLABBASE

DENİZLİ, İŞLENMİŞ DOĞAL TAŞ GRUBUNDA ÜLKE ÇAPINDA LİDER KONUMDA

2025 yılı Ocak-Eylül döneminde;
6802 işlenmiş doğal taş
GTİP grubunda 107,
2515 blok mermer
GTİP grubunda 35 ülkeye,
geçen senenin aynı dönemine göre
%10 artışla 212 milyon dolar
ihracat gerçekleştiren 308 firmamıza
teşekkür ederiz.



 denibdenizli

 DenibDenizli

denib@denib.gov.tr

 Denizli İhracatçılar Birliği

www.denib.gov.tr

EGEBİM
TÜRKİYE İSTONERİBİRLİĞİ

eib
EGE MADEN
İHRACATÇILARI BİRLİĞİ

Türk Doğal Taşının Yolculuğu, Artık Sınır Tanımıyor...

Doğadan ilham aldık, dijitale taşıdık.
Şimdi dünyaca ünlü mimarların
imza projelerinde hayat buluyor.



Canlı çevrimiçi katalog ile ürünleriniz global
projelerde yer alıyor. Mimarlar doğal taşınızı birebir
deneyimleyip teknik verilerine anında ulaşıyor.

Siz de yerlnızı alın!

www.egebim.com







En Yaygın Satış Ağı Olan

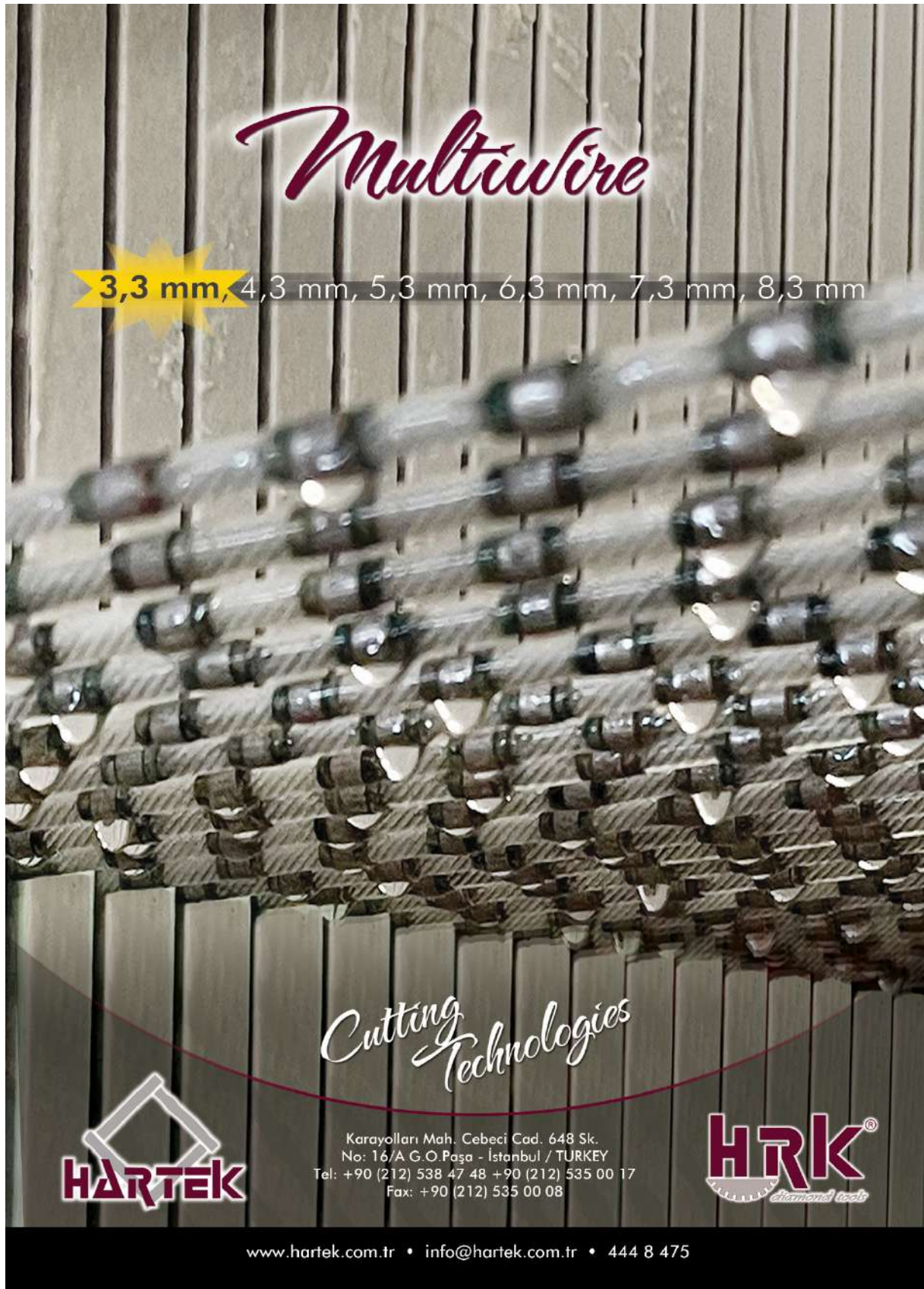
TAS Şirketi

22 İlide **27** Satış Merkezi **6** Ocak **5** Fabrika

400'ü Aşkın Deneyimli Çalışan
Milyonlarca m² Taş
Binlerce Mutlu Müşteri
Binlerce Prestijli Proje



GRANİTAS



Multewire

3,3 mm, 4,3 mm, 5,3 mm, 6,3 mm, 7,3 mm, 8,3 mm

Cutting Technologies

HARTEK

Karayolları Mah. Cebeci Cad. 648 Sk.
No: 16/A G.O.Paşa - İstanbul / TURKEY
Tel: +90 (212) 538 47 48 +90 (212) 535 00 17
Fax: +90 (212) 535 00 08

HRK®
diamond tools

www.hartek.com.tr • info@hartek.com.tr • 444 8 475

DOĞANIN SESSİZ SANATI

 **Turkish
Stones**

İMİB İSTANBUL
MADEN İHRACATÇILARI
BİRLİĞİ



www.megamer.com.tr

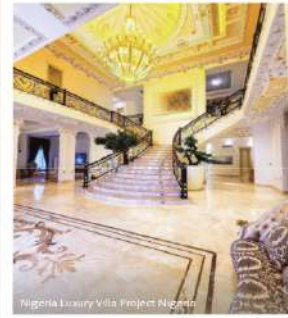
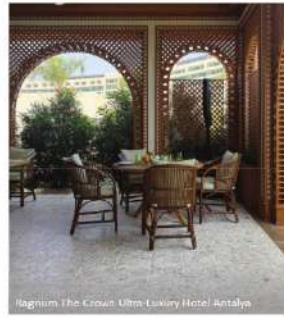
mega mer



 **Organize Sanayi Bölgesi Mah.**
5. cad. No: 4/1 İncehisar/ Afyonkarahisar
 **info@megamer.com.tr**
 **0272 223 1875**



663



MARBLE SYSTEMS | TUREKS TURUNÇ MADENCİLİK

www.tureks.com

FACTORY : Organize San. Bol. 1. Cd. 5. Sk. Afyonkarahisar/Turkey Phone: +90 272 221 1600 | Fax: +90 272 221 1603
ISTANBUL SKYLAND SHOWROOM : Skyland HOM Design Center Sanyer/Istanbul Phone: +90 212 890 20 22
EXPORT DEPARTMENT : Ferhatpaşa Mah. Ulu Önder Bulv. No:32-36 Ataşehir, İstanbul/Turkey Phone: +90 216 580 84 30
TUREKS USA OFFICE: 2737 Dort Avenue Fairfax, VA 22031 Phone: 703 204 4548 | Fax: 703 752 6590



tureks



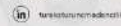
tureks



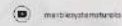
tureksmarble



tureksmarble



tureksuznemadencilik



marblesystemmarble