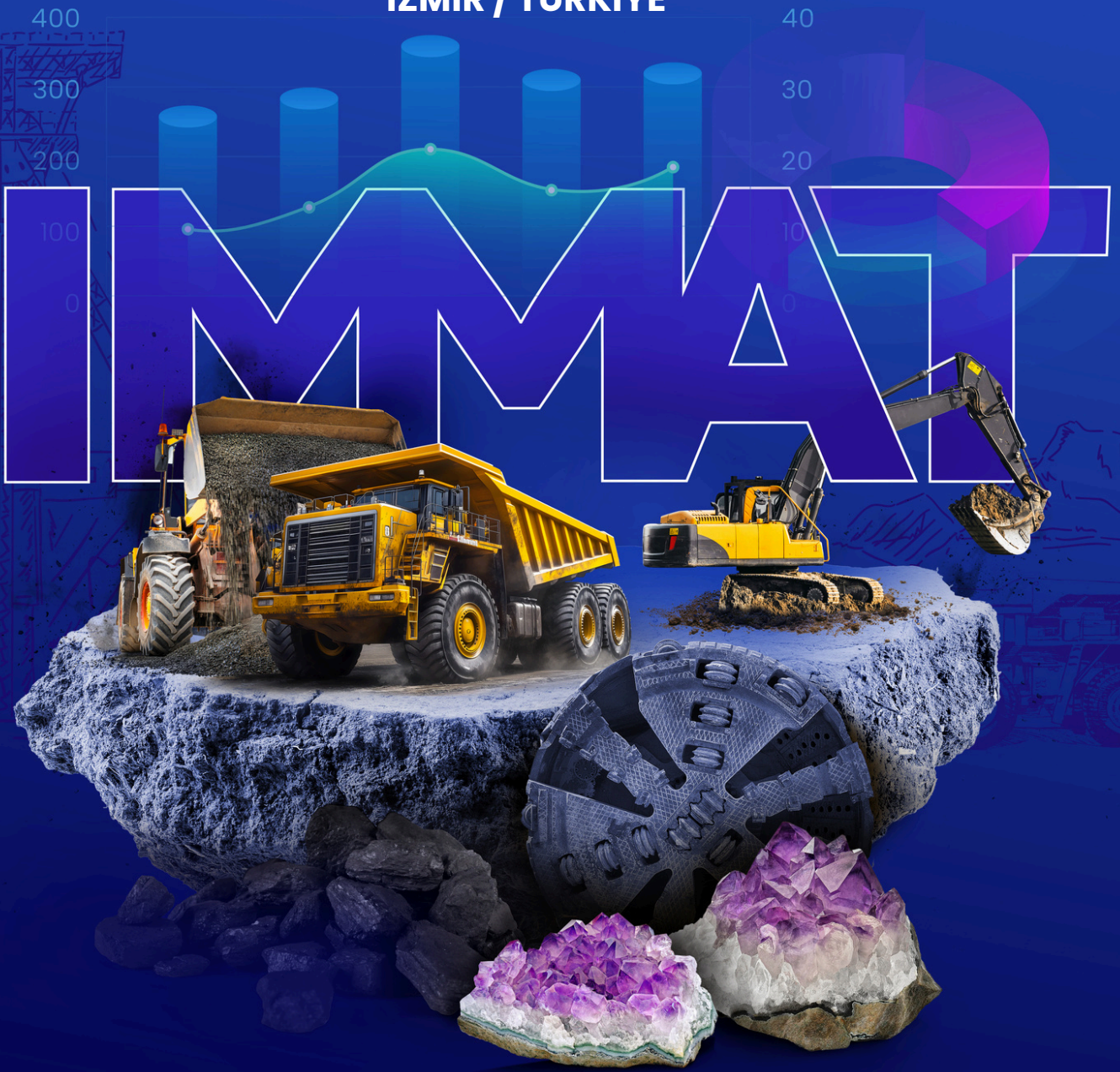


10. ULUSLARARASI MADEN MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ KONGRESİ BİLDİRİLER KİTABI

PROCEEDINGS OF 10th INTERNATIONAL CONGRESS
OF MINING MACHINERY & TECHNOLOGIES

03-05 EYLÜL | SEPTEMBER 2025
İZMİR / TÜRKİYE



MINEX



EDİTÖRLER | EDITORS
DR. AHMET HAMDİ DELİORMANLI
DR. GÖKHAN TURAN

10. ULUSLARARASI MADEN MAKİNALARI VE
TEKNOLOJİLERİ KONGRESİ
BİLDİRİLER KİTABI

PROCEEDINGS OF
10th INTERNATIONAL CONGRESS OF MINING
MACHINERY & TECHNOLOGIES

03-05 Eylül | September 2025
İzmir – Türkiye

Editörler | Editors

Dr. Ahmet Hamdi DELİORMANLI

Dr. Gökhan TURAN



TMMOB, Maden Mühendisleri Odası
UCTEA, Chamber of Mining Engineers of Türkiye

10. ULUSLARARASI MADEN MAKİNALARI VE
TEKNOLOJİLERİ KONGRESİ
BİLDİRİLER KİTABI

PROCEEDINGS OF
10th INTERNATIONAL CONGRESS OF MINING
MACHINERY & TECHNOLOGIES

03-05 Eylül | September 2025

İzmir – Türkiye

İnternet Sitesi | Website: www.immat.org.tr

Tüm Hakları Saklıdır © 2025

TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın yazılı izni olmaksızın bu e-kitap veya bu e-kitabın herhangi bir kısmı yayınlanamaz.

All rights reserved © 2025

No parts of this e-book may be reproduced in any forms any means, without written permission of The Chamber of Mining Engineers of Turkey.

Editörler | Editors: Dr. Ahmet Hamdi DELİORMANLI, Dr. Gökhan TURAN

Dizgi | Layout: Dr. Gökhan TURAN

ISBN: 978-605-01-1465-2

SUNUŞ

Birincisi 2007 yılında düzenlenen ve akabinde ülkemizin değişik şehirlerinde organize edilen Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi 6. Kongreden itibaren MINEX Fuarı ile birlikte ve iki yılda bir düzenli olarak İzmir Şubemiz ile İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından ortaklaşa düzenlenmeye başlamış ve 2017 yılından itibaren de uluslararası bir kimliğe bürünmüştür.

Kongre Bildiriler Kitabı, IMMAT2025 sırasında sunulan katkıların çoğunun yazılı versiyonlarını içermektedir. Bu kitap kapsamında madencilikle ilgili konular, sağlanan çözümler, madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliğinin bilimsel ve teknik yönleri ve bunların sosyal etkileri ele alınmaktadır. IMMAT2025, bilim adamlarının ve endüstrinin bir araya geldiği, madencilik sektöründeki son teknolojik gelişmeler, üretim yöntemleri ile ilgili verimli tartışmalara olanak sağlayan bir platform oluşturdu. Kongre, gerek ülkemizden ve gerekse çeşitli ülkelerden gelen katılımcıların kendi araştırma alanlarındaki konuları sunmaları ve tartışmaları için de iyi bir fırsat olmuştur.

Maden mühendisliğinin ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi açısından diğer mühendislik konularına paralel olarak özünde geliştiğini söylemeye gerek yok. Ancak madencilik sektörü, salt teknik ve ekonomik yönlerin yanı sıra çevre, iş güvenliği ve kamu denetimi konularıyla ilgili birçok zorlukla karşı karşıyadır. Bu kapsamda çözüm önerilerinin anlatılması, tartışılması ve kayıt altına alınması amacıyla IMMAT2025 düzenlenmiştir.

IMMAT 2025, 3-5 Eylül 2025 tarihleri arasında TMMOB Maden Mühendisleri Odası ile İzmir Büyükşehir Belediyesi birlikte düzenlenmiştir. Kongremizde açılış oturumu ile birlikte toplam 6 oturum ve bir panel düzenlenmiştir. Oturumlarda 18 adet bilimsel bildiri yayına alınmıştır.

TMMOB Maden Mühendisleri Odası olarak; kongre ve fuarın düzenlenmesinde ortağımız olan İzmir Büyükşehir Belediyesi ve İZFAŞ Genel Müdürlüğü ile Maden Mühendisleri Odası İzmir Şubesi'ne, Kongre Yürütme Kurulu Başkan ve üyelerine, kongremize bilimsel zenginlik kazandıran bildiri sahipleri, kongre yürütümünde kolaylaştırıcı olan oturum başkanları ile bildirilerin değerlendirilmesinde görev üstlenen Bilimsel Kurul üyelerine teşekkür ederiz.

Saygılarımla;

Ayhan YÜKSEL
TMMOB Maden Mühendisleri Odası
Yönetim Kurulu Başkanı
03 Eylül 2025, İzmir

ÖNSÖZ

Değerli Madencilik Sektörü Paydaşları,

Türkiye'nin maden teknolojilerindeki en önemli buluşma noktalarından biri olan 10. Uluslararası Maden Makineleri ve Teknolojileri Kongresi (IMMAT 2025), 3-5 Eylül 2025 tarihlerinde İzmir'de, Fuarİzmir'de gerçekleştirilecektir. Bu yıl "Akıllı Madencilik: Dijital Dönüşüm ve Sürdürülebilir Teknolojiler" temasıyla düzenlenecek olan kongremiz, sektörün geleceğini şekillendiren en yeni teknolojileri, inovatif çözümleri ve küresel trendleri masaya yatıracaktır.

Madencilik sektörünün dijitalleşme, otomasyon ve yeşil dönüşüm gibi kritik konularının ele alınacağı IMMAT 2025, sadece bir kongre değil, aynı zamanda sektör profesyonellerinin bir araya gelerek fikir alışverişinde bulunacağı, yeni iş birlikleri kuracağı ve geleceğin teknolojilerini keşfedeceği bir platform olacaktır. Kongre boyunca dünyanın önde gelen firmaları, son teknoloji maden makinelerini ve çözümlerini sergileyecek, akademisyenler ve araştırmacılar en güncel bilimsel çalışmalarını paylaşacak, sektörün önde gelen isimleri ise vizyoner sunumlarıyla katılımcılara ilham verecektir.

Sizleri, maden teknolojilerindeki son gelişmeleri yakından görmek, sektörün öncüleriyle bir araya gelmek ve Türkiye'nin madencilik alanındaki dönüşümüne tanıklık etmek için IMMAT 2025'e davet ediyoruz. Bu kongre, yalnızca bilgi edinmek için değil, aynı zamanda sektördeki yerinizi güçlendirmek ve yeni fırsatları değerlendirmek için eşsiz bir fırsat sunacaktır.

3-5 Eylül 2025 tarihlerinde Fuarİzmir'de buluşmak üzere!

Prof. Dr. Ahmet Hamdi DELİORMANLI
Kongre Yürütme Kurulu Başkanı

ORGANİZASYON KURULU / ORGANIZED BY

TMMOB Maden Mühendisleri Odası İzmir Şubesi
Izmir Branch of The Chamber of Mining Engineers

YÜRÜTME KURULU / EXECUTIVE COMMITTEE

Başkan / Chairman

Prof. Dr. Ahmet Hamdi DELİORMANLI
Dokuz Eylül Üniversitesi / Dokuz Eylül University

II. Başkan / Co-Chairman

Aykut AKDEMİR
Maden Mühendisleri Odası / Chamber of Mining Engineers of Turkey

Yazman / Secretary

Kemal SÖYLEMEZ
Maden Mühendisleri Odası / Chamber of Mining Engineers of Turkey

Sayman / Treasurer

İlhan ÇOLAK
Maden Mühendisleri Odası / Chamber of Mining Engineers of Turkey

Üyeler / Members

Prof. Dr. Vedat ARSLAN	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Çağatay PAMUKÇU	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Hayati YENİCE	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Abdullah SEYRANKAYA	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Doğan KARAKUŞ	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Prof. Dr. M. Kemal ÖZFİRAT	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Doç. Dr. Mehmet Volkan ÖZDOĞAN	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Doç. Dr. Mustafa Emre YETKİN	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Dr. Çağrı ÇERİK	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Dr. Gökhan TURAN	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Mehmet Emre KILINÇ	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Ekincan ÖZTEKİN	<i>İZFAŞ</i>
Başak Melike TİTİZ	<i>İZFAŞ</i>



TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI
YÖNETİM KURULU
THE EXECUTIVE BOARD OF THE CHAMBER OF
MINING ENGINEERS

Başkan / President	Ayhan YÜKSEL
II. Başkan / Vice President	Bülent TOKA
Yazman / Secretary	Veyis SIR
Sayman / Treasurer	Mehmet ZAMAN
Üyeler / Members	Pelin Kertmen ÖZER
	Alper ENTOK
	Fatih TÜTÜNCÜ

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI İZMİR ŞUBE
YÖNETİM KURULU
THE EXECUTIVE BOARD OF İZMİR BRANCH OF THE CHAMBER OF
MINING ENGINEERS

Başkan / President	Aykut AKDEMİR
II. Başkan / Vice President	Mustafa HACARLIOĞLU
Yazman / Secretary	Mevlüt Kemal ÇAKMAK
Sayman / Treasurer	İlhan ÇOLAK
Üyeler / Members	Arzu Oğuzkurt DOĞAN
	Ergül ÇATALBAŞ
	Seray ÇAKAR

İÇİNDEKİLER | CONTENTS

SUNUŞ.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ORGANİZASYON KURULU / ORGANIZED BY.....	v
TMMOB YÖNETİM KURULU / EXECUTIVE BOARD of UCTEA.....	vi
BİLDİRİLER / PROCEEDINGS.....	vii

BİLDİRİLER | PROCEEDINGS

Underground Mining Machinery: Evolution, Technology, and the Road Ahead <i>Joung. Oh</i>	1
Machine Selection Criteria For Excavation and Construction in Variety of Rock Mass Conditions <i>S. Yağız</i>	4
Akademiden Sahaya Dijital Madencilik: Küresel Rekabet için Müfredat Yenilikleri ve Uygulama Örnekleri <i>From Academia to the Field: Curriculum Innovations and Practical Applications in Digital Mining for Global Competitives</i> <i>G.G.U. Aksoy</i>	11
Elektronik Atıkların Geri Dönüşümünde Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Teknolojileri: Uygulama Alanları ve Yöntemler <i>Ore Preparation and Beneficiation Technologies in E-Waste Recycling: Application Areas and Methods</i> <i>F. Burat</i>	19
Kömür Hazırlama Tesi Tasarımında Genel Yaklaşım Ölçütlerindeki Sorunlar <i>Problems Observed in General Approaches to Coal Preparation Plant Design</i> <i>V. Arslan</i>	29
Pnömatik Flotasyon Hücreleri ve Yeni Bir Pnömatik Flotasyon Hücresi <i>Pneumatic Flotation Cells and a New Pneumatic Flotation Cell</i> <i>Ö.Y. Gülsoy</i>	40
Tünelciliğin ve Tünel Açma Makinalarının (TBM) Dünü Bugünü ve Yarını <i>The Past, Present and Future of Tunnelling and Tunnel Boring Machines (TBM)</i> <i>R. Altındağ</i>	52
Bulanık Çok Nitelikli Karar Verme Yöntemleri ile Ekipman Seçimi <i>Equipment Selection with Fuzzy Multi Attribute Decision Making Methods</i> <i>M. Yavuz</i>	64
Türkiye Doğaltaş Piyasasında Otonom Mermer Ocağı Tasarım-Uygulama ve Yatırım Analizi (Ocak 4.0) <i>Autonomous Marble Quarry Design, Implementation, and Investment Analysis in the Turkish Natural Stone Market (Quarry 4.0)</i> <i>İ.S. Büyüksağış, M. Gürsoy, E. Kısa</i>	73
Environmental Performance Assessment of Mining Machinery: A Life Cycle Perspective <i>N. Demirel</i>	90

Açık İşletmelerde Sürekli Sistem Döner Kepçeli Ekskavatör Yönteminde Üretkenlik <i>Continuous System Bucket Wheel Excavator Method Increasing Productivity in Open-Pit</i> T. Mallı, A.H. Deliormanlı, C.O. Aksoy	98
Mekanik Kazıda Bilgisayar Uygulamaları <i>Computer Applications in Mechanical Excavation</i> O.Z. Hekimoğlu	107
Nevşehir Bentonitlerinin Zenginleştirilme Süreçlerinin Verimliliğe Etkisinin İncelenmesi <i>Investigation of the Effect of Enrichment Processes on the Efficiency of Nevşehir Bentonites</i> A.K. Özdoğan, Y.Y. Özpamuk, H. Akıncı, A. Akbulut	113
Daha İyi Proses ve Nihai Ürünler için Öğütme ile Tane Şeklinin Modifikasyonu <i>Modification of Particle Shape by Grinding for Better Processing and Final Products</i> U. Ulusoy	122
Cevher Zenginleştirmede Ar-Ge ve Önemi <i>The Role and Importance of R&D in Mineral Processing</i> M. Tanrıverdi	151
Flotasyon Yönteminde Eski ve Yeni Teknolojiler <i>Old and New Technologies in The Flotation Method</i> H. Hacfazlıoğlu, İ. Kurşun, S.N. Turan	157
Creating Value from Water in Mining R. Salmimies, N. Harjula, E. Strand	168

UNDERGROUND MINING MACHINERY: EVOLUTION, TECHNOLOGY, AND THE ROAD AHEAD

Joung Oh

*University of New South Wales, School of Minerals and Energy Resources Engineering, Sydney, Australia
(joung.oh@unsw.edu.au)*

EXTENDED ABSTRACT

The evolution of underground mining machinery represents one of the most transformative technological journeys in the history of resource extraction. From the earliest mechanical coal cutters introduced in the late nineteenth century to today's intelligent, fully integrated excavation systems, the development of mining machinery has continuously reflected the interplay between innovation, geological complexity, and economic imperatives. This extended abstract traces the historical trajectory of underground machine mining, outlines key design principles and performance metrics, presents recent case studies and research outcomes, and explores emerging technologies that are reshaping the future of the industry.

Mechanised mining in Australia began in the 1880s, with machines such as the Gartscherrie coal cutter and Stanley air-powered heading machine pioneering production in soft rock environments. The early twentieth century saw incremental improvements in slotting and shortwall cutters, while loaders like the Jeffrey L400 highlighted the initial separation of materials handling from cutting operations. Post-World War II, labour shortages and rising demand accelerated mechanisation, leading to the development of continuous miners and hydraulic roof supports. These innovations introduced integrated systems that combined cutting, handling, and ground control. The reintroduction of longwall mining in the 1980s, supported by high-capacity roof supports, revolutionised productivity and established longwall systems as the dominant method for underground coal extraction, in particular Australia.



Figure 1. Evolution in underground mining machine

In parallel, hard-rock environments saw the emergence of machines such as Robbins' Mobile Miner and Alpine reef miners, which extended mechanical excavation into more competent ground. Mechanisation also advanced in shaft sinking and raising, with raisborers and blind-hole systems improving safety and efficiency in traditionally labour-intensive operations. By the late twentieth century, the integration of cutting, materials handling, roof support, and ventilation had become the hallmark of modern underground mining systems.

Fundamental design considerations underpin the performance and applicability of mining machinery. Full-face systems like tunnel boring machines (TBMs) excavate the entire tunnel cross-section in a single pass, while partial-face systems such as roadheaders remove material progressively. Cutterhead configuration, pick spacing, drive systems, mobility, and materials handling methods are all tailored to optimise performance under varying geological conditions. Decades of research have shown that cutter spacing-to-penetration ratios remain relatively consistent across sedimentary rocks, providing both theoretical and empirical foundations for machine design. TBM disc cutters, for instance, achieve rock breakage through rolling penetration and crushing, with performance governed by rock strength, disc geometry, and penetration depth. Research has shown that there are optimum spacing-to-penetration ratios, which improve the efficiency of rock cutting and are applied in cutterhead design.

TBMs have become central to underground construction, offering high advance rates in consistent geology, superior tunnel profiles, reduced worker exposure, and minimal environmental disruption. However, their limitations in handling variable geology, steep gradients, and non-circular geometries remain significant, particularly in mining applications where tunnel lengths are shorter and ground conditions more variable. Case studies illustrate both their potential and challenges. In Australia, Anglo American’s Grosvenor project marked the first TBM-driven coal mine access tunnels, achieving rapid advance and durable linings, though requiring adaptations such as flame-proofing for gassy conditions.

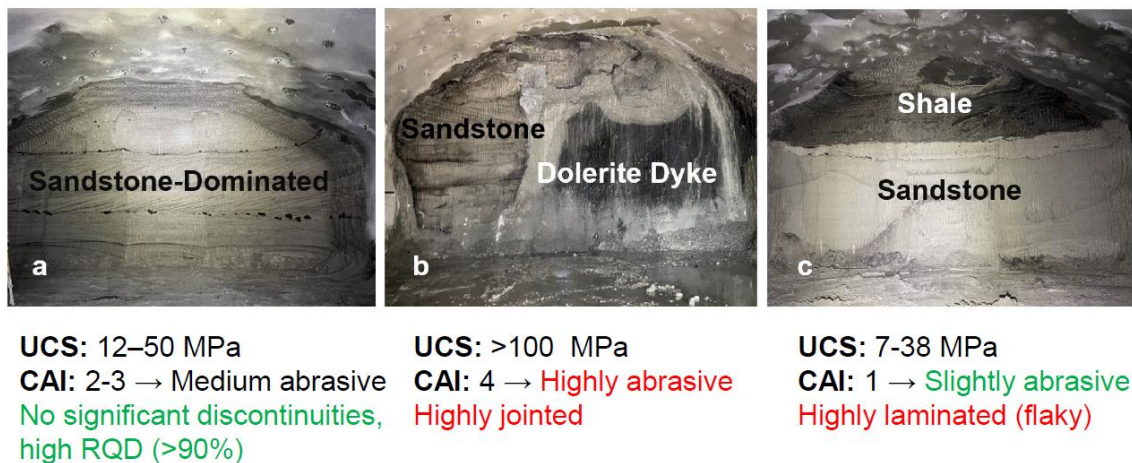


Figure 2. Impact of ground conditions on roadheader performance.

While TBMs dominate long, consistent drives, roadheaders remain indispensable for shorter, more variable tunnelling. Ongoing research at UNSW Sydney, in collaboration with the Colorado School of Mines, has focused on developing predictive models for roadheader performance in Sydney sandstone. Key performance indicators—including instantaneous cutting rate (ICR), cutter consumption rate (CCR), machine utilisation, and daily advance rate—have been correlated with rock mass classification systems, yielding valuable insights. Field data from the Sydney tunnel project reveal the impact of lithological variation and mixed-face conditions: sandstone enabled relatively high advance rates with moderate pick wear, shale reduced productivity, and intrusive dolerite significantly increased cutter consumption (Figure 2). Optimising advance length and correlating performance with support requirements are central outcomes of this research, with direct implications for budgeting, scheduling, and safety.

Looking ahead, machine mining is entering a new phase of innovation. Mid-twentieth-century US Army studies explored exotic rock fragmentation technologies—lasers, projectiles, and electron beams—but found them inefficient due to extreme energy demands. Recent developments, however, are revisiting assisted excavation methods with greater efficiency. Microwave-assisted cutting pre-heats and weakens rock; waterjet-

assisted TBMs enhance fragmentation; and laser-assisted cutting shows promise in reducing cutter wear. Komatsu's MC51, featuring DynaCut technology, exemplifies dynamic undercutting that exploits rock's tensile weakness, achieving significant progress in rocks exceeding 200 MPa. Field trials in Australia and Canada confirm its potential for advancing non-drill-and-blast mining in hard, abrasive environments. Meanwhile, novel machine geometries, such as rectangular and horseshoe-shaped TBMs, are expanding the application envelope, enabling more functional tunnel profiles for haulage and access.

The trajectory of underground mining machinery reflects a continuous balancing act between geological challenges, economic imperatives, and technological innovation. From hand-held coal cutters to intelligent, sensor-equipped excavation systems, the industry has adapted to extract resources more efficiently, safely, and sustainably. Today, predictive modelling, real-time monitoring, and hybrid cutting technologies are laying the foundation for a new paradigm in machine mining.

MACHINE SELECTION CRITERIA FOR EXCAVATION AND CONSTRUCTION IN VARIETY OF ROCK MASS CONDITIONS

S. Yağız

*Nazarbayev University, School of Mining and Geosciences, Department of Mining Engineering,
Geotechnical Engineering Division, Astana 010000 Kazakhstan
(saffet.yagiz@nu.edu.kz)*

ABSTRACT

One of the main issues for rock excavation and construction is the selection of the suitable excavation machine for encountered rock mass conditions by examining the rock and excavators related criteria. Rock excavation machines, such as; tunnel boring machine, raise borer, impact hammer, continuous miner, roadheader and longwall shearer are commonly used for mining and civil engineering application. Mechanical excavation and excavators offer numerous advantages over the drill and blast methods for all type of underground construction, including tunnels, underground mine, shafts etc. The most significant advantage offered by mechanical excavators is their potential for achieving high rates of production and advance at reduced excavation cost and time. Mechanical excavation industry continues its rapid pace of development in the coming years with machines becoming more versatile and capable of excavating through any type of ground condition from soft rock through hard rock mass conditions. In this paper, several common rock excavators are discussed and the machine-rock mass interaction is examined from the scope of geotechnical application points.

Keywords: Construction, criteria, excavation, machines, rock

INTRODUCTION

Both intact and mass rock properties and their influence on rock cutting, excavating and boring is crucial for any type of mechanized excavators such as; Tunnel Boring Machine (TBM), Roadheader (RH), Raise Boring Machine (RBM), Impact hammer (IH), Continuous Miner (CM), utilized in different type of rock mass condition. Due to that examining those properties together with machine specification and cutter head is necessary for any type of project from tunnel through underground opening. In fact, safety, time and budget are the main issues for any type of engineering projects; consequently, detail geotechnical site investigation, laboratory rock testing and machine selection criteria must be examined before starting the project excavation and construction. In this extended abstract, geotechnical site investigation, rock laboratory tests and machine selection criteria based on geotechnical report briefly discussed herein.

GEOTECHNICAL SITE INVESTIGATION AND ROCK TESTING

Any type of project not only mechanical excavation but also others such as drill-blast, cut-cover is initiated with several engineering tasks from simple through complicated one related to project. So, site investigation and testing are crucial to obtain the basis for:

- Overall planning, including siting and design optimization
- Analyzing rock mass stability and support requirements
- Evaluating alternative excavation methods
- Selecting excavation machines and related equipment

- Predicting the performance of excavators and its tool consumptions
- Assessing environmental impact and the disposal and/or use of excavated materials
- Scheduling includes safety, estimated time and cost and also preparing the tender documents

The complexity of the rock mass and geological condition in the field, represent great engineering challenges in the investigation, testing and interpretation of the results and characterization of rock mass and construction site. Each site has its own characteristics, due to that there is no standards investigation and procedure meet with project requirements; however, every geotechnical site investigation has more or less similar process and expected outputs such as production rate of machine and consumption rate of cutting tool (Nilsen and Ozdemir, 1999a; Yagiz 2002; Yagiz et al., 2008).

In this extended abstract paper, geotechnical site investigation stages and common mechanical excavators briefly summarized and then geotechnical report and performance prediction of excavators are discussed with some recommendation in conclusion.

It is generally accepted that investigations for tunnels and underground opening are best organized for maximum benefit if they are linked with the progress of engineering design and construction. Commonly, geotechnical site investigation can be divided in two stages:

Preconstruction phase (Pre-investigation): Underground excavation has not yet started and information has to be collected from surface.

Construction phase (Post-investigation): Even tunnel being excavated, the rock masses and geological conditions are accessible for inspection, sampling and testing as required (Ozdemir, 1998).

In pre-investigation stage, the siting of the project should be selected and then ground condition including geology and rock mass should be defined properly, since the most serious errors and misinterpretations are made at this stage being related to geotechnical site investigation and its reporting. Which factors are most important for the actual case, and what methods should be applied for investigation and testing, depend greatly on ground condition. General guidelines are given briefly as follow:

Desk Studies

One of the main stages of the geotechnical site investigation should not be underestimated. Significant amount of information related to site area might be obtained before going to field. This stage makes planning of the further investigations much easier, and also reduce the extent required field work and cost. Collection and evaluation of the background materials including topographical map; geological maps and reports; Air and satellitia photos; description of the project area for some level. If good quality background materials collected and desk study exists, valuable information could be obtained on every aspect of the ground conditions from geological formations through regional tectonics.

Field Studies

Field study includes field mapping, core drilling, geophysical testing and investigation, exploratory trenches, field testing, evaluation of rock stress and groundwater condition.

Field mapping should be carried out by geologist who should be focus on mechanical, mineralogical and petrography characteristics of rock mass and outcrops in the field. Field mapping also often provides good information about degree of weathering, orientation of discontinuities, local weak zones in rock mass, potential groundwater condition etc., (Nilsen and Ozdemir, 1999a, b; Yagiz et al., 2008).

Core drilling is among the common and routine methods for subsurface exploration. NX size core (core diameter of 54mm) core drill (hole diameter of 76mm) is used to obtain the representative rock samples from the rock mass. Drilling has multiple purposes such as verification of geological interpretation; obtaining information on rock type boundaries and degree of weathering along the drill hole; orientation and characterization of discontinuities; to provide samples for laboratory testing; hydrogeological and geophysical testing (Yagiz et al., 2024a, b). More, exploratory adits and trenches may be needed where core drilling is not available or in-situ measurement and/or testing is required.

Field Testing may cover many different aspects depend on the ground condition encountered and also type of purpose of the project. Most common one is In-situ stresses measurement via the over-coring technique, flat jack testing and/or hydraulic fracturing. Another one is to investigate groundwater condition of rock mass by pumping or injection (Lugeon) test.

Geophysics is most commonly used for underground excavation. In general, seismic refraction and reflection; cross hole tomography; geoelectric (resistivity); electromagnetic (radar); magnetic and gravitational methods could be used for the aim.

Rock Tests

In all geotechnical site investigation and rock characterization program, one of the key factors is rock sampling in the field to use for laboratory testing. Core sample or rock block should be gathered from the field for laboratory tests such as uniaxial (UCS) and triaxial (TCS) compressive, Brazilian tensile (BTS), point load index (PLI), Cherchar abrasivity index (CAI), brittleness, hardness, drill-ability, petrographic analysis (Nilsen and Ozdemir 1999a; Yagiz et al 2008; Macias et al., 2017).

Various tests have standardized as stated by the performance prediction model developed at the different organization and institutes (such as Colorado School of Mines-CSM and Norwegian University of Sciences and Technology-NTNU) around the world (Bruland, 1998; Yagiz 2008, 2009; Yagiz et al., 2012; Dhal et al., 2012); however, rock sample preparation and testing are mostly conducted according to the International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering-ISRM and American Standard for Testing Materials-ASTM. Further, using rock block (0.5x1.0x0.5m) instead of rock sample (NX), linear rock cutting test (LCM) can be conducted to quantify the characteristics of rock in laboratory condition. in this case, rock cutting forces including rolling and normal can be measured for different type of rocks (Rostami, 1997; Cigla et al., 2001; Yagiz et al., 2021).

It should be noted that the rock sampling and testing procedure and examining the failure of rock sample under different loading condition is very crucial, since output of the tests is used as input parameter for modelling and evaluating the rock characterization for scheduling.

MECHANICAL ROCK EXCAVATORS

Mechanical excavators are very common in the industry more than a couple decades. Usefulness of each of these excavators depend on the ground condition, purpose of the project and rock mass properties and condition. Due to that, before selecting the suitable machine for the project, geotechnical site investigation and data reports should be prepared with quantified data. After that, suitable excavators could be selected based on geological conditions such as fault and shear zone or geological formation. Depend on the rock mass condition from hard to soft rocks, ground water condition and in-situ stress in the field, proper excavator should be selected to complete the project. Such as, for soft rock condition roadheader may be suitable while TBM is convenient for hard rock cases (Figure 1). Also, since you could not replace the machine after hiring the machine, the crucial issue herein is to hire the proper machine for the project conditions. In the following

section, several common excavators for both soft to hard rock condition is briefly introduced as reference to select the suitable excavator for the project.

Tunnel Boring Machine (TBM)

Mechanical tunnel boring in hard rock has increased continuously since the 1950s, reaching several tens of meters of daily advance rates in competent rock. However, the success of mechanized tunneling is based on a continuous improvement of mechanical excavators during many years of engineering innovations. Hard rock TBMs may be mainly classified as open type, single shield, and double shield, with TBMs working in open and closed modes (EPB) in some special cases (Bilgin et al, 2014). Open-type TBMs are mainly suitable for competent rock or geological formations having little amount of geological discontinuities and water ingress while single-shield TBMs are used in hard rocks where geological discontinuities are frequent. More, double shield machine is suited for boring long tunnels in hard rock where long-distance weak weathered zones, geological fault and shear zones exist along the excavation line in rock mass conditions (Yagiz, 2023).

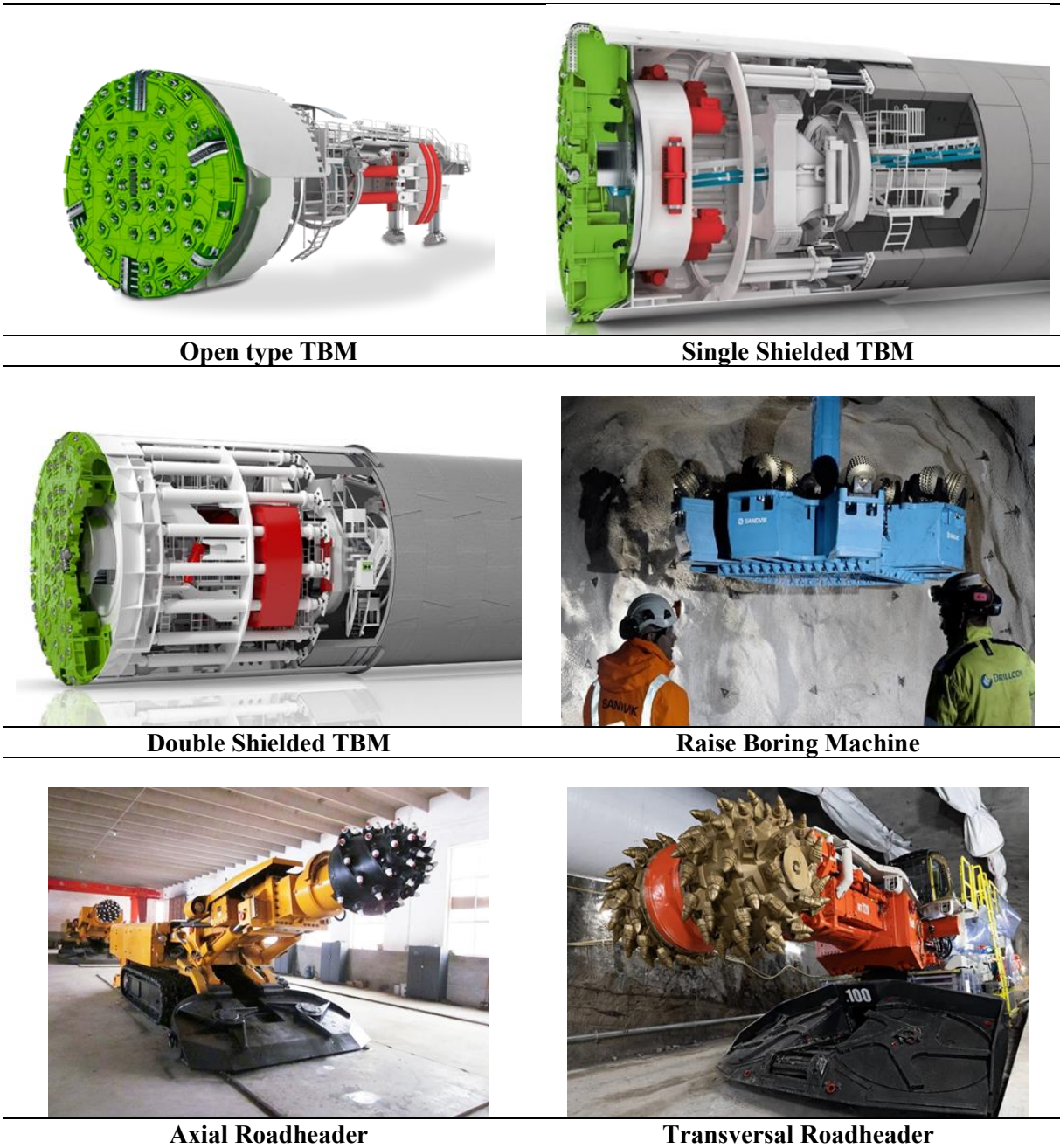
Raise Boring Machine (RBM)

This machine was developed to meet the demands of the underground mining industry, but has also found numerous applications in tunneling or infrastructural projects for ventilation purposes (Bilgin et al., 2014; Shaterpour-Mamaghani, 2025).

Raise boring provides a safe means of excavating a shaft between two levels of a mine without the use of explosives. The breakthrough of using continuous tunneling machines in the 1950s has provided a completely new method of mechanized shaft boring, which thereby eliminated the need for drilling and blasting in some cases (Ozdemir, 1998).

Roadheader (RH)

Roadheaders are partial-face machines excavating only a portion of the face at once and a certain number of cutters are in contact with the face. The basic advantages of roadheader over the other underground excavation machines are their mobility, flexibility, and selective mining ability (Ozdemir 1997). These advantages, in addition to general advantages of mechanical excavation, provide them for being used widely and having a very unique position in underground mining, opening and tunneling operations, although they are also used in surface operations. Roadheaders are flexible machines; they can be adapted to any opening/profile shapes (Copur et al 1997; Copur, 1999; Thuro and Plinninger, 1999).



Open type TBM

Single Shielded TBM

Double Shielded TBM

Raise Boring Machine

Axial Roadheader

Transversal Roadheader

Figure 1. Machine types used for different type of rock and condition from mining to civil construction (<https://www.herrenknecht.com/de>; <https://www.mining.sandvik/en/products/equipment>)

GEOTECHNICAL ENGINEERING REPORT

Reporting and writing of geotechnical site investigation reports are still controversial issue in tunneling and underground opening projects. Budget of geotechnical site investigation and reporting is more or less %8-10 of the total project budget. Owner, designer, contractor, architecture and geotechnical engineers should not take responsibility for problems developing during the construction; however, reporting all the information related to geotechnical condition of the site is under the responsibility of geotechnical engineers. Due to that, the report should cover every aspects of the project related to ground condition including the risk management.

All the ground condition should be quantified as much as can be. Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction edited by Essex (2007) are the guidelines most used for underground and tunneling activities.

For typical mechanized excavation projects, geotechnical engineers prepare different level of geotechnical data and description reports after carrying out geotechnical site investigation work. The reports, especially in the United States, are generally called geotechnical data report, geotechnical baseline report, geotechnical interpretive report, and geotechnical design summary report. The four reports summarize the geological conditions and geotechnical design parameters for soil and rock, as well as provide geotechnical recommendations of which all of them are prepared in different stages of site investigations as mentioned previously (USNCTT, 1984).

CONCLUSIONS

In this extended abstract, machine selection criteria for rock excavation and construction in rock mass condition are briefly published based on the keynote given in the congress. In order to select the proper machine for rock excavation in different type of rocks, geotechnical site investigation should be completed properly. This investigation includes field work, laboratory and also construction process from the pre-construction to post. After that, suitable machine should be hired or manufactured based on geotechnical baseline reports. Machine should be hired based on geotechnical investigation reports; however, it is the not only geotechnical parameters. Besides that, machine and rock interaction should be examined in detail. Since, type of machine and its specifications, such as; size of boom or TBM cutterhead; number of cutters on those head; thrust and torque requirement for rock cutting; machine power are also crucial as much as geotechnical data and inputs parameters in the project scheduling. So, the performance prediction models of excavators related to rate of production and cutter consumption and replacement of cutting tools should have rock parameters and machine specifications as inputs to obtain the accurate output. Concluding remark is that engineers, designers and contractors have to consider about both purposed machine specifications and encountered rock mass condition in the field to achieve the acceptable scheduling to complete the project.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was partially supported by the Faculty Development Competitive Research Grant (G.N: 201223FD8837) of Nazarbayev University in Kazakhstan, Acknowledgement is also extended the Chamber of Mining Engineering of Izmir Branch of Turkiye due to their invitation and support.

REFERENCES

- Shaterpour-Mamaghani, A. (2025). Raise boring machines: A comprehensive review of performance prediction and operational challenges. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 156: 106246
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. (2014). *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*. CRC Press. 355p. Taylor & Francis Group, Fl USA
- Bruland, A. (2000). *Hard Rock Tunnel Boring: Vol 1-10*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway, 2000.
- Cigla, M., Yagiz, S., and Ozdemir, L. (2001). *Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine Development*. 17th International Mining Congress & Exhibition of Turkey, IMCET 2001, pp. 155-164, Ankara, Turkey
- Copur, H., Rostami, J., Ozdemir, L., Bilgin, N., 1997. *Studies on performance prediction of roadheaders*. Proceedings of the 4th International Symposium on Mine Mechanization and Automation, Brisbane, Queensland, Australia, pp. A4-1–A4-7.
- Copur, H., 1999. *Theoretical and experimental studies of rock cutting with drag bits toward the development of a performance prediction model for roadheaders*. PhD thesis, 361p, CSM, USA

- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B., Grøv, E. (2012). Classification of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. *Tunnelling and Underground Space Technology* 28 (2012) 150-158.
- Macias, J.F., Dahl, F., Bruland A., Kasling, H., Kurosch, T. (2017). Drillability Assessments in Hard Rock. 3rd Nordic Rock Mechanics Symposium. October 11-12 2017 Helsinki, Finland. 105-115
- Nilsen, B., Ozdemir, L. (1999a). Recent developments in site investigation and testing for hard rock TBM projects, In *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*, eds. Hilton, D.E., Samuelson, K. O., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. San Francisco, California, pp. 715–731.
- Nilsen, B., Ozdemir, L. (1999b). Recommended laboratory rock testing for TBM projects. *American Underground Association (AUA) News*, 14(2): 21–35.
- Ozdemir, L. (1997). Mechanical Mining Short Course. Section: “Roadheaders” by L. Ozdemir, March 19–21, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- Ozdemir, L. (1998). Mechanical Tunneling, Raise Boring and Shaft Drilling. Short Course. February 21–22, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- Rostami, J. (1997). Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modelling and physical measurement of crushed zone pressure, PhD Thesis. Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA
- Thuro, K., Plinninger, R.J. (1999). Roadheader excavation performance—Geological and geotechnical influences. *Proceedings of the 9th ISRM Congress, Paris, August 25–28, 1999*, pp. 1241–1244.
- Essex, R.J. (2007). *Geotechnical Baseline Reports for Construction Suggested Guidelines*, ed. Essex, R.J., ASCE, American Society of Civil Engineers, Virginia, pp. 1–62.
- U.S. National Committee on Tunneling Technology (USNCTT). (1984). *Geotechnical Site Investigations for Underground Projects*. Washington, DC, National Academy Press, Vol. 1, 182 p.
- Yagiz, S. (2002). Development of Rock Fracture and Brittleness Indices to Quantifying the Effects of Rock Mass Features and Toughness in the CSM Model Basic Penetration for Hard Rock Tunneling Machines. PhD. Thesis, 289 pages, T- 5605, Department of Mining & Earth Systems Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Co., USA
- Yagiz, S. (2008). Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 23(3): 326-339.
- Yagiz, S., Rostami, J., Ozdemir, L. (2008). Recommended rock testing methods for predicting TBM performance: focus on the CSM and NTNU Models. In: 5th Asian Rock Mechanics Symposium. Majdi A, Ghazvinian A. (Eds), 1520-1530. Tehran, Iran. Nov., 24-26, 2008.
- Yagiz, S. (2009). Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24 (2009), pp 66-74.
- Yagiz, S, Rostami, J., Ozdemir, L. (2012). Colorado School of Mines approach for predicting TBM performance. In: *Eurock’12-Rock Engineering and Technology for Sustainable Underground Construction*. Stille H. et al. (Eds) 9p. Stockholm, Sweden. May 28-30, 2012
- Yagiz, S., Yermukhanbetov, K., Yazitova, A. (2021). Utilizing Linear Cutting Machine Test for estimating Cutting Force via Intact Rock Properties. ARMA-21-A-1108. 2021 ARMA, American Rock Mechanics Association USA
- Yagiz, S., Yazitova, A., Smirnov, G., Thyagarajan, M.T., Hassanpour, J. (2024a) Appraisal of boreability characteristics of rocks to estimate the TBM advancement. In: 58th USA Rock Mechanics and Geomechanics Symposium. PN: ARMA-2024-0982. Golden Colorado USA. June 23-26, 2024
- Yagiz, S, Hassanpour J, Rostami J. (2024b) Introducing the concept of fracture index for performance prediction of hard rock TBMs. In: *Eurock2024: New Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1513-1519pp. Alicante, Spain. July 15-19, 2024
- Yagiz, S. (2023). Mechanized rock excavation and tunnelling from TBM usage perspectives. Invited Speech at National Technical University of Athens. Greece, 10 of November 2025

**AKADEMİDEN SAHAYA DİJİTAL MADENCİLİK: KÜRESEL REKABET İÇİN MÜFREDAT
YENİLİKLERİ VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ**
*FROM ACADEMIA TO THE FIELD: CURRICULUM INNOVATIONS AND PRACTICAL APPLICATIONS
IN DIGITAL MINING FOR GLOBAL COMPETITIVES*

G.G.U. Aksoy ^{1,2}

¹ *Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

² *GOA Ar-Ge Madencilik ve Çevre Teknolojileri Ltd. Şti. Yön. Krl. Bşk. Yrd. Ankara, Türkiye
(gulsevaks@hacettepe.edu.tr)*

ÖZ

Madencilik sektörü, dijitalleşme, otomasyon, yapay zeka ve veri analitiği gibi teknolojilerle hızlı bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Ancak Türkiye’deki maden mühendisliği eğitim programlarında bu teknolojilerin kapsamlı biçimde yer alması henüz sınırlıdır. Bu durum, mezunların küresel ölçekte rekabet edebilir dijital yetkinliklere sahip olmasını güçleştirmektedir. Bu bildiride, madencilikte dijital uygulamaların (otomasyon sistemleri, sensör teknolojileri, otonom ekipman yönetimi, veri analitiği, yapay zeka tabanlı karar destek sistemleri vb.) maden mühendisliği müfredatına entegrasyonu için öneriler sunulmaktadır. Ayrıca, bu entegrasyonun sektörle uyumlu biçimde gerçekleşebilmesi için akademi–sanayi iş birliğine dayalı saha uygulama modelleri tartışılacaktır. Dünya genelindeki başarılı eğitim programlarından örnekler, sektörün dijital dönüşümünde kritik rol oynayan uygulamalar ve Türkiye’de uygulanabilecek uyarlama stratejileri paylaşılacaktır. Amaç, geleceğin maden mühendislerinin hem sürdürülebilir madencilik hem de ileri dijital teknolojiler konusunda yetkin, inovatif ve küresel rekabete hazır bireyler olarak yetişmelerini sağlamaktır.

Anahtar Sözcükler: Dijital Madencilik, maden mühendisliği eğitimi, müfredat yenilikleri, madencilikte otomasyon ve yapay zeka, akademi–sanayi iş birliği

ABSTRACT

The mining industry is undergoing a rapid transformation driven by digitalization, automation, artificial intelligence, and data analytics. However, in Turkey, mining engineering curricula have yet to comprehensively integrate these technologies, limiting graduates’ ability to acquire globally competitive digital competencies. This paper presents proposals for integrating digital mining applications—such as automation systems, sensor technologies, autonomous equipment management, data analytics, and AI-based decision support systems—into mining engineering curricula. It also discusses field application models based on academia–industry collaboration to ensure that this integration aligns with sectoral needs. Examples from successful international educational programs, key applications in the digital transformation of the mining sector, and adaptation strategies suitable for Turkey will be shared. The objective is to prepare future mining engineers as competent, innovative, and globally competitive professionals equipped with expertise in both sustainable mining and advanced digital technologies.

Keywords: Digital mining, mining engineering education, curriculum innovation, automation and artificial intelligence in mining, academia–industry collaboration

GİRİŞ

Madencilik sektörü, son yıllarda dijitalleşme, otomasyon, yapay zekâ ve veri analitiği gibi ileri teknolojilerin etkisiyle köklü bir dönüşüm sürecine girmiştir. Bu dönüşüm, yalnızca üretim süreçlerini değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve ekonomik rekabetçilik boyutlarını da kapsamaktadır. Dolayısıyla, dijital madencilik uygulamaları günümüzde küresel madencilik endüstrisinin ayrılmaz bir bileşeni hâline gelmiştir.

Bununla birlikte, Türkiye’de maden mühendisliği eğitim programlarının mevcut yapısı bu teknolojileri henüz kapsamlı bir şekilde yansıtmamaktadır. Geleneksel müfredatlar, ağırlıklı olarak üretim ve güvenlik temelli içeriklere odaklanmakta, veri temelli karar sistemleri, otonom ekipman yönetimi, sensör teknolojileri ve yapay zekâ destekli çözümler gibi çağdaş uygulamaları yeterince içermemektedir. Bu durum, mezunların küresel ölçekte rekabet edebilir dijital yetkinlikler kazanmasını zorlaştırmakta ve sektördeki hızlı dönüşümle üniversite eğitimleri arasında bir boşluk oluşturmaktadır.

Küresel düzeyde birçok üniversite, dijital ikiz, IoT tabanlı sistemler, büyük veri analitiği ve sürdürülebilirlik derslerini müfredatlarına dâhil ederek öğrencilerini çağın gerekliliklerine uygun biçimde yetiştirmektedir. Colorado School of Mines, University of Arizona ve University of Adelaide gibi öncü kurumlarda bu kapsamda dersler açılmış, saha simülasyonları ve proje tabanlı uygulamalarla öğrencilerin dijital okuryazarlıkları artırılmıştır.

Dijitalleşme ve sürdürülebilirlik, günümüzde maden mühendisliği eğitiminde öne çıkan iki temel dönüşüm eksenine hâline gelmiştir. Klasik müfredatlar, ağırlıklı olarak cevher üretimi, işleme ve güvenlik odaklıdır; ancak bu yaklaşım veriyle desteklenen karar sistemleri, yapay zekâ tabanlı öngörüler ve sensör/IoT uygulamalarını kapsamakta yetersiz kalmaktadır.

Son yıllarda yapılan araştırmalarda özellikle şu noktalar öne çıkmaktadır:

Gerçek zamanlı karar destek sistemleri ve dijital ikizler, verimliliği ve sürdürülebilirliği artırmaktadır (Nobahar, 2024; Cranford, 2023).

IoT tabanlı güvenlik uygulamaları önemlidir. Madencilikte güvenliği artırmada IoT sistemlerinin rolü vurgulanmaktadır (Zvarivadza, 2024).

Mühendislik eğitiminde dijital ikizler, öğrencilerin sanal modellerle etkileşim içinde öğrenmesini sağlayarak öğrenme etkinliğini artırmaktadır (Zhang et al., 2024).

Müfredat dönüşümleri son yıllarda öne çıkmaktadır. Colorado School of Mines, University of Arizona ve Adelaide örneklerinde dijital teknolojiler, otomasyon, veri analitiği ve sürdürülebilirlik yeni dersler olarak eklenmiştir (Mitra, 2018).

Girişimcilik ve proje tabanlı eğitime önem verilmeye başlanmaktadır. RWTH Aachen’de “Learning Factory Mining 4.0” örneğiyle, mühendislik eğitiminde girişimcilik ve yenilikçilik entegrasyonu sağlanmıştır (Sörensen, 2022).

Bu örnekler, Türkiye’deki madencilik eğitiminin hâlen sınırlı düzeyde işlenen dijitalleşme konularını, müfredata daha sistematik biçimde dahil etmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışma, dijital madencilik uygulamalarının Türkiye’deki maden mühendisliği müfredatına entegrasyonu için öneriler geliştirmeyi ve uluslararası iyi uygulama örneklerini inceleyerek uyarlama stratejileri ortaya koymayı amaçlamaktadır. Ayrıca, akademi–sanayi iş birliği çerçevesinde geliştirilebilecek

ve geliştirilen saha uygulama modelleri de tartışılacaktır. Nihai hedef, geleceğin maden mühendislerini yalnızca teknik bilgiye değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik, dijital okuryazarlık ve inovatif problem çözme becerilerine sahip bireyler olarak yetiştirmektir.

MADEN MÜHENDİSLİĞİ EĞİTİMİNDE YENİLİKÇİ MÜFREDAT ÖNERİLERİ

Maden mühendisliği eğitiminde çağın gerekliliklerine uyum sağlamak amacıyla yenilikçi ders programı hem uluslararası eğilimlerle hem de Türkiye'nin sektörel ihtiyaçlarıyla uyumlu bir dönüşüm modeli sunmalıdır. Madencilik eğitiminin geleceği, yalnızca cevher çıkarma ve işleme süreçlerine odaklanan klasik yaklaşımlardan ziyade, dijitalleşme, sürdürülebilirlik ve disiplinler arası etkileşimlere dayalı yeni bir paradigmaya ihtiyaç duymaktadır. Geleneksel ders yapıları, veri analitiği, yapay zekâ, otomasyon, sensör tabanlı sistemler, çevresel risk analizi ve toplumsal etki değerlendirmesi gibi çağdaş mühendislik becerilerini kapsamakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, yenilikçi bir müfredatın temel bileşenleri tartışılmalıdır. Böyle bir programın temel özelliği, klasik mühendislik dersleri korunurken dijitalleşme, sürdürülebilirlik ve disiplinler arası etkileşimlerin müfredata sistematik biçimde entegre edilebilirliği olmalıdır. Aşağıdaki temel başlıklar altında yenilikçi müfredat önerileri verilmiştir:

Klasik Derslerin Yeniden Yapılandırılması

Mevcut programda yer alan kaya mekaniği, maden planlaması, cevher hazırlama ve iş güvenliği gibi dersler, temel mühendislik formasyonunun korunması açısından önemlidir. Ancak bu dersler, güncellenmiş içerikleriyle çağdaş mühendislik uygulamalarına uyumlu hale getirilmektedir. Örneğin:

Kaya mekaniği ve maden planlaması derslerinde sensör tabanlı izleme sistemleri ve yapay zekâ ile desteklenen veri analitiği uygulamaları; cevher hazırlama derslerinde enerji verimliliği, karbon ayak izi değerlendirmeleri ve proses simülasyonları; İş sağlığı ve güvenliği derslerinde dijital risk simülasyonları ve erken uyarı sistemleri işlenmektedir.

Bu değişim, öğrencilerin yalnızca teorik bilgi edinmesini değil, aynı zamanda veri tabanlı karar verme becerilerini geliştirmesini amaçlamaktadır.

Yeni Derslerin Müfredata Eklenmesi

Programda dijitalleşme ve sürdürülebilirliği merkez alan yeni dersler açılması önerilmektedir. Bu dersler, dijital ikiz teknolojilerinin maden işletmelerinde kullanımı, gerçek zamanlı veri analizi, öngörücü bakım ve optimizasyon süreçlerini içermelidir. Sürdürülebilir Madencilik ve Döngüsel Ekonomi konusu, atık yönetimi, çevresel etkilerin azaltılması, karbon emisyonlarının kontrolü ve kaynak verimliliğini içerecek şekilde derslere entegre edilmelidir.

Veri Bilimi ve Yapay Zekâ ile Karar Destek Sistemleri derslere dahil edilmelidir. Python programlama, veri görselleştirme, makine öğrenmesi ve yapay zekâ tabanlı öngörü modellerinin madencilik uygulamalarına entegrasyonu oldukça önemlidir.

Bu dersler, öğrencilere çağdaş mühendislik pratiklerinde kullanılan teknolojilere doğrudan erişim sağlamayacaktır.

Disiplinler arası Yaklaşım ve Uygulamalı Öğrenme

Yenilikçi müfredat, öğrencilerin farklı disiplinlerle etkileşim içinde çalışmasını hedeflemektedir. Maden mühendisliği öğrencileri, çevre mühendisliği, bilgisayar mühendisliği ve ekonomi gibi alanlarla ortak projeler yürüterek çok boyutlu mühendislik problemlerine çözüm üretme yetkinliği kazanmaktadır. Ayrıca:

Capstone projeleri, doğrudan sektör iş birliği ile tasarlanmakta ve dijital teknolojilerin entegrasyonu teşvik edilmektedir.

Sanal simülasyon laboratuvarları ve dijital ikiz tabanlı saha uygulamaları, öğrencilerin risk almadan gerçekçi deneyimler edinmesini sağlamaktadır.

Toplumsal etki projeleri, madencilğin sosyal lisans, yerel halkla iletişim ve maden sonrası arazi kullanımı boyutlarına odaklanmaktadır.

Uluslararası Akreditasyon ile Uyum

Üniversitelerimizde geliştirilecek bu yenilikçi müfredat, ABET ve MÜDEK akreditasyon kriterleriyle uyumlu bir yapıda olmalıdır. Dijitalleşme, otomasyon ve sürdürülebilirlik doğrudan kriterlerde yer alması da tasarım, problem çözme, etik ve disiplinler arası iş birliği gibi öğrenci çıktıları bu alanların eğitim sürecine entegrasyonunu teşvik etmektedir. Böylece, mezunların hem ulusal hem de uluslararası düzeyde rekabet gücüne sahip olması hedeflenmektedir.

Uygulama ve Proje Odaklı Eğitim

Öğrenciler, dijital araçlarla aktif üreticiler hâline gelmelidir. Dijital ikiz tabanlı saha simülasyonları, sanal staj programları ve sektörle iş birliğine dayalı projeler, öğrencilerin karar verme becerilerini geliştirecektir. Üniversite–sanayi iş birlikleri, öğrencilerin endüstride kullanılan yazılım ve sistemlerle doğrudan tanışmasını sağlayacaktır.

UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Patlatma Tasarımlarının Dijitalleşmesi: SeisBlast–Promax ve Yeni Yazılım Uygulamaları

Patlatma tasarımı, madencilik mühendisliğinin en kritik alanlarından biridir. Geleneksel yöntemler çoğunlukla deneyime dayalı parametrelerle sınırlı kalırken, günümüzde sayısal modelleme ve yazılım tabanlı çözümler giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bu dönüşüm, hem güvenliği artırmakta hem de ekonomik ve çevresel açıdan daha verimli sonuçlar doğurmaktadır.

SeisBlast–Promax yazılımı, bu çözümlere bir örnek olup Tübitak Teydep 1507 (Proje No:7210032, 2021-2023) projesi desteği ile geliştirilmiş yerli patlatma tasarım yazılımıdır. Bu yazılım ile yapılan saha uygulamaları, patlatma gecikmelerinin optimize edilmesi yoluyla sismik dalga genliklerinin önemli ölçüde azaltılabileceğini ortaya koymuştur. Bu yazılım, pilot delik verilerinden elde edilen sismik sinyalleri analiz ederek gecikme sürelerini enerji sönmüleme (damping) prensibine göre optimize etmektedir. Sonuçta, klasik yöntemlerle yapılan patlatmalara kıyasla %60'a varan titreşim azalması sağlanmıştır. Bu bulgular, dijital patlatma tasarımının saha güvenliği ve sürdürülebilir madencilik açısından taşıdığı önemi net bir biçimde göstermektedir.

Bununla birlikte, SeisBlast-ProMax yazılımı gibi yazılımlarla klasik ve serbest patlatma tasarımlarına ek olarak, ÇED raporlaması, maliyet analizi, parçalanma analizi, taş savrulması tahmini, gürültü (hava şoku) değerlendirmesi ve titreşim modellemesi gibi bütünsel modüller geliştirilebilir. SeisBlast ProMax Yazılımı, ayrıca sismik kalite faktörü (Q) üzerinden çevresel titreşim etkilerini öngörmekte, sahada şev duraylılığına dair kritik girdiler sunmaktadır. Ayrıca konum bazlı veri kaydı ve otomatik raporlama modülleriyle, mühendislik uygulamalarında şeffaflık ve izlenebilirlik sağlamaktadır.

Bu yazılımların ortak özelliği, patlatma mühendisliğini deneyim odaklı bir uygulamadan veri tabanlı, öngörücü ve dijital bir sürece dönüştürmesidir. Patlatma parametrelerinin yalnızca sahada değil, yazılım

ortamında test edilmesi sayesinde maliyetler düşmekte, çevresel etkiler azaltılmakta ve saha güvenliği güçlenmektedir.

Geliştirilen sistemlerin bir sonraki adımı, yeraltı madenleri için uyarlanan yazılım versiyonlarıdır. Yeraltı ocaklarında titreşim ve hava şoku etkilerinin kontrolü, sınırlı havalandırma koşulları ve jeoteknik kısıtlamalar nedeniyle daha karmaşık bir problem oluşturmaktadır. Bu nedenle, SeisBlast–Promax ve benzeri yazılımların yeraltı senaryolarına adapte edilmesi, yalnızca güvenlik değil aynı zamanda üretim verimliliği açısından da stratejik öneme sahiptir. Bu bağlamda, geliştirilen yeraltı versiyonu; galeri stabilitesi, havalandırma etkileri, çevre duyarlılığı ve çalışan güvenliği gibi unsurları içerecek şekilde tasarlanmaktadır.

Dolayısıyla, açık işletme patlatmaları için geliştirilen dijital yazılımlar, yeraltı madenciliğine de uyarlanarak maden mühendisliği eğitiminde dijitalleşmenin kapsamını genişletmekte ve öğrencilere modern madenciliğin karşılaştığı çok boyutlu sorunlara yazılım tabanlı çözüm üretme yetkinliği kazandırmaktadır.

Azot Tüpü Projesi: Yeraltı Kömür Madenlerinde Yangınla Mücadelede İnovatif Yaklaşım

Yeraltı kömür madenlerinde yangın, özellikle göçertmeli üretim yöntemlerinde en kritik güvenlik sorunlarından biridir. Geleneksel eğitim müfredatında yangınla mücadele genellikle baraj yapımı, yangın izolasyonu, inert gaz kullanımı gibi klasik yöntemler üzerinden aktarılmaktadır. Ancak TÜBİTAK destekli geliştirilen Azot Tüpü Projesi (Proje No: 3220754, 2023–2024), bu alanda dijitalleşme ve otomasyonun entegre edildiği yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

Proje kapsamında geliştirilen sistem; 40 litrelik basınçlı azot tüpleri, basınç düşürücü regülatörler, ATEX sertifikalı selenoid valfler ve elektronik kontrol devreleri ile donatılmıştır. Böylece, yangınla mücadele yalnızca manuel müdahaleye dayalı olmaktan çıkarılarak uzaktan kontrol edilebilir, otomatik ve hızlı tepki veren bir sürece dönüştürülmüştür. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile farklı debilerdeki azot enjeksiyonlarının yangın söndürme performansı test edilmiş, en uygun debi senaryoları belirlenmiştir.

Bu özellikleriyle Azot Tüpü Projesi, maden mühendisliği eğitiminde klasik yangınla mücadele derslerinin ötesine geçen bir öğrenme fırsatı sunmaktadır. Öğrenciler, yangın kontrolünü yalnızca pasif önlemler ve iş güvenliği prosedürleri bağlamında değil, aynı zamanda otomasyon, mekatronik sistemler ve dijital izleme teknolojileriyle entegre bir mühendislik problemi olarak değerlendirebilmektedir.

Dolayısıyla bu proje, madencilikte yangın güvenliği eğitimini çağın gerekliliklerine uygun şekilde yeniden tanımlamakta ve geleceğin mühendislerine dijitalleşmiş güvenlik çözümleri geliştirme vizyonu kazandırmaktadır.

Akıllı Hava Kapısı: Havalandırmada Dijitalleşme, Talep Odaklı Kontrol ve HAD Analizleri

Yeraltı madenlerinde havalandırma, iş sağlığı ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel mühendislik eğitiminde havalandırma sistemleri ve klasik hava kapıları, sabit bir hava yönlendirme aracı olarak öğretilmektedir. Bu kapılar, genellikle manuel veya mekanik işlevleriyle hava akımını kontrol eden basit elemanlardır.

Oysa ki yeni teknoloji ile geliştirilen Akıllı Hava Kapısı Projesi, bu klasik yaklaşımı aşarak dijitalleşme ve otomasyon tabanlı yeni bir model sunmaktadır. Projede tasarlanan kapılar; IoT tabanlı sensörler, basınç ve gaz ölçüm cihazları, otomatik kontrol mekanizmaları ve uzaktan izleme sistemleriyle donatılmıştır. Bu sayede, havalandırma yalnızca sabit bir düzende değil, talebe göre yönlendirilmiş, dinamik ve esnek bir yapıda çalışabilmektedir.

Bu sistemin en önemli özelliklerinden biri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD/CFD) analizleri ile desteklenmesidir. Havanın farklı galerilerdeki debisi, basınç kayıpları, türbülans etkileri ve gaz dağılımları CFD modelleriyle hesaplanarak en uygun yönlendirme stratejileri belirlenmektedir. Böylece, akıllı hava kapılarının açılıp kapanma senaryoları sadece sensörlerden gelen anlık verilere değil, aynı zamanda önceden simüle edilmiş akış modellerine dayandırılmaktadır.

Bu yaklaşım, enerji tasarrufu sağlamakta, kritik durumlarda hızlı müdahale imkânı tanımakta ve işçi sağlığı için optimum hava dağılımını garanti altına almaktadır. Eğitim açısından bakıldığında ise Akıllı Hava Kapısı Projesi, öğrencilere geleneksel havalandırma bilgisinin ötesinde, otomasyon sistemleri, IoT teknolojileri ve CFD tabanlı mühendislik analizleri ile zenginleştirilmiş bir öğrenme deneyimi sunmaktadır.

Dolayısıyla bu proje, modern maden mühendisliği müfredatında havalandırma derslerinin dijitalleşme ve ileri modelleme yöntemleriyle güncellenmesi gerektiğine dair önemli bir örnek oluşturmaktadır.

Maden İşletmelerinde Saha Güvenliği ve Kaza Risklerinin Mikrosismik Yöntemlerle İzlenmesi, Analizi ve Erken Uyarımı İçin Yerli Yazılım Geliştirilmesi

TÜBİTAK destekli 3230484 numaralı “Maden İşletmelerinde Saha Güvenliği ve Kaza Risklerinin Mikrosismik Yöntemlerle İzlenmesi, Analizi ve Erken Uyarımı İçin Yerli Yazılım Geliştirilmesi” projesinin kalbinde, sahadan gerçek zamanlı veriye dayanan, trafik ışığı mantığında erken uyarı modülü (yeşil-sarı-kırmızı) ve buna veri sağlayan mikrosismik izleme ağı bulunmaktadır. Bu modül, gerilimli alanlarda eşik değerler aşırsa farklı uyarılar üretip işletmeyi anlık bilgilendirmektedir. İzleme süreci; veri toplama (sahaya özgü sensör ağı), veri-işlem (P/S varış zamanlarıyla lokasyon ve büyüklük hesabı, odak mekanizması), ve veri yorumu (operasyonun uyarılara göre yönlendirilmesi) adımlarından oluşmaktadır. Proje, madenlerde potansiyel tehlike alanlarının kazalar olmadan önce belirlenmesi ve yerli erken uyarı algoritması ile ikaz sistemine dönüştürülmesini hedeflemektedir (Proje No:3230484 Tübitak Teydep 1501, 2023-2025).

Projenin uygulaması Çanakkale/Lapseki sahasında yapılmaktadır. Lapseki’de kurulumunu yaptığımız sistem, projedeki mimariyle aynı ilkeleri izlemektedir: sahaya özgü yerleştirilmiş mikrosismik sensörler 7/24 veri toplamakta; veriler anlık işlenerek olay konumu, büyüklüğü ve kümelenme eğilimleri hesaplanmaktadır; trafik ışığı arayüzü eşik aşımalarında uyarı vermektedir. Bu sayede;

- Şev hareketliliği/göçük/ kayma/kopma riskine işaret eden gerilim birikimleri önceden görülmektedir,
- Vardiya planı, üretim planlaması ve çalışma düzeni proaktif şekilde güncellenebilmektedir,
- Riskli bölgelere hemen müdahale edilip faaliyet geçici durdurma/tedbir alma kararları hızlı verilmektedir.

Bu yaklaşım, projedeki veri-işlem ve odak mekanizması analizlerinin (“gerilme yönelimi/gerilme birikimi” çıkarımı) maden güvenliğine doğrudan çevrilmiş halidir.

Sistemin geleneksel yöntemlere göre üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

Geleneksel yaklaşımlarda, periyodik saha kontrolleri, gecikmeli raporlar, sınırlı sensör verisi → olay “olduktan sonra” değerlendirme görülmektedir.

Mikrosismik erken uyarı sistemi ile Sürekli ve objektif izleme sağlanır. Sahaya özgü sensör ağı ile 7/24 ölçüm; veri-işlem hattı lokasyon/büyüklük/odak çözümü üretir. Eşik tabanlı trafik ışığı ikazları, tehlike artışını “kırmızıya dönmeden” yakalar. Hızlı karar desteği sağlanır. Anlık değerlendirmelerle faaliyetlerin yönlendirilmesi; iş durdurma/tedbir alma kararlarında gecikme azalır.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, madencilik sektöründe dijitalleşmenin yükselen rolünü ve bu dönüşümün maden mühendisliği eğitimine entegrasyonunun gerekliliğini ortaya koymaktadır. Dijitalleşme, yalnızca otomasyon ve yapay zekâ tabanlı sistemlerin kullanımını değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik, enerji verimliliği, iş güvenliği ve toplumsal etki boyutlarını da kapsamaktadır.

Literatürde görüldüğü üzere, dijital ikiz teknolojileri (Nobahar, 2024; Cranford, 2023), IIoT tabanlı güvenlik çözümleri (Zvarivadza, 2024), veri bilimi tabanlı karar destek sistemleri (Zhang et al., 2024) ve Industry 4.0 odaklı müfredat yenilikleri (Mitra, 2018) uluslararası alanda yaygınlaşmış ve eğitim müfredatlarının önemli bir parçası hâline gelmiştir.

Türkiye’deki maden mühendisliği programları incelendiğinde, klasik derslerin hâlen ağırlıklı olarak üretim, cevher hazırlama ve güvenlik temelli bir içerikle işlendiği görülmektedir. Bu durum, dijital madencilik uygulamalarının hızla geliştiği küresel ölçekte mezunların rekabet gücünü sınırlamaktadır. Dolayısıyla, dijitalleşme odaklı müfredat yenilikleri Türkiye için stratejik bir ihtiyaçtır.

Bu bağlamda, çalışmada ele alınan uygulama örnekleri önemli bir referans noktası sunmaktadır. Patlatma tasarım yazılımları, SeisBlast–Promax yazılımı gibi, açık ocak patlatmalarında sürdürülebilir ve güvenli patlatmaların yapılmasına olanak sağlamakta, dijitalleşmenin saha güvenliği ve çevresel etkilerin azaltılması için nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. Yazılımın geliştirilmekte olan yeraltı versiyonu ise, sınırlı havalandırma ve jeoteknik kısıtlamalar altında güvenliği artırmak açısından stratejik bir yenilik olacaktır. Benzer şekilde, Azot Tüpü Projesi klasik yangınla mücadele derslerinin ötesinde, otomasyon ve kontrol sistemleriyle entegre edilmiş dijital çözümleri eğitime taşımaktadır. Akıllı Hava Kapısı Projesi ise, talebe göre yönlendirilmiş havalandırmayı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD/CFD) analizleriyle modelleyerek, klasik havalandırma yaklaşımının ötesinde modern bir vizyon sunmaktadır.

Bu üç proje, saha uygulamalarının eğitimle bütünleştirilmesi için güçlü örnekler oluşturmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, dijitalleşmenin eğitim müfredatına entegrasyonu üç düzlemde önem taşımaktadır:

- **Eğitimsel Boyut:** Öğrenciler, klasik mühendislik bilgileriyle birlikte yapay zekâ, veri analitiği ve otomasyon tabanlı karar destek sistemlerini öğrenmeli; proje tabanlı derslerle dijitalleşmiş saha uygulamalarını deneyimlemelidir.
- **Sektörel Boyut:** Akademi–sanayi iş birliği kapsamında geliştirilen saha projeleri, öğrencilerin mezuniyet öncesinde gerçek uygulamalarla tanışmasını sağlayarak iş gücü piyasasına hazır bireyler yetişmesine katkı sunmaktadır.
- **Toplumsal ve Sürdürülebilirlik Boyutu:** Dijitalleşme, yalnızca verimlilik artışı değil, aynı zamanda çevresel risklerin azaltılması, işçi sağlığının korunması ve toplumsal beklentilerin karşılanmasına da hizmet etmektedir.

Sonuç olarak, dijital madencilik uygulamalarının müfredata entegrasyonu ve saha projeleriyle desteklenmesi, Türkiye’nin madencilik mühendisliği eğitimini küresel standartlara taşıyacak en önemli adımlardan biridir.

Bu dönüşüm hem uluslararası rekabet gücünü artıracak hem de sürdürülebilir madencilik hedeflerine doğrudan katkı sağlayacaktır.

Geleceğin madencilik mühendisleri; yalnızca teknik bilgiye değil, aynı zamanda dijital okuryazarlık, inovasyon ve toplumsal sorumluluk bilincine sahip bireyler olarak yetiştirildiğinde, sektörün karşılaştığı çok boyutlu problemlere etkin çözümler üretebilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın uygulama örneklerinde bahsedilen Ar-Ge ürünleri, TÜBİTAK'ın değerli desteğiyle yürütülen projeler kapsamında geliştirilmiştir.

- TÜBİTAK TEYDEB 1501 Projesi No: 3220754 (2023–2025) – *Maden İşletmelerinde Saha Güvenliği ve Kaza Risklerinin Mikrosismik Yöntemlerle İzlenmesi, Analizi ve Erken Uyarımı İçin Yerli Yazılım Geliştirilmesi*
- TÜBİTAK TEYDEB 1501 Projesi No: 3220754 (2023–2024) – *Yeraltı Madenlerinde Yangınla Mücadelede Azot Tüpü Kullanımı (GOA Ar-Ge Madencilik)*
- TÜBİTAK TEYDEB 1507 Projesi No: 7210032 (2021–2023) – *Patlatma Kaynaklı Titreşimleri Sismik Sinyalleri Sönümlendirme Metoduyla En Aza İndiren Tasarımların Yapılmasını Sağlayan Yazılımın Geliştirilmesi (GOA Ar-Ge Madencilik)*

Bu projelere sağladığı mali destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Cranford, R. (2023). Digital Twins and ESG: Opportunities for Sustainability Reporting. *Frontiers in Industrial Engineering*.
- Mitra, R. (2018). Curriculum Reform in Mining Engineering Education: Integrating Industry 4.0. *International Journal of Georesources and Environment*.
- Nobahar, P. (2024). A Fully Integrated Digital Twin for Mining Operations. *Sustainable Mining Technologies*, Elsevier.
- Sörensen, A. (2022). Integrating Entrepreneurship into Mining Engineering Curricula: The RWTH Aachen Learning Factory Mining 4.0 Case. *Mining, Metallurgy & Exploration*, Springer.
- Zhang, J., et al. (2024). Development of a Digital Twin Learning System for Engineering Education. *Applied Sciences*, MDPI.
- Zvarivadza, T. (2024). Enhancing Mine Safety with Industrial Internet of Things (IIoT). *Journal of Sustainable Mining*, Taylor & Francis.
- Aksoy G. G. U. (2023-2025). TÜBİTAK TEYDEB 1501 Projesi No: 3220754 (2023-2025). *Maden İşletmelerinde Saha Güvenliği ve Kaza Risklerinin Mikrosismik Yöntemlerle İzlenmesi, Analizi ve Erken Uyarımı İçin Yerli Yazılım Geliştirilmesi*
- Aksoy G. G. U. (2023-2024). TÜBİTAK TEYDEB 1501 Projesi No: 3220754 (2023-2024). *Yeraltı Madenlerinde Yangınla Mücadelede Azot Tüpü Kullanımı. GOA Ar-Ge Madencilik*.
- Aksoy G. G. U. (2021-2023). TÜBİTAK TEYDEB 1507 Projesi No: 7210032 (2021-2023). *Patlatma Kaynaklı Titreşimleri Sismik Sinyalleri Sönümlendirme Metoduyla En Aza İndiren Tasarımların Yapılmasını Sağlayan Yazılımın Geliştirilmesi. GOA Ar-Ge Madencilik*.
- Yeraltı Madenlerinde Akıllı Hava Kapısı ve Otomasyonu Geliştirilmesiyle Havanın Talebe Göre Yönlendirilmesi Projesi (2025). GOA Ar-Ge Madencilik.

ELEKTRONİK ATIKLARIN GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRME TEKNOLOJİLERİ: UYGULAMA ALANLARI VE YÖNTEMLER
ORE PREPARATION AND BENEFICIATION TECHNOLOGIES IN E-WASTE RECYCLING: APPLICATION AREAS AND METHODS

F. Burat

*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
 34469
 (buratf@itu.edu.tr)*

ÖZ

Elektronik atıkların içerdiği değerli metallerin geri kazanımı hem ekonomik hem de çevresel açıdan stratejik öneme sahiptir. Özellikle baskı devre kartları (BDK) ve lityum-iyon bataryalar (LiB), yüksek metal içerikleri sayesinde ikincil hammadde kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu atıkların karmaşık bileşimleri ve içerdiği tehlikeli bileşenler, geri dönüşüm süreçlerinde cevher hazırlama ve zenginleştirme tekniklerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, LiB ve BDK'lerden metal kazanımı amacıyla uygulanan mekanik ayırma, flotasyon ve santrifüj gibi fiziksel ön zenginleştirme yöntemleri değerlendirilmiştir. Plastik, metal ve seramik gibi farklı fazlar; özgül ağırlık ve yüzey enerjisi farklarına bağlı olarak etkin biçimde ayrılabilir. Söz konusu işlemler, hidro ve pirometalurjik işlemler öncesinde uygulanarak çözündürme verimini artırmakta, asit tüketimini azaltmakta ve toksik gaz emisyonlarını en aza indirmektedir. Bu sayede, ağır metallerin çevresel etkileri azaltılırken, ülke ekonomisine katkı sağlayacak sade, ekonomik ve uygulanabilir bir geri dönüşüm modeli geliştirilebilir.

Anahtar Sözcükler: Elektronik atık geri dönüşümü, baskı devre kartları, lityum-iyon piller, cevher hazırlama, zenginleştirme

ABSTRACT

The recovery of valuable metals from electronic waste is of strategic importance in terms of both economic value and environmental sustainability. In particular, printed circuit boards (PCBs) and lithium-ion batteries (LIBs) stand out as secondary raw material sources due to their high metal content. The complex composition and hazardous nature of these wastes necessitate the application of ore preparation and mineral beneficiation techniques during the recycling process. This study evaluates physical pre-concentration methods, such as mechanical separation, flotation, and centrifugation, for the recovery of metals from LIBs and PCBs. Phases such as plastics, metals, and ceramics can be effectively separated based on differences in specific gravity and surface energy. These processes, applied prior to hydro- and pyrometallurgical operations, increase leaching efficiency, reduce acid consumption, and minimize toxic gas emissions. In this way, while the environmental impact of heavy metals is reduced, a simple, economical, and practical recycling model that contributes to the national economy can be developed.

Keywords: E-waste recycling, printed circuit boards, lithium-ion batteries, ore preparation, mineral processing

GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler ve dünya nüfusundaki artışa paralel olarak, elektrikli ve elektronik ekipmanların (EEE) kullanımı hızla artmakta ve bu durum, büyük miktarda atığın oluşmasına neden olmaktadır. Günümüzde

fosil yakıtların yoğun tüketimi ve çevresel etkilerinin azaltılması gerekliliği, tüketicileri rüzgar türbinleri, yüksek kapasiteli bataryalar, yakıt hücreleri ve güneş pilleri gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji çözümlerine yönlendirmektedir (Kaya, 2022). EEE atıklarının yönetiminde karşılaşılan temel sorun yalnızca miktarlarının artması değildir. EEE'ler, farklı işlevlere sahip mekanik ve entegre sistemlerden oluşmakta olup; plastik (polivinil klorür (PVC), polietilen (PE), poliesterler (PET, PBT vb.)), cam, ahşap, metal (demir, alüminyum, bakır, altın, paladyum, gümüş, platin vb.) ile kurşun, cıva ve bromlu alev geciktiriciler (BFR) gibi zararlı maddeleri de içermektedir. Bu çeşitlilik, elektronik atıkların yapısını son derece karmaşık hale getirmekte ve geri kazanım işlemlerini teknik olarak zorlaştırmaktadır. EEE'lerin geri dönüşümü, hem atık yönetimi hem de yapılarında bulunan ekonomik ve stratejik öneme sahip metallerin geri kazanımı açısından büyük önem arz etmektedir.

Genel olarak, ikincil kaynaklardan metal geri kazanımı, doğal cevherlerden metal üretimine kıyasla önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlamaktadır (Bkz. Çizelge 1). Bazı metaller için bu tasarruf oranı %60 ila %95 arasında değişmektedir. Bu bağlamda, elektronik atıklardan metal geri kazanımı hem doğal kaynakların korunmasına katkı sağlamakta hem de daha düşük enerji tüketimiyle ekonomik bir alternatif sunmaktadır. Buna rağmen, elektronik atıkların heterojen ve kompleks yapısı, bazı fraksiyonların ekonomik olarak geri kazanımını güçleştirmektedir (Robert vd., 1998).

Çizelge 1. Birincil kaynaklarla karşılaştırıldığında geri kazanımla elde edilen metallerin/malzemelerin enerji tasarruf oranları (Bertram vd., 2002)

Madde	Miktar, %
Plastik	>80
Alüminyum	95
Bakır	85
Kurşun	65
Demir ve çelik	74
Kağıt	64

Elektronik cihazlar, belirli bir kullanıcı için ömrünü tamamlamış görünse de başka kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılayabilecek durumda olabilmektedir. Son kullanıcıdan toplanan elektronik atıklar, herhangi bir müdahale gerektirmeden ya da basit onarımlarla çalışır durumdaysa, farklı bireyler tarafından yeniden kullanılabilir. Bu durumda EEE atıklar yeniden kullanım yoluyla değerlendirilmektedir. Malzeme geri kazanımı süreci, elektronik atık (EA) geri dönüşümünün en kritik aşamasıdır. EA'lar, yüksek oranlarda değerli ve baz metaller içermeleri nedeniyle önemli bir ikincil kaynak olarak değerlendirilmektedir. Bu atıklardan metal geri kazanımı, ekonomik ve çevresel açılardan çok sayıda avantaj sunmaktadır. Geri kazanım çalışmaları en çok altın ve bakır gibi yüksek ekonomik değere sahip metaller üzerinde yoğunlaşmaktadır. EA'larda bulunan metallerin geri kazanımı amacıyla mekanik/fiziksel ayırma yöntemleri ile pirometalurjik ve hidrometalurjik prosesler yaygın olarak kullanılmaktadır. Mekanik ve fiziksel ayırma yöntemleri; eleme, yoğunluk farkına dayalı ayırma, manyetik ayırma ve elektrik iletkenliğine dayalı ayırıcılar aracılığıyla gerçekleştirilir.

Pirometalurjik işlemler, elektronik atıklarda bulunan demir dışı metallerin geri kazanımında kullanılmakta olup, özellikle platin grubu metallerin (örneğin paladyum ve platin) konsantre biçimde elde edilmesini hedeflemektedir. Hidrometalurjik işlemler ise, katı malzemelerin asidik çözeltilerle liç edilmesini ve ardından çözelti içerisindeki metallerin saflaştırılarak geri kazanılmasını kapsar. Bu süreçte; solvent ekstraksiyonu, adsorpsiyon ve iyon değişimi gibi yöntemlerle metal konsantrasyonu artırılır. Ardından elektrolitik arıtım, kimyasal indirgeme veya kristalizasyon gibi işlemlerle metaller çöktelir ya da geri kazanılır.

Bu alandaki araştırmalar hem fiziksel hem de metalurjik (piro- ve hidrometalurjik) yöntemlerin avantaj ve sınırlılıklarını ortaya koymaktadır. Özellikle hidrometalurjik yöntemler, değerli metallerin kazanımı açısından çeşitli üstünlüklere sahiptir. Ayrıca, fiziksel zenginleştirme teknikleriyle gerçekleştirilen ön ayırma süreçleri, metal kayıplarını %10–35 aralığına indirerek proses verimliliğini artırmaktadır (Goosey ve Kellner, 2002).

ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMANLARIN (AEEE) GENEL ÖZELLİKLERİ

EA'lar bakır, alüminyum ve çelik gibi metallerin yanı sıra plastik ve seramik gibi farklı malzemelerin karışımından oluşan, kullanım ömrünü tamamlamış, işlevini yitirmiş veya fiziksel olarak zarar görmüş ekipmanları kapsamaktadır. EEE grubu; küçük ev aletlerinden BDK'ları ve bataryalara kadar geniş bir yelpazede ürün içermektedir. Teknolojinin hızlı gelişimi ve ürün yaşam döngüsünün kısalması, EEE'lerin ömrünü önemli ölçüde azaltmakta; dayanıklı tüketim malları ortalama 15 yıl, bilgisayarlar 2–5 yıl, cep telefonları ise yalnızca 1,5 yıl içinde elektronik atığa dönüşmektedir. Ancak bu atıklardan değerli metallerin uygun yöntemlerle geri kazanılması hem ekonomik katkı sağlamakta hem de çevresel zararı azaltmaktadır. Ağır metaller ve toksik bileşenler içeren elektronik atıkların geri dönüşümü, yalnızca ekonomik fayda değil, aynı zamanda çevresel koruma ve sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından da önem taşımaktadır.

Ortalama bir bilgisayarın yapısı yaklaşık olarak %23 plastik, %32 demir içeren metaller, %18 demir dışı metaller (örneğin kurşun, kadmiyum, antimon, berilyum, krom, cıva), %12 elektronik kart (altın, paladyum, gümüş, platin) ve %15 cam içermektedir. Ancak, bilgisayar bileşenlerinin yalnızca yaklaşık %50'si geri dönüştürülebilir durumdadır; kalan kısım atık olarak kalmaktadır. Özellikle plastik parçalar, genellikle bromlu alev geciktiriciler içerdiğinden geri dönüşümleri zordur. Bilgisayarlarda yer alan BDK'lar; transistör, kondansatör, ısı alıcı, entegre devre/yonga, direnç, işlemci ve anahtar gibi birçok elektronik bileşeni içermekte olup, bu donanımların geri dönüşüm öncesinde sökülmesi yasal zorunluluktur.

Elektronik cihazların temel bileşenlerinden biri olan BDK'lar, tüm EA'ların yaklaşık %3'ünü oluşturmakta ve metal, seramik, plastik ve kompozit malzemelerden meydana gelen oldukça kompleks bir yapıya sahiptir. BDK'ların içerdiği altın, gümüş, paladyum ve platin gibi değerli metaller, doğal kaynaklara kıyasla 10 ila 100 kat daha yüksek konsantrasyonda bulunmakta ve bu durum geri dönüşüm açısından cazip hale getirmektedir. Ayrıca %20–30 aralığında Cu içeriği ile yarı soy metaller de önemli miktarlarda bulunmaktadır. Bu oranlara doğal kaynaklardan ulaşmak için yüksek enerji tüketimli kırma, öğütme ve zenginleştirme işlemleri gerekmektedir. Literatürde, bir ton devre kartında yaklaşık 200–1500 gram altın ve 160–210 kg bakır bulunduğu bildirilmektedir (Broughton vd., 1996; Keller vd., 2006; Goosey ve Kellner, 2002; Veldhuizen ve Sippel, 1994).

2000'li yılların başında yalnızca taşınabilir cihazlarda kullanılan lityum-iyon bataryalar (LiB), günümüzde elektrikli araçlar gibi yüksek enerji yoğunluğu gerektiren alanlarda da yaygın şekilde kullanılmakta ve üretim hacmi gigawatt düzeylerine ulaşmaktadır. LiB'lerin geri dönüşümü, bir yandan pil üretiminde kullanılan kobalt, lityum ve nikel gibi hammaddelerin Avrupa ve dünyada “stratejik malzeme” olarak kabul edilmesi, diğer yandan atık miktarının hızla artması nedeniyle kritik öneme sahiptir. Son on yılda atık LiB miktarı dört katına çıkmıştır (Wang vd., 2018; Yu vd., 2018). Tipik bir LCO tipi LiB hücresi; %7 Cu, %12 Al, %13 plastik, %41 katot malzemesi, %3 Ni, %16 grafit ve %7 elektrolit içermektedir. Özellikle katot kısmındaki aktif metal oksit bileşenler (örneğin $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$), ağırlıkça %5–20 Co, %5–12 Ni, %7–10 Mn ve %2–5 Li içermekte olup, bu oranlar cevherlerde bulunan miktarlardan çok daha yüksektir (Zhang vd., 2013).

İkincil kaynaklardan metal geri kazanımı, doğal cevherlerden metal eldesine kıyasla %60–95 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu da elektronik atıklardan elde edilen metallerin geri kazanımını hem sürdürülebilirlik hem de enerji verimliliği açısından öncelikli hale getirmektedir. Buna karşın, elektronik atıkların heterojen ve kompleks yapıları, bazı fraksiyonların ekonomik olarak geri kazanımını zorlaştırmaktadır (Bertram vd., 2002). Elektronik atıklar ile doğal cevherler karşılaştırıldığında; özellikle metal içerikleri, fiziksel

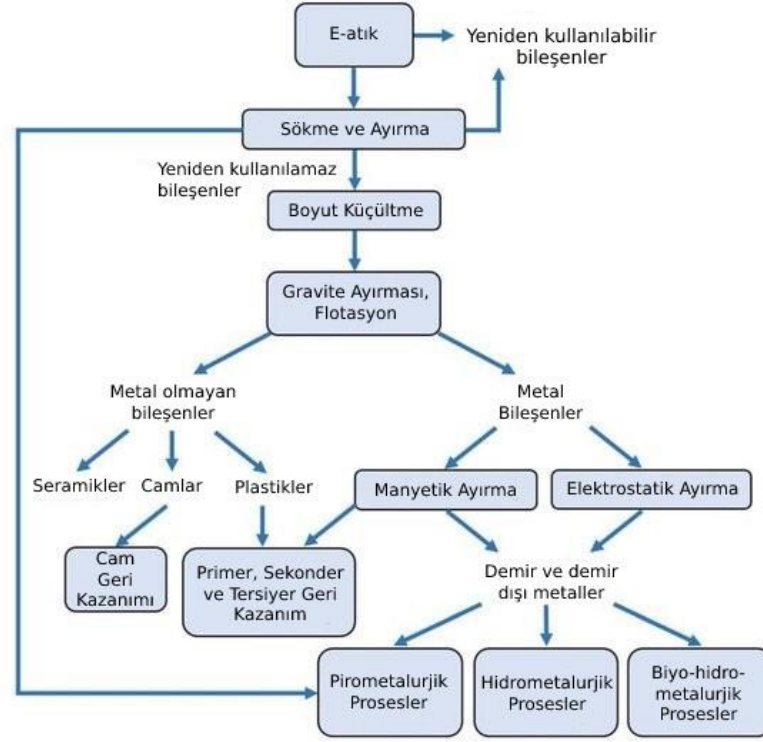
yapıları ve işlem zorlukları açısından belirgin farklılıklar göstermektedir. Çizelge 2’de bu iki grubun özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Geri kazanım süreçlerinin geliştirilmesinde, bu karakteristik özelliklerin doğru şekilde tanımlanması ve dikkate alınması büyük önem arz etmektedir.

Çizelge 2. Cevher ve elektronik atıkların bazı özelliklerinin karşılaştırılması (Hagelüken, 2006)

Özellik	Cevher	Elektronik Atık
İçerdiği malzeme türü	Oksitli veya sülfürlü mineraller	Metal ve/veya alaşımlar
Boyut küçültme	Kırılgan/gevrek malzeme Kırılması daha kolay	Esnek malzeme
Metal İçeriği	Düşük Bakır cevheri (%0,5-1) Altın cevheri (1-10 ppm)	Yüksek Bilgisayar devre kartı (%20 Cu; 250 ppm Au)
Homojenlik	Homojen	Heterojen
Serbestleşme tane boyu	İnce	İri (atık türüne göre değişken)
Tane şekli	Tekdüze	Çubuk, plaka, küresel vb. değişken şekiller
Çözünme oranı	Asidik/bazik ortam	Oksitleyici koşullar altında

GERİ DÖNÜŞÜMDE CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRME TEKNOLOJİLERİ

EA’ların geri kazanımı, yüksek oranda heterojen bileşimleri nedeniyle oldukça karmaşık bir süreçtir. Yapılarında metal, plastik, cam ve seramik gibi farklı malzemeleri bulunduran bu atıkların geri dönüşümünde ilk aşama, genellikle belirli bileşenlerin, örneğin kasalar, harici kablolar, katot ışın tüpleri, BDK’lar ve bataryalar, elle söküm (demontaj) yoluyla ayrılmasıdır. Elle yapılan bu ön işlem sonrasında, elektronik atıkların işlenmesinde mekanik, kimyasal ve termal süreçler devreye girmektedir. Metal geri kazanımı amacıyla üç temel zenginleştirme yaklaşımı kullanılmaktadır: Fiziksel zenginleştirme yöntemleri, Fiziko-kimyasal ayırma işlemleri ve Kimyasal zenginleştirme yöntemleri (özellikle pirometalurjik ve hidrometalurjik prosesler). Ayrıca, biyoteknolojik uygulamalar ile çeşitli tekniklerin kombinasyonuna dayalı hibrit yöntemler üzerine yapılan çalışmalar da literatürde yer almaktadır (Veit ve Bernardes, 2015). Elektronik atıklarda uygulanan başlıca geri kazanım yöntemlerine genel bir bakış Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. EA geri kazanım yöntemleri (Van Yken vd., 2021).

Ayıklama İşlemleri

EEE atıklarının geri kazanımında ayıklama, etkin zenginleştirme süreçlerinin uygulanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir ve genellikle ilk adımdır. Ayıklama işlemleri; elle ayıklama, otomatik ayıklama ve yarı otomatik ısı destekli sistemler olmak üzere üç farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. Elle ayıklamada insan gücü kullanılmakta, otomatik sistemlerde ise görüntü işleme ve tanıma teknolojileri devreye girmektedir. Bu sistemlerde önceden tanımlanan parçalar yüksek doğrulukla ayrılabilir. Ancak ürün çeşitliliği, şekil farklılıkları ve eksik parça durumu bu yöntemin sınırlılıkları arasında yer almaktadır.

Boyut Küçültme İşlemleri

Zenginleştirme işlemlerinin etkin şekilde uygulanabilmesi için, malzemenin tane serbestleşme boyutuna ulaşması gerekmektedir. Bu nedenle, ayırma aşamasını takiben boyut küçültme (kırma ve öğütme) işlemleri uygulanır. Malzemelerin fiziksel özellikleri ve tane boyutuna göre, uygun kırıcı ve öğütücü ekipmanların seçimi önemlidir. Elektronik bileşenler, doğal cevhalere kıyasla daha zayıf bağ yapısına sahip oldukları için serbestleşmeleri daha kolay gerçekleşmektedir. Eleme ve sınıflandırma gibi mekanik ayırma işlemleri; benzer boyuttaki malzemelerin ayrılması, metal içeriğinin artırılması ve sonraki işlemlere uygun fraksiyonların elde edilmesi amacıyla kullanılır. Bu işlemler, farklı tane boyutu ve şekil dağılımına sahip ekipmanlarla gerçekleştirilir. LiB'lerin karmaşık bileşimi, çözündürme işlemleri öncesinde metalik kolektör folyoları ve batarya gövdesinden değerli aktif tozların ayrıştırılmasını gerektiren bir serbestleşme süreci gerektirir. Ancak tane boyutunun aşırı küçülmesi, metal ve metal olmayan fazlar arasındaki ayırma verimini düşürebileceğinden, alt boyutlara inilmesi sınırlı tutulmalıdır.

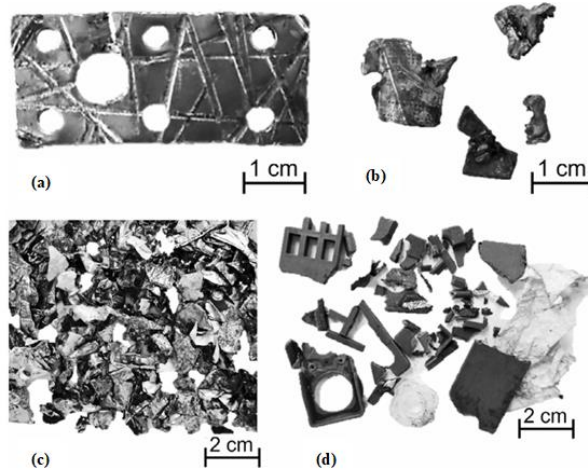
BDK'ların ilk kırma aşamasında, düşük hızlı ve yüksek torklu "kesici" tip kırıcılar (-10 mm) temel kırma için idealdir (Iji ve Yokoyama, 1997). Bunun yanı sıra; döner kırıcılar, disk kırıcılar ve kesici sistemler de

serbestleşmeyi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. İkincil kırıcı olarak yaygın kullanılan çekiçli kırıcılar; darbe, çatlatma, sıkıştırma ve aşındırma mekanizmalarının kombinasyonu ile malzeme parçalama işlemini gerçekleştirir. BDK’larda hem kırılğan hem elastik fazların birlikte bulunması nedeniyle bu kombinasyon, uygun kırma ortamı sağlar. Genellikle kapalı devre sistemlerde çalışan bu ekipmanlarla, parçacık boyutu 500 mikron altına indirilebilmektedir (Schubert ve Bernotat, 2004). İleri aşamada, bilyalı değirmenler ve diskli değirmenler yardımıyla BDK’lar toz hâline getirilebilir (Ghosh vd., 2015). Ancak kırma ve öğütme işlemleri sırasında, değerli metallerin ve toksik bileşenlerin %40’a varan oranda toz hâlinde kaybedebileceği bildirilmiştir (Jiang vd., 2012).

Şekil 2’de, LiB’lerin kırma devresi sonrası elde edilen bileşenler gösterilmektedir. Kırma işlemini takiben, gerekli hâllerde öğütme işlemi ile malzeme toz boyutuna kadar indirilebilir. Batarya geri dönüşümünde, fraksiyonlara ayırma amacıyla elek sistemleri kullanılır; elek altı fraksiyonlarda yüksek oranda lityum, kobalt ve grafit içeren ince pil tozları, elek üstü fraksiyonlarda ise plastik, demir, bakır ve alüminyum gibi ikincil bileşenler toplanır. Daha ekonomik ve çevresel açıdan verimli bir geri kazanım süreci için, bu fraksiyonların hidrometalurjik işlemler öncesinde ayrıştırılması büyük önem taşımaktadır.

Fiziksel Yöntemler

EA’ların özgül ağırlık, elektriksel iletkenlik ve manyetik duyarlılık gibi farklı fiziksel özellikler göstermesi, metal ve metal olmayan bileşenlerin etkin şekilde ayrılmasına olanak tanımaktadır. Fiziksel zenginleştirme yöntemleri temel olarak üç başlık altında sınıflandırılmaktadır: özgül ağırlık farkına dayalı ayırma (gravite zenginleştirme), manyetik ayırma ve elektrostatik ayırma. Bu yöntemler, nihai ürün eldesi için uygulanacak kimyasal zenginleştirme işlemlerinin daha verimli ve seçici gerçekleşmesini sağlamaktadır. Metal olmayan fraksiyonlarda yer alan plastikler, düşük yoğunluk, elektriksel iletkenliğe sahip olmama ve manyetik olmayan yapıları ile metallere kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. LiB bileşenleri serbestleştirildikten sonra, uygun fiziksel yöntemler kullanılarak değerli metaller farklı konsantrasyon hâlinde elde edilebilir.



Şekil 2. Kırma devresinden sonra elde edilen malzemelerin boyut grupları (a) çelik, (b) bakır, (c) alüminyum, (d) plastik (Zheng vd., 2018).

Her mineralin kendine özgü bir özgül ağırlığı vardır ve bu fark, hava, su gibi akışkan ortamlar içerisinde yapılan ayırma işlemlerine temel oluşturur. Bu tür zenginleştirme işlemleri 'özgül ağırlık farkına dayalı zenginleştirme' veya 'gravite zenginleştirme' olarak adlandırılmaktadır. EA’lar farklı yoğunluklara sahip birçok malzeme içerdiğinden, gravite yöntemi genellikle tercih edilen ayırma tekniklerinden biridir. EA’larda yer alan bazı temel bileşenlerin yoğunlukları Çizelge 3’te sunulmaktadır. Gravite ayırmada ortam olarak genellikle su tercih edilmektedir. Ayırma etkinliğini artırmak ve tanelerin özgül ağırlık farkına göre hareket

etmelerini sağlamak amacıyla, beslenen malzemenin tane boyutlarının mümkün olduğunca homojen olması gereklidir. Bunun yanı sıra, tane şekli ve akışkan ortamın viskozitesi gibi faktörler de ayırma performansını doğrudan etkilemektedir. Gravite zenginleştirme işlemleri, akışkan ortamın hareket yönüne göre üç ana gruba ayrılır: ağır ortamda zenginleştirme, düşey hareketli ortamda zenginleştirme ve tabaka hâlinde akan ortamda zenginleştirme. Bu yöntemlerde kullanılan başlıca ekipmanlar jigler, sarsıntılı masalar ve spiral ayırıcı sistemlerdir. LiB geri kazanımında gravite ayırma, özellikle bakır ve alüminyum gibi yüksek yoğunluklu metallerin, daha düşük yoğunluklu plastikler veya aktif elektrot malzemeleri gibi fraksiyonlardan ayrılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Cizelge 3. EA içinde yer alan bileşenlerin yoğunlukları (Tanısalı vd., 2019).

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)
Cu	8,93	PE (polietilen)	0,93
Cu-Zn Alaşımı	8,4	PP (Polipropilen)	0,91
Al	2,7	PS (polistyran)	1,05
Ag	10,49	Epoxy	1,7
Zn	6,92	PVC (polivinil klorür)	1,3
Au	19,32	PTPE (teflon)	2,2
Pirinç	8,40	Nylon	1,15
Ni	8,90	Al ₂ O ₃	3,95
Sn	7,29	SiO ₂	2,65
Pb	11,34	Demir Alaşımları	7,7

BDK ve LiB'ların geri kazanımında fiziksel zenginleştirme süreçlerinde santrifüj ayırıcılar, özellikle ince taneli malzemelerin ayrılmasında yüksek etkinlikleri nedeniyle önemli bir yer tutmaktadır. Santrifüjlü gravite ayırıcılar olarak sınıflandırılan Multi Gravity Separator (MGS), Falcon ve Knelson konsantratörleri, yüksek özgül ağırlıklı metallerin daha düşük özgül ağırlıklı bileşenlerden ayrılmasını sağlayarak, ön zenginleştirme aşamasında önemli avantajlar sunmaktadır (Dinç vd., 2022). Bu cihazlar, yerçekimi kuvvetinin çok üzerinde santrifüj kuvvetleri (50–300 G) oluşturarak, özellikle BDK'larda bulunan Cu, Sn, Au gibi değerli metaller ile LiB'lerdeki grafit, Al ve Cu gibi bileşenlerin ayrımında yüksek verimlilik sağlamaktadır. Falcon ve Knelson ayırıcıları genellikle daha kaba fraksiyonlar için tercih edilirken, MGS düşük yoğunluk farkına sahip ince taneli fraksiyonların ayrılmasında daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, santrifüj ayırıcılar, karmaşık yapıları elektronik atıklarda fiziksel olarak zenginleştirilmiş yüksek tenörlü ara ürünlerin elde edilmesi açısından çevresel ve ekonomik olarak sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Manyetik ayırma yöntemi, demir, nikel ve kobalt gibi ferromanyetik metallerin, manyetik özelliğe sahip olmayan minerallerden ayrılması amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. EA'ların yüksek metal içeriğine sahip olması nedeniyle, bu yöntem fiziksel zenginleştirme süreçleri için son derece uygundur. LiB'lerin geri kazanımında manyetik ayırma, genellikle pillerin mekanik olarak parçalanması sonrasında elde edilen karışık tozlardan kobalt, nikel ve demir gibi manyetik metallerin ayrıştırılması amacıyla kullanılmaktadır (You vd., 2023; Ding vd., 2024). Bu işlem, bir yandan elde edilen metallerin saflığını artırırken, diğer yandan sonraki aşamalarda uygulanacak kimyasal ayırma işlemlerinin daha verimli ve seçici olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, sürecin toplam enerji ve kimyasal madde tüketimini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunduğu vurgulanmaktadır.

Elektrostatik ayırma yöntemi ise minerallerin elektriksel iletkenlik farklarından yararlanılarak gerçekleştirilen bir fiziksel ayırma tekniğidir. Kuru ortamda yürütülen bu yöntem, aynı zamanda 'yüksek gerilim zenginleştirme' tekniği olarak da bilinmektedir. Elektrostatik ayırma prensibi, minerallere yüksek

gerilim altında statik elektrik yükü kazandırılmasına dayanır. Bu elektrik yükü, tanelerin yüzey özelliklerine bağlı olarak farklı davranmasına neden olur ve iletkenlik farkına göre parçacıklar ayrılabilir. Elektrostatik ayırma sistemleri genellikle üç temel yöntem etrafında şekillenir: Eddy Current (Foucault akımı) ayırıcılar, Corona ayırıcılar ve Triboelektrik ayırıcılar. Bu teknikler, elektronik atıkların içeriğinde bulunan metal ve plastik gibi malzemelerin iletkenlik temelli ayrıştırılmasında etkin rol oynamaktadır.

Flotasyon

Flotasyon, minerallerin yüzey özelliklerindeki fizikokimyasal farklılıklara dayalı olarak gerçekleştirilen bir ayırma yöntemidir (Wang ve Liu, 2021; Zhao ve Zhang, 2025). Bu yöntemde, hidrofilik tanecikler sıvı fazda kalırken, hidrofobik özellik gösteren tanecikler hava kabarcıklarına tutunarak yüzeğe taşınmaktadır (Zhan vd., 2018). Böylece, farklı yüzey özelliklerine sahip tanecikler etkin bir biçimde birbirinden ayrılmaktadır. Bu işlemde kullanılan reaktifler, tanecik yüzeylerinin kimyasal özelliklerini değiştirerek yüzdürme veya bastırma etkisi sağlamaktadır. Toplayıcılar, köpürtücüler, bastırıcılar ve düzenleyiciler olarak sınıflandırılmaktadır.

EEE atıklarında plastik parçaların fazlalığı nedeniyle, flotasyon yöntemi; plastik ve metallerin ayrılmasında etkili bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Plastiklerin doğal hidrofobik özellikleri sayesinde, neredeyse hiç reaktif kullanmadan yüzdürme işlemi gerçekleştirilebilmektedir (Atak, 2017). Elektronik atıklarda bulunan şekil verilebilir ve dövülebilir metalik parçacıklar, öğütme işlemi sırasında çeşitli geometrilere sahip olabilir; özellikle düz şekilli parçalar, özgül ağırlıktan bağımsız olarak pulp içinde yukarı doğru hareket edebilir. (Dinç vd., 2022). Bu nedenle ayrılacak olan bileşenlerin zenginleştirme işlemi öncesinde boyut küçültme ekipmanları ile uygun tane boyutu ve şekline getirilmesi çok önemlidir.

Atık cep telefonu kaynaklı LiB'lerin geri dönüşümünde, değerli metal ve plastik bileşenlerin fiziksel olarak ayrılması amacıyla flotasyon temelli bir süreç geliştirilmiştir. Bu çalışmada, $-2+0,3$ mm boyut aralığındaki fraksiyonlarda önce plastik flotasyonu, ardından bakır flotasyonu uygulanmıştır. Plastik flotasyonu aşamasında 500 g/t MIBC köpürtücüsü kullanılmış ve toplayıcı eklenmeden %99 oranında plastik geri kazanımı sağlanmıştır. Ayrılan bu fraksiyonun metal içeriği oldukça düşüktür (%1,46 Cu, %2,01 Al). İkinci kademe flotasyonda ise 3000 g/t KAX ve 600 g/t Aerophine 3418A toplayıcı olarak kullanılmıştır. 200 g/t MIBC köpürtücüsü yardımıyla bakır tanecikleri yüzdürülmüştür. Bu sayede %53,51 Cu içeriğine sahip bir konsantre, %74,8 oranında geri kazanımla elde edilmiştir. Flotasyon işleminin başarısı, özellikle Cu yüzey özelliklerinin toplayıcı ilavesi ile flotasyona uygun hâle getirilmesi ile ilişkilendirilirken; Al tanecikleri toplayıcılardan etkilenmeyerek batan üründe kalmıştır (Mennik vd., 2023).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

EEE üretiminin küresel ölçekte hızla artması ve buna paralel olarak tüketim alışkanlıklarının değişmesi, ciddi boyutlara ulaşan bir elektronik atık sorununu ortaya çıkarmaktadır. Bu atıklar, içeriklerindeki tehlikeli maddeler nedeniyle çevre ve insan sağlığına risk oluştururken; aynı zamanda barındırdıkları değerli metaller sayesinde ikincil hammadde kaynağı olarak ekonomik potansiyel taşımaktadır. Özellikle BDK ve LiB'ler, kobalt, lityum, nikel, bakır ve nadir toprak elementleri gibi stratejik metaller açısından geri kazanımı öncelikli malzeme gruplarıdır.

Bu çalışmada, söz konusu atıkların geri kazanımında cevher hazırlama ve zenginleştirme teknolojilerinin uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Fiziksel ön zenginleştirme yöntemleri, BDK ve LiB atıklarının metal, plastik ve seramik gibi farklı fraksiyonlara etkin bir şekilde ayrılmasını sağlamaktadır. Flotasyon yöntemi, yüzey enerjisi farklarına dayalı olarak metal ve plastik ayırımında yüksek başarı göstererek çevre dostu ve düşük maliyetli bir alternatif oluşturmaktadır. Bu ön işlemler, sonraki hidrometalurjik ve pirometalurjik süreçlerin verimliliğini artırmakta; asit tüketimini azaltmakta, enerji maliyetlerini düşürmekte ve tehlikeli gaz emisyonlarını en aza indirmektedir.

Sonuç olarak, EA'ların değerlendirilmesinde cevher hazırlama ve zenginleştirme prensiplerine dayalı özgün proseslerin geliştirilmesi; çevresel etkilerin azaltılması, ekonomik kazanımların artırılması ve sürdürülebilir atık yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Bu süreçlerin ulusal ölçekte yaygınlaştırılması, atıkların ekonomik değere dönüştürülmesini sağlayacak ve dışa bağımlılığı azaltarak kaynak verimliliğine katkıda bulunacaktır.

Öneriler:

- Türkiye’de elektronik atıkların geri dönüşümü için pilot ve endüstriyel ölçekli tesisler kurulmalıdır.
- Cevher hazırlama ve zenginleştirme teknolojileri, geri dönüşüm sektörüne entegre edilmelidir.
- Üniversite-sanayi iş birliği ile Ar-Ge projeleri teşvik edilmelidir.
- Ulusal mevzuatta, elektronik atık yönetimine yönelik daha sıkı standartlar getirilerek kayıt dışı geri dönüşüm önlenmelidir.
- Lityum-iyon batarya geri dönüşümünde yerli teknoloji geliştirme çalışmaları önceliklendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Atak, S. (2017). *Flotasyon: Cevher Hazırlamada 100. Yıl*. İstanbul, Türkiye: İTÜ Vakfı Yayınları.
- Bertram, M., Graedel, T. E., Rechberger, H., and Spataro, S. (2002). The contemporary European copper cycle: Waste management subsystem. *Ecological Economics*, 42(1–2), 43–57.
- Broughton, A. C. (1996). Circuit board recycling increases. *Recycling Today*, 71, 1–3.
- Diñç, N. İ., Tosun, A. U., Baştürkçü, E., Özer, M. and Burat, F., (2022). Recovery of valuable metals from WPCB fines by centrifugal gravity separation and froth flotation. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24, 224–236. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01310-8>.
- Ding, W., Bao, S., Zhang, Y., Xin, C., Chen, B., Li, J., Liu, B., Xia, Y., Hou, X., and Xu, K. (2024). Sustainable regeneration of high-performance cathode materials from spent lithium-ion batteries through magnetic separation and coprecipitation. *Journal of Cleaner Production*, 438, 140798. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140798>.
- Ghosh, B., Ghosh, M., Parhi, P., Mukherjee, P. S., and Mishra, B. K. (2015). Waste printed circuit boards recycling: An extensive assessment of current status. *Journal of Cleaner Production*, 94, 5–19.
- Goosey, M. and Kellner, R. (2002). A scoping study: End-of-life printed circuit boards. Makati City: Intellect and the Department of Trade and Industry.
- Hagelüken, C. (2006). Improving metal returns and eco-efficiency in electronic recycling – A holistic approach to interface optimization between preprocessing and integrated metal smelting and refining. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment* (pp. 218–233). IEEE.
- Iji, M. and Yokoyama, S. (1997). Recycling of printed wiring boards with mounted electronic components. *Circuit World*, 23(3), 10–15.
- Jiang, P., Harney, M., Song, Y., Chen, B., Chen, Q., Chen, T. and Korzenski, M. B. (2012). Improving the end-of-life for electronic materials via sustainable recycling methods. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 485–412.
- Kaya, M. (2022). State-of-the-art lithium-ion battery recycling technologies. *Circular Economy*, 100015.
- Mennik, F., İlkyaz, N. İ. and Burat, F. (2023). Selective recovery of metals from spent mobile phone lithium-ion batteries through froth flotation followed by magnetic separation procedure. *Results in Engineering*, 17, 100868.
- Robert, K. H., Schmidt-Bleek, B., Lardere, J. A., Basile, G., Jansen, J. L. and Kuehr, R. (2002). Strategic sustainable development – Selection, design and synergies of applied tools. *Journal of Cleaner Production*, 10, 197–214.
- Schubert, G. and Bernotat, S. (2004). Comminution of non-brittle materials. *Journal of Mineral Processing*, 1, 19–30.

Tanısalı, E., Özer, M. and Burat, F. (2019). Baskı devre kartlarındaki değerli metallerin cevher zenginleştirme yöntemleri ile kazanımı. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 58(3), 113–124.

Van Yken, J., Boxall, N. J., Cheng, K. Y., Nikoloski, A. N., Moheimani, N. R. and Kaksonen, A. H. (2021). E-waste recycling and resource recovery: A review on technologies, barriers and enablers with a focus on Oceania. *Metals*, 11(8), 1313.

Veit, H. M., Bernardes, A. M. and Ferreira, J. Z. (2006). Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. *Journal of Hazardous Materials*, 137(3), 1704–1709.

Veldhuizen, H. and Sippel, B. (1994). Mining discarded electronics. *UNEP Industry and Environment*, 17(3–4), 7–11.

Wang, D. and Liu, Q. (2021). Hydrodynamics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation: A literature review. *Minerals Engineering*, 173, 107220. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107220>.

Wang, F., Zhang, T., He, Y., Zhao, Y., Wang, S., Zhang, G., Zhang, Y. and Feng, Y. (2018). Recovery of valuable materials from spent lithium-ion batteries by mechanical separation and thermal treatment. *Journal of Cleaner Production*, 185, 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.069>.

You, J., Qin, Z., Wang, G., Rao, M., Luo, J., Peng, Z., Zou, S. and Li, G. (2023). Recycling valuable metals from spent lithium-ion battery cathode materials based on microwave-assisted hydrogen reduction followed by grind-leaching and magnetic separation. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139488. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139488>.

Yu, J., He, Y., Ge, Z., Li, H., Xie, W. and Wang, S. (2018). A promising physical method for recovery of LiCoO₂ and graphite from spent lithium-ion batteries: Grinding flotation. *Separation and Purification Technology*, 190, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.08.049>.

Zhan, R., Oldenburg, Z. and Pan, L. (2018). Recovery of active cathode materials from lithium-ion batteries using froth flotation. *Sustainable Materials and Technologies*, 17, e00062. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00062>.

Zhang, T., He, Y., Ge, L., Fu, R., Zhang, X. and Huang, Y. (2013). Characteristics of wet and dry crushing methods in the recycling process of spent lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 240, 766–771. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.009>.

Zhao, L. and Zhang, Q. (2025). A significant review of froth stability in mineral flotation. *Chemical Engineering Science*, 302, 120738. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120738>.

Zheng, X., Zhu, Z., Lin, X., Zhang, Y., He, Y., Cao, H. and Sun, Z. (2018). A mini-review on metal recycling from spent lithium-ion batteries. *Engineering*, 4(3), 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.018>.

KÖMÜR HAZIRLAMA TESİS TASARIMINDA GENEL YAKLAŞIM ÖLÇÜTLERİNDEKİ SORUNLAR

PROBLEMS OBSERVED IN GENERAL APPROACHES TO COAL PREPARATION PLANT DESIGN

V. Arslan

Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü
(vedat.arslan@deu.edu.tr)

ÖZ

Türkiye’de oldukça küçük kapasiteliden 800 t/h kapasiteliye kadar birçok kömür hazırlama tesisi mevcuttur. Bu tesislerin çoğunluğu yeterli ön araştırmalar yapılmadan, gerekli veriler üretilmeden, benzer tesislerdeki boyutlara bakılarak kurulmuştur. En önemlisi de bazı tesislerdeki ekipmanların çoğu sanayi sitelerindeki uzman olmayan firmalar tarafından ya da kendi atölyesi olan şirketlerin atölyelerinde imal edilmiştir. Bu durum öngörülemeyen bazı sıkıntıları oluşturmaktadır. Ayrıca yeterli ön araştırma ve ürün hedeflerine bakılmaksızın bazı popülerleştirilmiş tesis tasarımları da başka sorunlar ortaya koymaktadır. Ancak tesislerin hemen tamamında kapsamlı performans analizleri yapılmadığından, oluşan maddi kayıplar görülemediği gibi, esasında bir milli kaynak israfı da söz konusu olmaktadır. Bu çalışmada, kömür hazırlama tesislerinde kullanılan ekipmanlar, ekipman seçimindeki hususlar ve limitler vb. konular üzerinde durulacaktır.

Anahtar Sözcükler: Kömür hazırlama, kömür kalitesi, tesis performansı

ABSTRACT

There are many coal preparation plants in Turkey, ranging from very small capacities to 800 t/h capacity. Most of these plants were established without sufficient preliminary research, without producing the necessary data, and by looking at the dimensions of similar plants. Most importantly, much of the equipment in some plants has been manufactured by non-specialized companies in industrial sites or in the ateliers of companies with their own ateliers. This situation creates some unforeseen problems. Furthermore, some popularized plant designs, adopted without sufficient preliminary research and consideration of product targets, also present other problems. However, since comprehensive performance analyses have not been conducted in almost all plants, the resulting material losses are not visible, and in fact, a waste of national resources is also at stake. This study will focus on the equipment used in coal preparation plants, the issues and limitations in equipment selection, and related topics.

Keywords: Coal preparation, coal quality, plant performance

GİRİŞ

Kömür yıkama tesis tasarımında yüksek verim ve kaliteli ürün eldesi için dikkat edilmesi gereken parametreler her kömür cinsi için farklı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu konuda yeterli özenin gösterilmediği kanaatine varılmıştır. Görülen sorunlar kısaca aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Tesis kurulumunda yetersiz araştırma
- Kapasite ve yöntem seçiminde hem üretim hem de Pazar koşullarının yeterince irdelenmemesi
- “Kömür - yıkama ekipmanı” uyumunda tüvenan kömürün farklı kaynaklardan ya da değişken karakterli maden sahasından üretimin olası etkilerinin hesap edilmemesi

- Ekipmanların bir kısmının yeterli bilgi donanımına sahip olmayan sanayi sitelerindeki atölyelerde bilimsel gerçeklerden uzak koşullarda üretilmesi. (Bu konuda kendini kanıtlamış yerli imalatçılar da olmasına rağmen)
- Yurt dışı ekipman teminlerinde kendi kömürü üzerine araştırma yaptırmak yerine, “**tesisın satıcısı firmanın ülkesindeki çalışan ekipmanların izlenmesi ile kararlar verilmesi.**”
- Ön araştırmaların yapılmaması/yetersiz bilgiye dayalı olması/bilgilerin yanlış yorumlanması nedeniyle verimsiz çalışan ekipmanlar ve yanlış ekipman boyutları/tipleri seçimleri
- Kurutucu (genelde direk kurutmalı döner kurutucu kullanılıyor) imalatları yetkin firmalarca yapılmayanların hepsi birbirine benzeyen ağırlıkla kopya modeller. En/boy oranları, kanat tipi ve yerleşimi, cehennemlik tasarımı ve kurutma havasının sisteme girişi, hava hız ve debisi vb. birçok faktör için hesaplamalar söz konusu değil.
- Kömür-tesis uyumsuzluğuna bağlı, manyetit sarfiyatı ve elektrik giderinin artması, yetersiz kapasite kullanımı, normalden fazla duruş ve bakım giderleri.
- Performans ölçümlerinin genelde yapılmaması nedeniyle yukarıda sayılan sorunların tespit edilememesi ve en önemlisi de oluşturduğu ekstra maliyetin görülememesi.

Tüvenan kömürler birçok nedenden dolayı üretildiği gibi kullanıma uygun değildir. Bu nedenle en basiti kırma-elemeden, tüm boyutları ile ve yüksek verimli yöntemlerle yıkama işlemlerine kadar birçok yöntem ve/veya yöntemler kombinasyonları uygulanmaktadır. Burada esas olan bazı parametreler uygulanacak yöntemlerin belirlenmesi açısından belirleyici olmaktadır.

Mineral maddenin kömür içindeki dağılım durumu, kömür yıkamanın can damarını oluşturmaktadır. Mineral maddenin kömürleşme sürecinde ortama katılım şekli yıkama açısından büyük önem arz etmektedir. Mineral maddenin kömüre katılım süreçleri Epigenetik ve Syngenetik olarak gruplanmaktadır. Bu süreçlerde ise mineral maddenin katılım/oluşum şekli önem kazanmaktadır. Bunların dışında kömür külünü oluşturan önemli bir kaynaktan üretim esnasında kömüre karışan yan kayaçlardır. Bunların yıkanabilirlik açısından bir zorluğu söz konusu değildir, ancak kapasitelerin ve çalışma düzeninin belirlenmesinde ve buna bağlı maliyet oluşumlarında önemi büyüktür.

Kömürleşme derecesi ve kömürün petrografik yapısına gelince;

- Kömürün nem oranı,
- Kömürün kırılabilirliği ve parça sağlamlığı,
- Kömürün su ile teması halinde bünyesine su alıp almaması, dolayısıyla suda şişme ve dağılma durumu,
- Kömürün, taşıma, depolama ve kömür hazırlama işlemleri esnasında, tane iriliğini muhafaza edip etmemesi,
- Kömürün yüzey özellikleri

gibi kömür hazırlama açısından çok önemli kömür özellikleri, kömürleşme derecesi ve kömürün petrografik yapısına bağlı olarak değişmektedir.

Bir kömür yığını, değişik mineral madde içeriğine sahip parçacıklardan oluşmaktadır. Kömür yığınının ortalama kül oranı, yığın içindeki az veya çok mineral madde içeren parçacıkların miktarlarına bağlı olarak değişmektedir. Düşük kül oranına sahip kömür elde edilebilmesi, kömür yığını içindeki fazla mineral madde içeren parçacıkların atılmasıyla mümkün olmaktadır.

Bu kısa açıklamadan da anlaşıldığı gibi, kömürün yıkanması denildiğinde, fazla mineral madde içeren fraksiyon ile, az mineral madde içeren fraksiyonun birbirinden ayrılması anlaşılmaktadır.

SÜREÇLERİN BELİRLENMESİ VE EKİPMAN SEÇİMLERİ

Tesisteki uygulanacak süreçlerin belirlenmesinde kömür özellikleri kadar kömürün kullanım ve pazarlama hedefleri de önemli bir rol oynar. Özellikle değişken Pazar talep koşullarının gerektirdiği esnekliği verim kaybı olmadan sağlayabilmek gerekmektedir.

Numune Alımı ve Testler

Tesis kurulumuna yönelik numunede geneli temsiliyet çok önemlidir. O nedenle önceden sondajlarla belirlenmiş yapısal farklılıklar tespit edilmişse, her formasyondan ayrı ayrı numuneler alınarak testleri ayrı yapılmalı ve tesis tasarımında dikkate alınmalıdır. Bunun yanında alınacak numune miktarları testlerin doğruluğunu belirleyeceğinden, yeteri kadar numune muhakkak bir yolla temin edilmelidir. Aşağıda bazı boyutlar için (tesis tasarımında istenen boyutlara göre) elek analiz ve yüzdürme-batırma testleri için gerekli minimum numune miktarlarından bir kısmı görülmektedir.

Çizelge 1. ISO 13909-2:2001'e göre elek analizi için en az numune miktarları

Üst boyut mm	%1 Hassasiyet için en az numune miktarı kg	%2 Hassasiyet için en az numune miktarı kg
300	54000	16500
200	16000	4000
150	6750	1700
125	4000	1000
90	1500	400
75	950	250
63	500	125

Çizelge 2. Tipik 4'ten 6'ya kadar yoğunluk fraksiyonu içeren test için numune miktarları

Boyut Aralığı	Bu Boyut Aralığında Gerekli Numune Miktarı kg
200 mm × 100 mm	2720
100 mm × 50 mm	910
50 mm × 25 mm	225

Bu bilgiler ortada olmasına rağmen bazı tesislerin tasarımında 50 kg civarında numunelerle yapılan testler ve en sıkıntılısı da sondaj karotu ile yapılan testlerin kullanıldığı bilinmektedir. Aşağıda (Şekil 1) bazı proje raporlarından örnekler kaynak gösterilmeden verilmiştir.

Tesis tasarımı ve olası ürün özelliklerinin belirlenmesi açısından ise, sadece elek analizleri ve sonuçları kuru bazda değerlendirilen yüzdürme-batırma testlerinin verileri yeterli olmamaktadır. Özellikle genç kömürlerde tesiste oluşacak nem artışı ve buna bağlı ısı değeri değişimlerinin belirlenmesi için ilave çalışmalar yapılmalıdır. Yine genç kömürlerdeki düşük parça sağlamlığına bağlı, yıkama esnasındaki boyut değişimleri de öngörülmelidir.

Bir diğer önemli sorun ise, tesiste oluşacak toz kömür ve şlam miktarlarının gerçeğe yakın öngörülebilmesidir. Bilindiği üzere elek analizi yaşı yöntemle dahi yapılırsa, tesiste oluşacak fiziksel

etkileşimlerin özellikle kilin dağılımındaki etkisi görülememektedir. İncelenmiş olan birçok projede, linyit kömürleri için %5'ten daha az şlam oluşacağı varsayımı görülmüştür.

Tartılan her torbadan temsili numuneler alınmış, analize gönderilmiş ve sonuçlar Çizelge 1 'de verilmiştir.

Çizelge 1. Numunelerin Özellikleri

Torba No	Ağırlık Kg	Kül %	Analitik Nem,%	Uçucu Madde,%	Toplam Külfür,%	Alt ısı Değeri Kcal/Kg
1	43.9	52.75	5.11	28.64	3.29	2099
2	30.0	40.51	9.38	31.60	3.27	2788
3	31.5	21.74	15.31	39.02	2.51	3872
4	11.5	25.31	14.30	39.79	3.34	3824
5	9.0	23.66	14.83	37.50	5.68	3795

* Havada Kuru Baz değerler

Yüzdürme – batırma deneylerine esas olacak numuneyi hazırlamak için birinci,ikinci ve üçüncü torbadaki kömürler birleştirilmiş ve iki ayrı elekten elenerek +31.75 mm , -31.75 + 1.2 mm ve -1.2 mm 'lik üç ayrı fraksiyona ayrılmıştır. Elek fraksiyonları tartılmış ve alınan temsili numunelerin kül analizi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 2' de verilmiştir.

TÜVENAN YÜZDÜRME SONUÇLARI									
(-100 +0.5 mm)									
Tarih:									
Boyut	Yoğunluk	Miktar (G)	Miktar (P) (%)	Kül (C) (%)	Σ P (Yüzen)	Σ(PxC)ΣP (Yüzen)	Σ P (Batın)	Σ(PxC)ΣP (Batın)	
+100 mm	As.	1.45	1965.00	11.35	9.15	11.35	9.15	100.00	83.44
	1.45 -1.60	0.00	0.00	0.00	11.35	9.15	88.65	92.95	
% Kül 2-100 göre	83.44	1.60 -1.75	0.00	0.00	0.00	11.35	9.15	88.65	92.95
% miktar	5.78	1.75 -1.90	0.00	0.00	0.00	11.35	9.15	88.65	92.95
	Az.	1.90	16350.00	88.65	92.95	100.00	83.44	88.65	92.95
	Toplam		17315.00	100.00					
Boyut	Yoğunluk	Miktar (G)	Miktar (P) (%)	Kül (C) (%)	Σ P (Yüzen)	Σ(PxC)ΣP (Yüzen)	Σ P (Batın)	Σ(PxC)ΣP (Batın)	
100+50 mm	As.	1.45	1539.10	5.11	7.17	5.11	7.17	100.00	83.61
	1.45 -1.60	1085.00	3.60	19.85	8.71	12.41	94.89	87.72	
% Kül 2-100 göre	83.61	1.60 -1.75	0.00	0.00	0.00	8.71	12.41	91.29	90.40
% miktar	9.71	1.75 -1.90	0.00	0.00	0.00	8.71	12.41	91.29	90.40
	Az.	1.90	27500.00	91.29	90.40	100.00	83.61	91.29	90.40
	Toplam		30124.10	100.00					
Boyut	Yoğunluk	Miktar (G)	Miktar (P) (%)	Kül (C) (%)	Σ P (Yüzen)	Σ(PxC)ΣP (Yüzen)	Σ P (Batın)	Σ(PxC)ΣP (Batın)	
50+18mm	As.	1.45	1997.60	16.02	7.83	16.02	7.83	100.00	70.24
	1.45 -1.60	707.10	5.67	17.33	21.69	10.31	83.98	82.14	
% Kül 2-100 göre	70.24	1.60 -1.75	239.00	1.92	28.96	23.60	11.83	78.31	86.84
% miktar	16.23	1.75 -1.90	179.80	1.44	47.63	25.05	13.89	76.40	88.29
	Az.	1.90	9347.40	74.95	89.07	100.00	70.24	74.95	89.07
	Toplam		12470.90	100.00					

Şekil 1. Hatalı numune miktarlarına proje raporlarından alınmış örnekler.

Ürün özellikleri için yaklaşımlarda tesis tasarımı açısından çok önemlidir. Üretilen farklı boyutlardaki kömürlerin Pazar hedefleri ve Pazar şartlarındaki olası değişimlere uyumlu olması önemlidir. Bunun yanında kömürlerin nem oranları içinde limitlerin doğru belirlenmesi gereklidir. Özellikle genç kömürlerde nemi çok düşürmek mümkün değildir. Termik kurutmaya ile bunu sağlamak mümkün görülse de, kömürün doğası gereği nem önemli oranda tekrar geri alınırken, kömürün kendiliğinden yanma riski de artmaktadır.

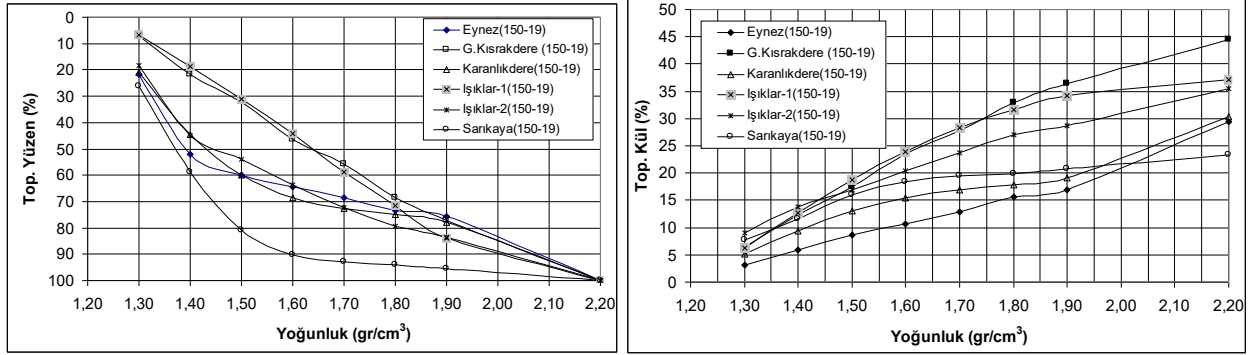
Yıkama ekipmanı seçiminde en önemli parametre olarak kömür yıkanabilirliği göz önüne alınmaktadır. Ancak burada karar nasıl verilmelidir.

Stoklama ve Homojenasyon

Kömür yıkama tesisinin başarısı önemli oranda tesise benzer karakterli sürdürülebilir beslemenin sağlanmasına bağlıdır. Tüm ekipmanlar proje değerine göre doğru seçilse ve sağlıklı çalışsa bile, beslemedeki karakteristik değişiklikler performansı ciddi oranda etkilemektedir. Bu hem ürün miktarı hem de ürün kalitesini etkilemesi yanında, bazı ekipmanlarda tıkanmalara da neden olmaktadır. Bu nedenle ocak üretiminden gelen kömürün bir ön stoklama ve homojenasyondan geçirilmesi gerekmektedir. Halen bazı işletmelerde yapılan homojenasyonsuz stoklama işleri daha da olumsuz etkileyebilmektedir.

Bilindiği gibi tesiste ekipman kapasiteleri hem boyut dağılımına hem de temiz kömür/atık oranlarına bağlıdır. Aşağıda (Şekil 2) geçmişte yapılmış olan detaylı bir çalışmadan sadece bir örnek alınmıştır. Burada görüldüğü gibi tesise 6 ayrı karakterde tüvenan kömür gelmektedir. Ağır ortam tamburunda yıkanan bu kömürler için kapasite seçiminde iki ana kriter öne çıkmıştır. Elde edilecek temiz kömür miktarı ve atılacak malzeme miktarı. Bunlar neden önemlidir; yüzen malzeme (temiz kömür) miktarı tambur boğaz açıklığı ve tambur havuz alanıyla limitlenirken, atılacak malzeme miktarı da tamburun raf alanları toplamı ile tambur dönüş hızına bağlı olmaktadır. Yine kömürün yüzme netliği ve taşın batma hızı da tambur dönüş hızını etkilemektedir. Şekil 1'de verilen grafiğe göre, beslenen kömürlerin hedeflenen 1.6 g/cm³ yoğunlukta teorik ürün miktarları arasında %46, kül oranları arasında ise %12 civarında bir değişiklik oluşmaktadır. Bu durum,

kömürler ayrı ayrı beslendiğinde, tesis kapasitesinin %40 oranında düşmesine neden olabilirken, ürün kalitesinde de beklenmedik sonuçlara neden olmuştur.

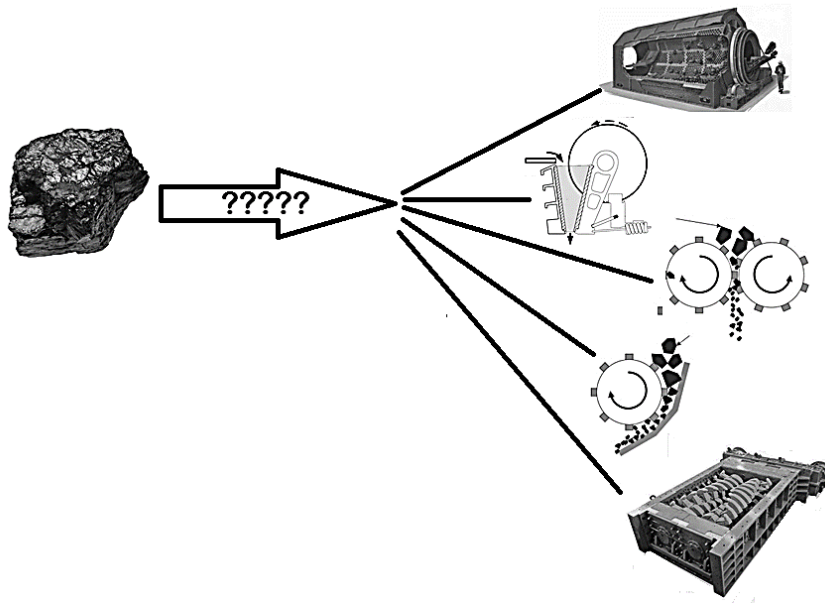


Şekil 2. Aynı ortamda yıkanan farklı kalitedeki kömürlere örnek.

Ön Boyut Kontrolü ve Kırma

Kömür yıkama işlemi tesis girişinde maksimum boyut kontrolü ile başlamaktadır. Boyut kontrolünde üretim yöntemi de önem arz etmektedir. Kırıcı seçerken dikkat edilmesi gereken hususlar;

- Tüvenan kömür tane iriliği dağılımı ve tane iriliği dağılımına göre kömür ve yan kayaç oranları
- Kömürleşme derecesi
- Yan kayaç tipi ve yapısal özellikleri
- Tüvenan kömür nem oranı
- Kömürün stoktan veya doğrudan ocaktan beslenmesi



Şekil 3. Kırıcı seçimi

Tesis Akım Şemasında Yıkama Boyutlarının Belirlenmesi

Kömür zenginleştirme yöntemine karar verirken, öncelik ne olacaktır?

- Ne kadar kayıp olursa olsun, belli bir kalitede ürün üretmek mi,
- Kömür kazanma verimini en üst düzeyde tutmak mı,
- Ürün çeşitliliğini artırarak hem verim hem de kalite açısından hedefler bileşeni yaratmak mı,
- Ürün kullanım hedefi sadece tek amaca/tek pazara mı yönelik,
- Alternatif pazarlar için rekabetçi bir konum alınması,
- Hedef alanlarda dar boğazlar oluşması durumunda, alternatif senaryolar

Tesis tasarımında en önemli hususlardan birisi kömürün kullanım alanları ve hedef piyasalardır. Eğer kömür termik santral amaçlı yıkanacak ise, çok detaylı bir yıkamaya gerek olmadığı gibi, kömürü mümkün olduğunca iri yıkamak gerekmektedir. Bu susuzlandırma ihtiyacını azaltmaktadır. Ancak koklaşır kömür yıkaniyorsa, düşük kül hedefi ön plana çıkacağından, kömürün tamamı ince boyuta indirilerek yıkanabilmektedir.

Kömür sanayi kullanımını için üretilecekse, taleplere göre farklı boyutlarda kömür üretimi gerekecektir. Bu durumda iri, ince ve toz devresi kurulumu gerekecektir.

Yıkama Boyutlarına Göre Ekipman Seçimleri ve Esneklik Uyumu

Tek tip tüketimi olan, örneğin termik santral, kömürlerde daha kompakt yapılı ve işletme gideri düşük tesis tercih edilirken, alternatif tüketicileri olan ve taleplerin mevsime göre değiştiği tesislerde, her ürün için ayrı ekipman tercihi gerekebilmektedir. Yatırım giderlerini kısmen yükseltse de ürün kazanım verimleri açısından bu gerekli olmaktadır.

Kömür yıkama ekipmanlarının dayandığı belli prensipler vardır. Bu prensipleri aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür;

- Optik özellik (Elle ayıklama, optik ayırıcılarla zenginleştirme)
- Mekanik ve yapısal özellik (Döner kırıcılar, sarsıntılı elek kırıcılar, darbeli kırıcılar vb.)
- Yoğunluk farkı
- Elektriksel özellik (Triboelektrostatik, endüstriyel uygulama yok)
- Yüzey özellik farkı (Flotasyon, aglomerasyon)
- Manyetik özellik farkı (Verimsiz, endüstriyel uygulama şansı çok düşük)

Kömür zenginleştirmede halen kullanılmakta olan ve konvansiyonel yöntemler denebilecek yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

İri Boyutta Yıkama

Kömürün iri boyutta yıkanmasında ülkemizde genelde tercih Ağır ortam tamburu ve Drewboy kullanımı üzerinedir. Bunun nedeni ağırlıkla geçmişte ülkemize dış alımla gelmiş olan ekipmanların çalışma prensipleri izlenerek bunların yerli üretimle ikame edilmesi seçeneğidir. Bunların yanında kendini kanıtlamış başka ekipmanlarda söz konusu olmasına rağmen, kısmen iri boyut ile ince boyutun birlikte yıkandığı santrifüj esaslı Larcodems, üç ürünlü ağır ortam siklonları da sektörde görülmektedir.

Son yıllarda jig teknolojisindeki gelişmeler ülkemizde pek ilgi görmemiştir. Oysaki özellikle ROM jigler mekanize üretim yapılan işletmeler için bir tercih olabilecek kapasitededir.

İri kömür yıkama ekipmanlarının seçiminde kömür-yantaş oranları, yakın yoğunluktaki malzeme miktarı, tane şekli, yan kayaç tipi, yıkama için seçilen üst ve alt boyut, zamana bağlı yıkama boyutu değişimleri, kil miktarı ve kilin yapışkanlık özelliği vb.

İnce Boyutta Yıkama

İnce boyutta kömür yıkama denildiğinde genelde 20-0.5 mm arası boyutlar akla gelmektedir. Bu klasik boyut duruma göre değişiklik gösterirken, santrifüj esaslı ekipmanlarda bu boyutu 140 mm' e kadar çıkararak geliştirmeler olmuştur. Ancak burada üst boyut 50 mm'e alt boyut da 0.5 mm'e kadar olan yıkama ekipmanları irdelenecektir.

Bu aralıkta ağır ortam esaslı ekipmanlar, jigler ve kuru yöntemler görülmektedir. Ülkemize ağır ortam esaslı kömür yıkama ekipmanları olan AOS'ler daha çok kullanılan ekipmanlardır. Ancak son yıllarda üç ürünlü AOS kullanımının da arttığı görülmektedir. Eskiden kullanılan jigler ise tamamen terkedilmiş ve bilindiği kadarıyla hiçbir tesiste kullanılmamaktadır. Kuru yöntemle ise bazı denemeler yapılmış ve halen araştırma içinde olanlarda vardır. Bilindiği kadar ise 1 veya 2 tesiste küçük çaplı olarak kullanılmaktadır.

Burada cihaz seçimi, kömür özelliğine ve beklenen ürünlerin çalışma prensibine uygun olması önemlidir. Özellikle tüvenan kömürün yantaş oranı ve tane iriliğinde ve yakın yoğunluktaki malzeme miktarında ciddi değişimler söz konusu ise 3 ürünlü AOS'lerde sorunlar ortaya çıkmaktadır.

Toz Boyutta Yıkama

Bu boyutta ülkemizde genelde spiral kullanılmakta, taş kömürleri için ise flotasyonun uygun olduğu bilinmektedir. Ancak bazı denemelerde (proje önerileri ve yayınlar) genç linyitler için bile flotasyon önerileri görülmektedir. Çayırhan kömürü gibi bir kömür için yapılan araştırmalar bunun en dikkat çekici örneğidir.

Kuru yöntemler

Kömür yıkamada en yaygın kullanılanlar, kuru yöntemlerde markalaşmış olan FGX seperatörü ve AllAir jigdir. Bunun dışında da araştırma safhasında olan ve modifiye edilmiş ve bazı ülkelerde kullanılan yöntemlerde mevcuttur. Yaygın olan markalardan FGX seperatörü ülkemizde birkaç defa pilot ölçekte denenmiş, bilindiği kadar küçük ölçekte bir tesiste kullanılmaktadır. Yapısal özellikleri ve hedeflenen kömür özellikleri nedeniyle bizim kömürlere çok uygun olmayan ancak özel koşullarda kullanıma uygun bir aygıttır. Bunun nedeni bizde beklenen temiz kömür hedefini sağlamakta başarılı olamamasıdır. Bunun nedeni de yanlış hedefle kullanımdır. Üretici firma kataloğunda normalde efektif ayırma yoğunluğu 2 g/cm^3 civarında gösterilmektedir.

AllAir jig ise sadece bir Tübitak projesi kapsamında ülkemizde pilot ölçekte denenmiş olup, linyit kömürlerimiz için beklenen faydayı gösterememiştir.

Kontrol Eleklere

Yıkama tesisinde eleklerin asıl işlevi ön yıkama eleklerinde ve ürün eleklerinde ortaya çıkmaktadır. Ön yıkama eleklerinin verimli çalışmaması özellikle ince kömür yıkamada kullanılan ağır ortam siklonlarının çalışmasını çok olumsuz etkilemektedir. Bunun yanında bu sorunun görülmediği iddia edilen 3 ürünlü AOS'lerde de bu sorunun çok ciddi boyutlarda olduğu mevcut tesislerdeki izlenimlerle görülmüştür.

Buradaki en önemli sorun elek imalatlarında bilimsel yaklaşımlarla tespit edilmesi gereken elek boyutu, elekteki atım (frekans) boyutu ve bu frekansın doğru bir şekilde oluşturulmasını sağlayan motor seçimi ve motorun konumunun genellemelerle belirlenmesidir. Burada elek imalatında kullanılan malzeme ise tamamen ayrı bir konudur.

Yapılan gözlemlerde bazı tesislerdeki eleklerde, bir hareket olmasına rağmen eleme verimindeki düşüşlerin %60-70 seviyelerine vardığı gözlenmiştir. Bu durumda hem ürün kalitesi bozulmakta hem de yıkama süreçleri ciddi boyutta etkilenmektedir. Bu nedenle eleklerin bu konuda uzmanlığını ve yetkinliğini kanıtlamış ve bunu tesiste performans ölçümü ile gösteren üreticilerden almak gerekmektedir.

Susuzlandırma

Kömürlerde susuzlandırma mekanik susuzlandırma ve termik susuzlandırma olarak ele alınmaktadır. Mekanik susuzlandırmada ağırlıkla elekler ve santrifüjler tercih edilmektedir. Burada da yine ekipman seçimi önem arz etmektedir. Özellikle kömürde kullanıma çok uygun olmayan bazı genel amaçlı susuzlandırma ekipmanlarının kullanıldığı, bunun daha çok susuzlandırma eleklerinde görüldüğünü söylemek mümkündür. Santrifüjler ise ayrı bir tercih konusudur. Burada kömürün tane şekli, kil içeriği, tane iriliği dağılımı, kırılabilirliği, sürtünme direnci gibi faktörler santrifüjün mekanik yapısı açısından önemli olmaktadır.

Termik kurutma işlemi ülkemizdeki linyit kömürü tesislerinde çok fazla kullanılan bir uygulamadır. Ancak çok hassas tasarımlar gerektiren bu ekipmanlarda genelde yapılan hatalar, yanlış ısı kaynağı (cehennemlik) tasarımı, kurutma havası sıcaklığı, debisi ve hızı, iç kanat tasarımları, en/boy oranları, çıkış havası sıcaklığı, gövde izolasyonu, kurutucu eğimi gibi faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu hataların sonucunda çok ciddi enerji kayıpları oluşurken, istenen kuruluğa ulaşamadığından, farklı çözümler aranmaktadır. Normalde 50-70 lt/m³saat olması gereken kurutucu veriminin çoğu tesiste 20 m³'ün altına düştüğü görülmektedir.

Daha önce de ifade edildiği gibi, kömürlerin kurutulmasında, doğru hedef nem belirlenmesi özellikle genç kömürler için çok önemlidir.

Susuzlandırma süreci sadece kömürle ilgili değil tesis şlamının (kirli suyunun) arıtılması ve geri kazanılması ve içindeki katı malzemenin yüksek konsantrasyona getirilerek depolanması ya da filtrelerle susuzlandırılması da en önemli uğraşlardan birisidir.

Ürün Değer Tanımları

Üretilen ürünün tüketici açısından tercih nedeni olacak parametreler, sürdürülebilir bir Pazar payı açısından dikkat edilmesi gereken bir husustur. Ürün kalitesinde meydana gelen dalgalanmalar tüketicinin kaynak tercihini değiştirmesine neden olacaktır.

Bunun yanında, üretilen temiz kömürün oluşturacağı diğer fayda ve problemleri de doğru görmek gerekmektedir. Özetle işlemin çok boyutlu olduğu termik santrallerde bu çok önemlidir. Aşağıda bir proje kapsamında yapılmış olan değerlendirmelerden bu durum açıkça görülmektedir. Ancak burada sistemin tasarım değerlerini de dikkate almak gerekmektedir. Bir sisteme tasarım değerleri dışında kömür beslemek, kömür kalitesinde büyük iyileşmeler sağlansa bile, zarar verebilmektedir.

Çizelge 3. Kömür yıkamanın avantajları için bir örnek

	Tüvenan Kömür	Yıkamış Kömür
	Nem: %15 Kül: %45 S: %1.01 AID: (kcal/kg) 2790	Nem: %15 Kül: %18 S: %1.5 AID: (kcal/kg)4740
Kül miktarı (ton/yıl)	1,584,942	370,062
Kömürden CO ₂ emisyonu (ton/MW)	0.79	0.46

Çizelge 3. Kömür yıkamanın avantajları için bir örnek (devamı)

	Tüvenan Kömür	Yıkanmış Kömür
Kireçtaşından oluşacak CO ₂ (Ton/MW)	0.02	0.02
Toplam CO ₂ (Ton/MW)	0.81	0.49
Kireçtaşı CaCO ₃ oranı %	90.00	90.00
Akışkan yatak için CaCO ₃ (ton/MW)	0.06	0.05
Yıllık (ton)	222,337	194,360
Kireçtaşından oluşacak kül (ton/yıl)	302,378	264,330
Toplam kül (ton/yıl)	1,887,320	634,392

Performans Ölçümleri

Ülkemizdeki kömür hazırlama tesislerindeki en önemli sorunlardan birisi, genelde performans ölçümlerinin yapılmamasıdır. Bu durumda tesise beslenen tüvenan kömür ve yıkanmış kömür miktarları üzerinden değerlendirme yapılırken, maliyete etki eden birim giderler de yeterince analiz edilmemektedir. Dolayısı ile bunların sadece maliyete oransal etkileşimi izlenmekte (birçok tesiste bu tür verilerde görülmemiştir) ve değişken olarak üzerinde çalışılmamaktadır.

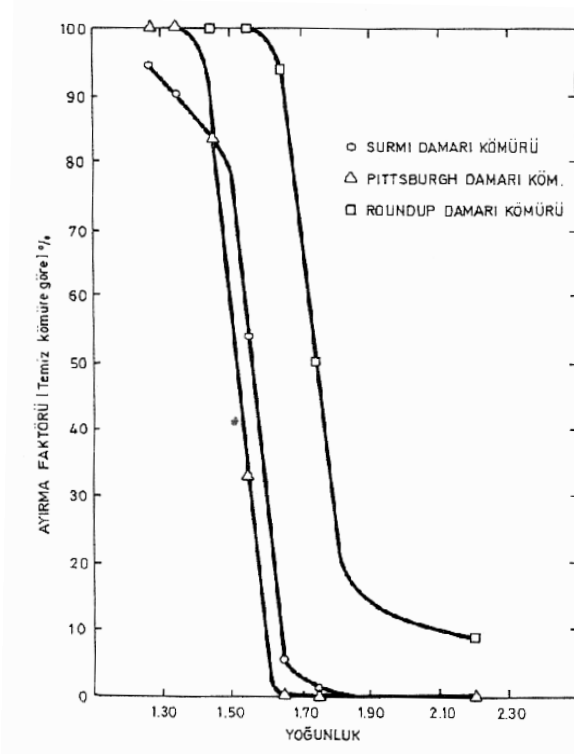
Performans ölçümü neden önemlidir?

- Sınıflandırma sistemlerinin doğru çalışıp çalışmadığını gösterir, verim düşüklüğü var ise giderici tedbirler alınır.
- Yıkama ekipmanlarında, ayarlanmış yoğunluk ile fiili ayırma yoğunluklarının izlenmesini sağlar, sapma var ise nedenleri araştırılır.
- Santrifüj esaslı ağır ortam ekipmanlarında fiili ayırma yoğunluğunun yanında, ağır ortam bölünme oranlarının ve ürün çıkışlarındaki (temiz kömür, artık ve var ise ara ürün) yoğunluk kontrolleri ile aygıtın doğru çalışıp çalışmadığının belirlenmesini sağlar.
- Elde edilen ürünlerde, teorik değerlere göre sapmalar var ise nedenleri araştırılır.
- Çizilecek performans eğrileri ile yoğunluk fraksiyonlarına göre kazanımda farklılıklar var ise bunlar tespit edilir.
- Bunların sonucunda giderilecek kayıptaki her birim düzeltme, kazanç artışına dönecektir.

Tesislerde yoğunluk ölçümleri genelde gravimetrik olarak yapılmaktadır. Yani belli bir hacme sahip kap doldurulup tartılarak yoğunluk tespit edilmektedir. Acaba bu yoğunluk ne kadar gerçeği göstermektedir. Ağır ortam ekipmanlarında yoğunluğun doğru çalışması için viskozite ve stabilite çok önemlidir. Bunu belirleyen manyetitin tane iriliği ve yoğunluğu olması gerekirken, işin içerisine ufalanmış kömür ve yankayaçların girmesi ve önemlisi de kilin varlığı sonuçları büyük oranda etkilemektedir.

İçerisinde çok fazla kil biriken ağır ortam, viskoziteyi aşırı yükselterek iri devrede ince taşların da kömürle yüzmesine neden olabilirken, ağır ortam siklonlarında ise, ayırma verimini etkilemenin yanında kil toplarının oluşma riskini de artırmaktadır.

Performans ölçümlerinde izlenebilecek birçok yol vardır. Aslında birçok ölçüm birlikte yapılarak, sonuçların sağlıklı analizlenmesi önemlidir. Örneğin iri kömür yıkama ekipmanlarından performans eğrisi çizmek için numune alınırken, aynı zamanda ağır ortamdan ve kullanılan manyetitten de numune alınmalıdır. Bunun yanında numune alımı esnasında, tesisin rejimde çalışıp çalışmadığı, beslenen malzeme miktarı ve beslenen malzeme ile ürünlerin de elek analizleri yapılmalıdır.

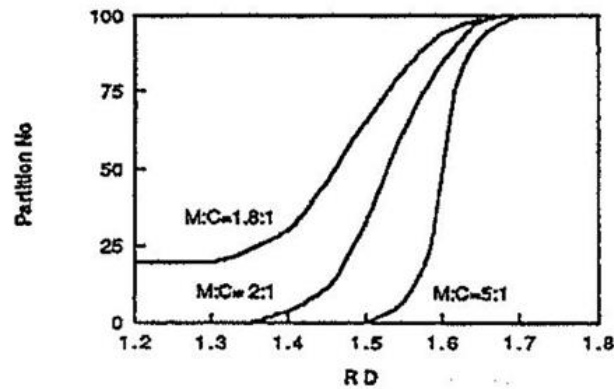


Şekil 4. Aynı Ep değerine sahip farklı performans eğrileri

Santrifüj esaslı bir ekipmandan numune alırken ise, beslenen kömür ve ürünlerin yanında, beslenen ağır ortam ile üst akım ve alt akımdan da numuneler alınmalıdır. Aynı zamanda sistemin çalışma parametreleri de not alınmalıdır.

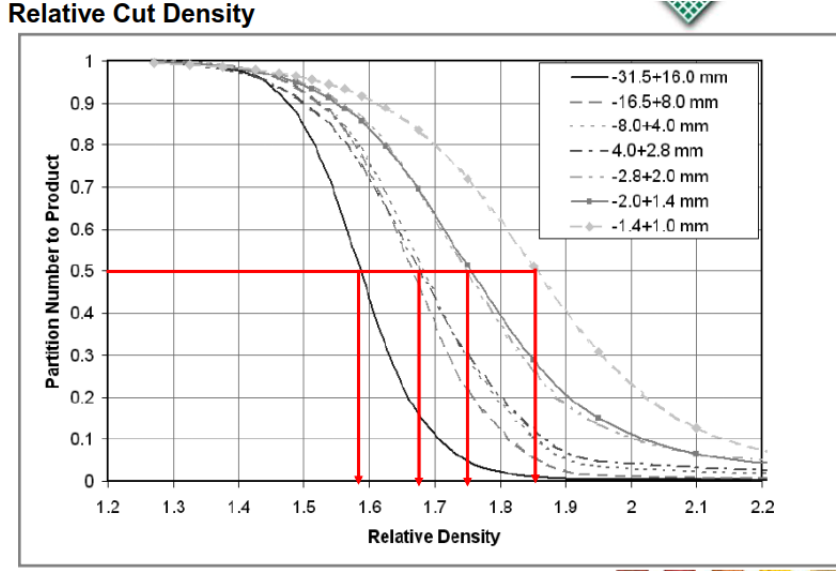
Performans eğrisinin de tek başına değerlendirilmesi bile çok önemlidir. Bu eğrilerden fiili ayırma yoğunluğunun yanında ayırma performansının göstergesi olan Ep ve Imperfeksiyon değerleri de bulunur. Ancak Ep değerleri tek başına yanıltıcı olabilmektedir.

Kömür yıkama aygıtı performansı açısından önemli olan bir diğer husus, ağır ortam ekipmanlarındaki ağır ortam/kömür oranıdır. Şekil 5'te bir ağır ortam siklonu için elde edilen, farklı ağır ortam/kömür oranlarındaki performans eğrileri görülmektedir.



Şekil 5. Ağır ortam siklonunda farklı ağır ortam/kömür oranlarındaki performans eğrileri (US Bureau of Mines)

Bir kömür yıkama ekipmanı için tane boyut dağılımı da performansı etkileyen önemli bir faktördür. Şekil 6'da geniş tane aralığında elde edilen yıkama sonucunun dar tane aralıklarında incelenmesi ile, iri boyuta etki eden efektif ayırma yoğunluğu ile ince boyutta oluşan efektif ayırma yoğunluklarındaki ciddi fark açıkça görülmektedir.



Şekil 6. Ağır ortam siklonunda geniş tane aralığında yapılan yıkama işleminin dar tane gruplarına göre ayırma etkileri. (Metso Minerals)

SONUÇLAR

- Tesis kurulumlarında, aslında tesis kurulum maliyetlerine göre çok önemsiz maliyeti olan AR-GE çalışmalarından kaçınılması anlaşılabilir bir durumdur.
- Testleri yapacak kişi/kurum laboratuvar olanakları, testlerin standartlara uygunluğu yönünden sorgulanmalıdır.
- Kömür özellikleri yanında, kömür üretim koşulları, yataklanma koşulları vb. faktörler değerlendirmelerde göz önüne alınmalıdır.
- Kömürü tanımadan kurulacak tesisin ne gibi sonuçlar doğuracağı öngörülebilmelidir. Bu konuda en büyük eksiklik ise performans analizleridir.
- Kömürün kullanım alanları konusunda **fikir sahibi olmadan**, kömür üretim süreçlerinde karar alıcı olmak veya karar alımı için fikir oluşturmak doğru değildir.
- Bir kuruma ya da firmaya yaptırılan çalışmalar ve seçimler muhakkak başka bakış açısıyla irdelenecek şekilde danışmanlık süreciyle denetletirilmelidir.
- Kömür diğer minerallerde olduğu gibi genellenemez bir hammadde değildir. Oluşum koşulları itibarı her kömür yatağı benzersiz olup, kendine özgü koşullarda değerlendirilmesi gereklidir.
- **Hedefleri doğru belirlenmeyen her yatırım, sahibine, çalışanlarına, ticari ilişkide olduğu diğer kişi ve kurumlara, ülke kaynaklarına ve ülke ekonomisine zarar verebilmektedir.**

PÜNÖMATİK FLOTASYON HÜCRELERİ VE YENİ BİR PÜNÖMATİK FLOTASYON HÜCRESİ PNEUMATIC FLOTATION CELLS AND A NEW PNEUMATIC FLOTATION CELL

Ö.Y. Gülsoy

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
(ogulsoy@hacettepe.edu.tr)

ÖZ

Pünömatik flotasyon hücreleri ilk geliştirilen flotasyon makinaları arasındadır. Fakat daha sonra mekanik hücrelerin gelişimi nedeniyle kullanımları azalmıştır. İnce kabarcık oluşturma kapasiteleri, yüksek flotasyon hızları, ince tanelerde yüksek flotasyon verimi sağlamaları nedeniyle tekrar önem kazanmaya başlamışlardır. Pnömatik flotasyon hücrelerine olan ilgi kömür zenginleştirme yeni bir ivme kazanmıştır. Buna bağlı yeni tasarımlar ortaya çıkmıştır. Endüstrinin bu yöndeki talebi de artmaya başlamıştır. Bir çok flotasyon makinası üreticisi artık kendi tasarımlarını yapmış ve pünömatik flotasyon hücrelerinin üretimine geçmiştir. Birim kapasiteleri çok yüksek makinalardır. Flotasyon hızları çok yüksek, ilk yatırım ve işletme maliyetleri görece düşüktür. Oldukça küçük yer gereksinimleri vardır. Bu özellikleri nedeniyle ülkemizde de araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Ülkemizdeki önemli flotasyon makinası üreticilerinden birisi olan Tüfekçioğlu Kauçuk ve Makina A.Ş. desteğiyle bu konu üzerinde bir araştırma yapılmış ve laboratuvar, prototip ve endüstriyel ölçekli üretim aşamısına kadar gelinmiştir.

Anahtar Sözcükler: Flotasyon hücreleri, pünömatik flotasyon hücresi

ABSTRACT

Pneumatic flotation cells were among the first flotation machines developed. However, their use later declined due to the development of mechanical cells. Their fine bubble generation capacity, high flotation speeds, and high flotation efficiency for fine particles have made them gain importance again. Interest in pneumatic flotation cells has gained new momentum in coal enrichment. Consequently, new designs have emerged. Industrial demand for these cells has also begun to increase. Many flotation machine manufacturers have now developed their own designs and transitioned to the production of pneumatic flotation cells. These machines have very high unit capacities. Their flotation speeds are very high, and their initial investment and operating costs are relatively low. They require relatively small space. These features have attracted the attention of researchers in our country. With the support of Tüfekçioğlu Kauçuk ve Makina A.Ş., one of the leading flotation machine manufacturers in our country, research has been conducted on this subject, and laboratory, prototype, and industrial-scale production has been achieved.

Keywords: Flotation cells, pneumatical flotation cells

GİRİŞ

Pünömatik flotasyon hücreleri karıştırma için bir tahrik mekanizması içermeyen flotasyon makinalarıdır. Flotasyon için gerekli hava hücre içine ya bir basınçlı hava kaynağından verilmekte ya da palp akışı ile oluşturulan vakum sayesinde atmosferden emilerek alınmaktadır. Mekanik hücrelerdeki hücre içine giren havanın içerdeki mekanizma tarafından parçalanmasının aksine hava hücre içine kabarcıklar halinde girmekte, tanelerin kabarcığa yapışması önemli oranlarda bu giriş kısmında gerçekleşmektedir. Hücre içinde ise tane kabarcık çarpışması ve bağlanması meydana gelmektedir. Pünömatik hücrelerde hava/palp girişi özel tasarlanmış nozullar ya da “Downcomer” adı verilen borular yardımı ile olmaktadır. Pünömatik flotasyon

makinaları arasında yer alan kolon flotasyonu gibi flotasyon makinalarında da flotasyon için gerekli hava basınçlı hava destekli, ince hava kabarcıkları oluşturan bir birim (Air Sparger, Hava Püskürtücüsü) ile sağlanmaktadır. Pünömatik flotasyon hücrelerinde mekanik hücrelerden farklı olarak, çok şiddetli karıştırmanın olduğu hava/palp besleme kısmında, aşırı çarpışma olasılığı ve hızlı tane-kabarcık hareketleri nedeniyle yüksek flotasyon kinetiği oluşmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle düşük flotasyon hızına sahip çok ince tanelerin kazanımı artmaktadır. Bu nedenle düşük kazanıma sahip ince tanelerin olduğu aşamalarda tercih edilmektedir. Genel kullanımına bakıldığında pünömatik flotasyon hücreleri başta temizleme hücreleri olmak üzere kaba ve süpürme flotasyon aşamaları gibi flotasyonun her kademesinde rahatlıkla kullanılabilen ekipmanlardır. (Finch,1995), Lynch et al., 2007, 2010, and Cheng and Liu, 2015).

Pünömatik flotasyon hücrelerinde havalandırma birimi ve flotasyon tankı genellikle ayrı birimler şeklinde tasarlanmıştır. Flotasyon için gerekli hava hücre içine ya basınçlı (düşük veya yüksek hava basıncı) olarak verilmekte, ya da özel bir nozul sisteminin içinden akan palpın oluşturduğu vakum (Venturi etkisi) ile emilmektedir. Bu nedenle flotasyon kolonları gibi pünömatik makinalarda hava kabarcıklarını oluşturmak amacıyla ince gözenekli bir hava besleme birimine (Air Sparger, Hava Püskürtücüsü) ihtiyaç duyulmamaktadır. Diğer pünömatik flotasyon hücrelerinde ise besleme akış borusu ucuna yerleştirilmiş olan bir sistem palp akışına hava girişini ve kabarcık oluşumunu sağlamaktadır. Bu türden bir hava besleme ve kabarcık oluşturma sistemi içeren Pünömatik flotasyon hücrelerinde hava nozul içindeki kavitasyona bağlı olarak parçalanmakta ve hava kabarcıklarını oluşturmaktadır. Böylece kabarcık ve taneler aynı kanalda birleşmekte ve daha yüksek oranda kabarcık tane yapışma şansı oluşmaktadır.

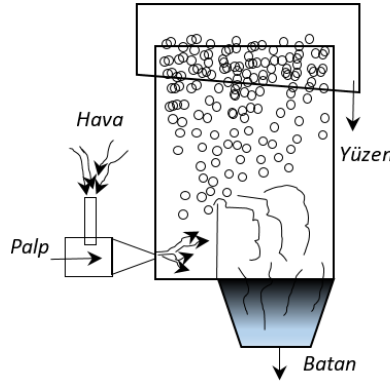
Her ne kadar pünömatik flotasyon hücrelerinin ilk tasarımları 1950'lere dayansada, flotasyon kolonlarının kullanıma girmesi ve başarısı nedeni ile pünömatik flotasyon hücreleri ancak günümüzde ön plana çıkmaya başlamıştır. Flotasyon kolonlarının görece daha büyük yapıları daha küçük ve daha az yer kaplayan tasarımlar üzerinde çalışmalara yönelimi artırmış ve yeni pünömatik flotasyon hücreleri geliştirilmesine yol açmıştır. Ayrıca ekonomikliği ve basitliği de bu hücrelere olan ilgiyi artırmıştır. Görece eskiye dayanan pünömatik hücrelerin tasarımına yönelik yeni gelişmeler genel olarak palpın ve havanın hücreye nasıl gireceği, palp ve hava karışımının nasıl sağlanacağı, nasıl ince kabarcık oluşturulacağı, havanın hücre içindeki dağılımı, hava kabarcıkları ve tane çarpışması gibi mekanizmalar üzerinde olmuştur. Diğer taraftan hücre içindeki palpın karıştırılması ve hücre içindeki seviye kontrollerinin nasıl yapılacağı da araştırmalar kapsamında üzerinde çalışılan konular arasındadır.

Pünömatik flotasyon hücreleri yapısal olarak mekanik flotasyon hücrelerine oranla daha küçük olup, daha az yer kaplamakta ve mekanik karıştırma sistemi olmadığından daha az enerji sarfiyatına sahip olmaktadır. Pünömatik flotasyon hücreleri flotasyon makinalarının gelişimindeki ilk adımlardır (Davis 1964, 1966). Fakat, daha sonra mekanik karıştırmanın devreye girmesi nedeniyle eğilim bu yöne kaymıştır. Flotasyon kolonlarının temizleme aşamalarındaki başarılarından sonra pünömatik makinalara olan eğilim yeniden canlanmış ve yeni makinalar ortaya çıkmaya başlamıştır. Pünömatik flotasyon hücrelerinde genel olarak palp ve hava hücreye girmeden, ön bir besleme sisteminde karışarak hücre içine verilmektedir. Flotasyon kolonları ve pünömatik flotasyon hücreleri havalı flotasyon makinaları sınıfı içinde değerlendirilmekle birlikte, flotasyon kolonlarının temel farkı havanın ve palpın ayrı ayrı flotasyon hücre içine verilmesi ve yüksek köpük kalınlığı oluşturmalarıdır. Ayrıca pünömatik makinalarda ortaya çıkan şiddetli ve hızlı kabarcık tane çarpışması kolonlardaki farklı yönlerden birbirine doğru hareket eden kabarcık ve tanelerin sakin çarpışmaları ile karşılaştırıldığında temel fark ortaya çıkmaktadır.

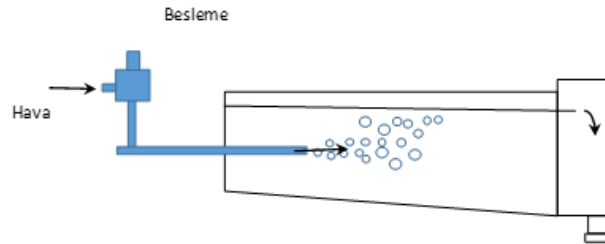
Geleneksel olarak kullanılan flotasyon hücrelerinin işlem verimliliği ince/ultra ince ve kaba parçacıklar için önemli ölçüde düşmektedir (Hassanzadeh, 2022). Ancak, bu tür hücreler tüm flotasyon aşamalarında uzun yıllardır kullanıldığından ve madencilik sektörü için yeni hücrelerin kullanılmasındaki belirsizlikler ve buna bağlı riskler nedeniyle mekanik flotasyon hücreleri endüstri tarafından halen tercih edilen makinalar olmaktadır. Pünömatik hücrelerin uygulanabilirliğini kısıtlayan bir diğer kritik konu da ölçeklendirme ve laboratuvar denemeleridir. Pünömatik hücrelerin endüstriyel kullanımı görece az belirli minerallerle (özellikle

kömür flotasyonu) sınırlı olduğundan, ölçeklendirme prosedürleri mekanik hücreler tarafından belirlenen laboratuvar verilerine dayanmaktadır. Ne yazık ki klasik anlamdaki mekanik flotasyon hücreleri ile devre tasarımında kullanılan kinetik yaklaşımlar bu tür hücrelerde kullanılamamaktadır. Pnömatik flotasyon hücrelerinde flotasyon performansı kullanılan hücrenin hacminden çok besleme hızına bağlı olmaktadır.

Pnömatik makinaların bilinen anlamda ilk dikkat çekici olanı, Davcra Hücresi 1960'lı yıllarda ortaya çıkmıştır (Şekil 1). Bu hücrede palp ve basınçlı hava bir nozuldan içi pulp ile dolu bir tank içine, taban kısmına yakın bir noktadan basınçlı bir şekilde verilmektedir. Besleme borusu tanka yatay şekilde bağlıdır. Besleme sisteminde yatay palp akışına dikey olarak bağlanmış bir borudan da sanıçlı hava sağlanmaktadır. Nozulun yapısı ve tank içindeki engel plakası sayesinde taneler nozul içinde ve çarpma plakası etrafında oluşan hava kabarcıklarına yapışarak oluşan köpük fazına yükselmektedir. Yapışmayan taneler ise tabandaki tahliye kısmından boşalmaktadır. Hücre içinden dışarıya doğru aktık palp akışının sağlanması için özel kontrol sistemi gerekmektedir. 1970'li yıllarda ortaya çıkan Bahr hücresinde de (Şekil 2) benzer bir sistem kullanılmaktadır. Palp hücre içine bir boru ile beslenmekte ve hava da bu borunun içine verilmektedir. Dikdörtgen bir yalak şeklinde olan hücrenin giriş tarafından basınçla üflenene besleme palpın içine girmekte ve yüzen ürün ayrıldıktan sonra diğer taraftan da bir engel bariyerini aşan palp hücreyi terk etmektedir. Basınçlı hava ve palp bu boru ve nozul sistemi ile hücre içine girmektedir. Burada tankın yapısına bağlı olarak birden çok nozul kullanılabilir. Ayrıca düşey bir hücreye alttan besleme yapılan sistemleri de mevcuttur. Oluşan hava kabarcıklarına yapışan taneler köpük fazına taşınarak sistem dışına alınmaktadır.



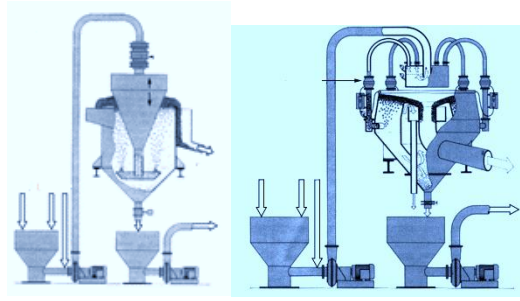
Şekil 1. Davcra Hücresi Şematik Görünümü (Bilinen tasarımına göre modifiye olarak çizilmiştir.)



Şekil 2. Bahr Hücresi (Hobart 2021, modifiye edilerek çizilmiştir.)

Modern pnömatik flotasyon hücrelerinin çoğunda tank ve hava/palp besleme sistemleri değişiklik gösterse de Bahr'ın (1971) geliştirdiği sistemin modifikasyonları olarak değerlendirilebilir. 1980'lerde geliştirilen Ekof Hücresi 1990'larda Pneufлот Hücresi olarak tanınmıştır. Free Jet Flotasyon Hücresi olarak bilinen flotasyon hücresindeki sisteme benzer bir sistemin kullanıldığı Ekof Hücresinde hava ile karışan palp yanlardan hücre içine verilmektedir. Free Jet Hücresinde ise; hücrenin merkezine yerleştirilmiş dikey bir boruda "Downcomer" hücre içine doğru akan palp akışının oluşturduğu vakum etkisi sayesinde boru içine giren

hava ile karışan palp bu boru ile doğrudan hücrenin ortasına beslenmektedir. Farklı yapılarıdaki “Downcomer” günümüzdeki pünömatik flotasyon hücrelerinin ana tasarım bileşeni haline gelmiştir. Pneufлот Hücresi Ekof Hücresi ile aynı havalandırma mekanizmasına sahip olup birisinde palp hücrenin merkezinden ve yukarıdan, diğerinde ise hücre gövdesine yanlardan bağlanmış borulardan verilmektedir. Kapalı borunun içine fişkırtılarak verilen palp sayesinde oluşan vakum borunun üst tarafındaki boşluktan hava emmektedir. Ya da hava girişinden basınçlı hava verilerek kabarcık oluşumu sağlanmaktadır. Böylece boru içinden yüksek hızda akan palpın etkisi ile kabarcıklar oluşmakta ve palp hücre içine bu kabarcıklarla birlikte akmaktadır. İlk aşamalarda tanklara yandan yatay olarak verilen palp bu gelişmelerden sonra bir çok yeni tasarımda tankalara yukardan ve palpın içine daldırılarak verilmeye başlanmıştır. Pneufлот Hücresinde özel hava sistemi sayesinde hava kabarcıkları ile karışmış olan besleme aynı zamanda bir köpük alanı daraltıcı (Froth Crowder) görevi yapan, tankın tabanına kadar uzanan, üzeri kapalı konik bölüme beslenir. Buradan da üzerinde çevresel olarak açılmış delikleri bulunan besleme düzeneğinden palpın içinden yukarı yönde hücreye verilir. Pneufлот ve Ekof Hücrelerinin genel görünümü Şekil 3’de sunulmuştur.



Şekil 3. Pneufloat Flotasyon ve Ekof Flotasyon Hücreleri (Hubort 2021’den uyarlanmıştır.)

Yine 1980’li yıllarda özel bir havalandırma birimi içeren Allfloat Hücresi geliştirilmiştir. Bu hücre de yine yukarıdan bir besleme borusu hücrenin tabanına kadar uzanmaktadır. Bu borunun ucunda Pneufloat Hücresindekine benzer şekilde palpi hücre içine dağıtarak beslemeye yarayan yukarıya dönük bir seri delikli bir dağıtıcı bulunmaktadır. Besleme bu borudan siteme pompa ile basılırken oluşan vakum etkisi ile üst tarafa yerleştirilmiş ve özel olarak tasarlanmış olan gözenekli bir birimden akış borusu içine hava emişi ve kabarcık oluşumu sağlanır. Bu hücrelerdeki hava emiş birimlerinde değişiklikler yapılarak hem kabarcık boyutları hem de tane kabarcık etkileşimi üzerinde değişiklikler yapılmaya çalışılmıştır. Oluşan kabarcıklar palp akışına kapılarak besleme borusu içinde hücre tabanına kadar ulaşır ve buradaki deliklerden hücre içine girer. Palp tank içinde bir dönüş hareketi veya karıştırma oluşturur. Temelde hava girişi basınçlı havaya dayanmaktadır. 1990’lı yıllarda Polonya’da kömür için yoğun olarak kullanılmıştır. Benzer yapıda 2000’li yılların başında ortaya çıkan Imhoflot hücresinde de palp boru ve özel nozullar ile hızla fişkırtılırken oluşan Venturi etkisi ile hava emişi sağlanmaktadır (Huu Hoang vd.2022). Imhoflot’un V-cell olarak bilinen ilk tasarımında aşınmaya karşı özel malzemeden imal edilmiş nozullar kullanılmıştır. Bu hücrede de palp bir “Downcomer” yardımı ile hücre içine düşey bir şekilde beslenmektedir. Yine “Downcomer” hücre içine yukarıdan dik bir şekilde daldırılmıştır. Imhoflot’un daha sonra geliştirmiş olan G-cell tipinde ise “Downcomer” lar hücreye yandan açılı bir şekilde (radyal) bağlanmış ve hava ile karışmış palpın hücre içine açılal olarak girişi sağlanmıştır. Bu sayede palp hücre içinde bir dönüş hareketi yapmaktadır. 1980’li yılların sonuna doğru yaygınlaşmaya başlayan Jameson hücresi de diğer pünömatik flotasyon hücrelerinde kullanılan benzer bir “Downcomer” içermektedir. Bu hücrede de palp bir nozul ile yüksek hızla silindirik bir boru şeklinde uzanan “Downcomer” içine fişkırtılmaktadır. Üstü kapalı olan boru içindeki aşağı yönde akışın oluşturduğu vakum etkisi üst tarafı kapalı olan bu “Downcomer” içine yine üst tarafa yakın bir yerine yerleştirilmiş olan hava giriş deliğinden önemli miktarda hava çekişi sağlamaktadır. Burada da besleme “Downcomer” sayesinde hücreye yukarıdan ve doğrudan palp içine girecek şekilde verilmektedir. “Downcomer” içindeki serbest palp yüzeyine yüksek hızla çarpan besleme bu alan içine emilen havayı parçalayarak kabarcıkların oluşumuna neden olmaktadır. Bütün “Downcomerlar” da olduğu gibi üst taratan giren basınçlı besleme akışı hava ile karışarak “Downcomer”

içinden aşağıya doğru akmaya zorlanmaktadır. Uygulamada aynı hücrede palp içine daldırılmış birden çok “Downcomer” kullanılmaktadır. 1980’lerde geliştirilmiş olan Freejet Flotasyon hücresinin 2016 (Güney vd. 2016) yılında “Downcomer” içine çoklu bir nozul sisteminden palp beslemesi yapıldığı yeni versiyonunda da flotasyon hücresine yukarıdan dikey bir şekilde girmekte olan “Downcomer” kullanılmıştır. Burada da hava nozullardan hızla akan palpın yarattığı Venturi etkisi ile dışarıdan emilmektedir. 2006’ yılında geliştirilmiş olan Cyclojet Flotasyon hücresi downcomer sisteminde oldukça önemli bir değişiklik ileri sürmüştür (Hacıfazlıoğlu, Toroğlu, 2009, 2012). Bu hücrede “Downcomer” olarak üst çıkışı kapalı bir siklon kullanılmaktadır. Siklon alt çıkışı kapalı ve konik şekilde bir muhafaza ile hücredeki palp içine daldırılmaktadır. Bu kısım “Downcomer”ın yaptığı boru işlevini yerine getirmekte ve üst kısmı kapalı olduğundan hava emiş sağlamaktadır. Bu şekilde emilen hava siklonun alt kısmından şemsiye şeklinde açılarak fişkıran palp ile parçalanmakta ve karışarak hücre içine akmaktadır. Bu sistemde de palp beslemesi özel tasarımlı, siklon şeklindeki diğer hücrelerdeki “Downcomer” sistemine benzer, dikey bir şekilde doğrudan palpın içine yapılmaktadır. 2010’lu yıllarda ortaya çıkan Concorde hücresi de dikey bir “Downcomer” kullanılmaktadır (Kupka , vd ,2024). “Downcomer” içine şiddetle fişkirtılan palp ve aynı yere giren basınçlı hava “Downcomer” içinde aşağı yönde palpın içine doğru hareket eder ve çıkışa palpın içine yerleştirilmiş bir çanağa çarpması sağlanır. Aynı zamanda oluşan şok dalgası ile de tane kabarcık etkileşiminin maksimize edildiği belirtilmektedir. Yine 2010’lu yıllarda oratay çıkan Reflux hücresinde ise “Downcomer” içinde ince hava kabarcığı oluşturmaya yarayan bir sistem bulunmaktadır (Guner, vd. 2023). Ayrıca palpın çöktüğü kısımda da havalandırma sağlayan ikinci bir bölüm bulunmaktadır. “Downcomer” sistemi diğerlerinde olduğu gibi dikey bir şekilde palp içine daldırılmış durumdadır. Günümüzde farklı yapılarda pünömatik flotasyon hücreleri kullanılmakla birlikte, genel yapıları itibarı ile “Downcomer” sistemine sahip, kendinden hava emişli sistemler pünömatik flotasyon hücreleri olarak öne çıkmaya başlamıştır. Bu hücrelerdeki temel prensip palp akışının yarattığı vakum etkisi ile sisteme hava girmesi, palpın hava palp ara yüzeyine şiddetle çarpması, bu çarpışma sırasında havanın yakalanıp sürüklenmesi (entrainment) ve bu esnada hava kabarcıklarının oluşması prensibine bağlı olarak sistemin içine palp hava girişinin birlikte yapılmasına dayanmaktadır.

PÜNÖMATİK FLOTASYON HÜCRELERİ GENEL YAPISI

Pünömatik flotasyon hücrelerinde mekanik karıştırıcı bulunmaz. Daha yoğun bir sistemde kabarcık ve tanelerin şiddetli ve hızlı çarpışmaları görece daha hızlı bir flotasyon kinetiği sağlar. Bu hücrelerin diğer bir özelliği de hem kolonlara hem de mekanik hücrelere oranla daha küçük boyutlarda olmalarıdır.

Pünömatik flotasyon hücrelerini 3 gruba ayırabiliriz:

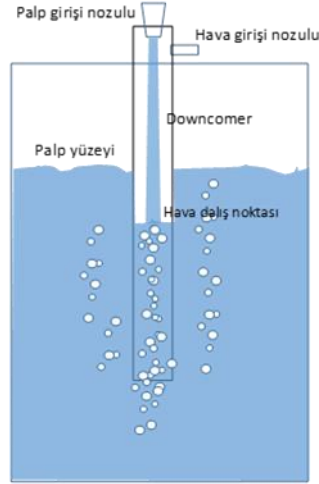
1. Dışarıdan basınçlı hava verilen sistemler,
2. Kendiliğinden hava emişi yapan sistemler,
3. Hibrit sistemler.

Günümüzde üzerinde yoğun olarak çalışılan pünömatik flotasyon makinaları dışarıdan hava emişli olan sistemlerdir.

Davca hücresinden sonra tasarlanmış olan pünömatik hücrelerin genel özelliği palp ve havanın düşey bir boru (Downcomer) ile palp içine doğrudan akmaya zorlanması prensibine dayanmaktadır. Her ne kadar bazılarında bu boru şeklindeki besleme sistemi hücreye yandan bağlansa da, palpın akışı bu boru içinde düşey yönde olmakta ve buna dik yönde de ya kendiliğinden emiş ya da basınçlı hava ile hava ilavesi sağlanmaktadır. Kaskad flotasyon hücresi veya Air Sparged Hydrocyclone gibi tabandan ya da çepeçevre poroz bir malzeme ile hücre içine hava verilen sistemlerin dışında yeni geliştirilmiş olan pünömatik flotasyon hücrelerinde büyük çoğunluğunda, hücrenin üstünden palpın ortasına doğru uzanan ve “Downcomer” olarak tanımlanan bu boru veya besleme sistemi (hücreden hücreye yapısal değişim göstermektedir) pünömatik flotasyon hücrelerinin ortak özelliği olmuştur. Pünömatik hücrelerde hava ve palp bu boru ile hücre içine verilmektedir. Bu hücrelerde gerekli hava ya Venturi benzeri bir yapı ile doğrudan emilmekte ya da basınçlı hava olarak bir hava kaynağından sağlanmaktadır. “Kaskad flotasyon hücresi” ve “Air Sparged Hidrosiklon” gibi özel tasarımlarda

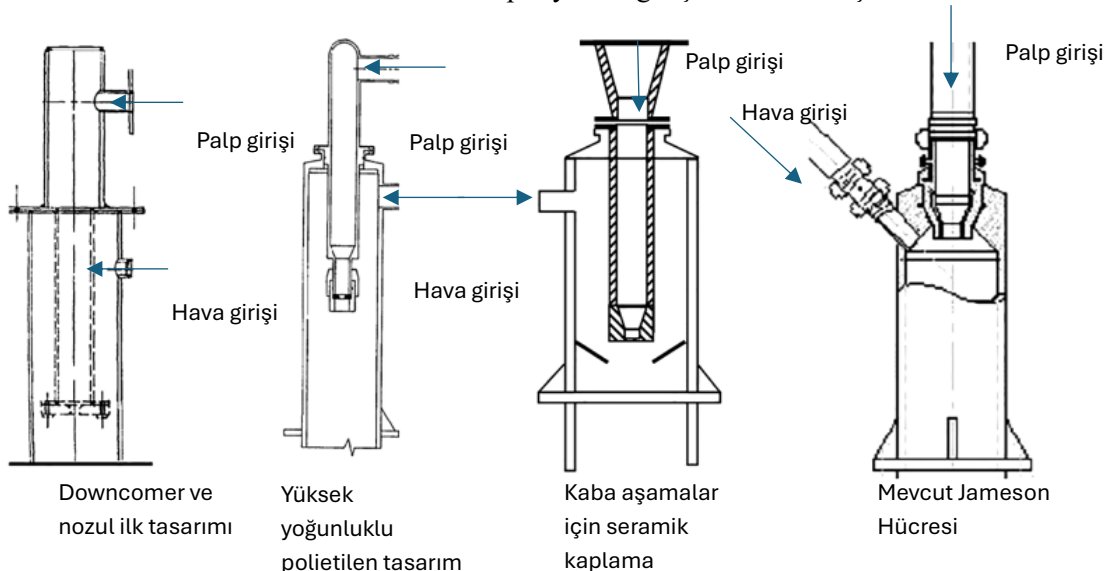
da hava dışarıdan basınçlı hava kaynağından sağlanmaktadır. Yine kolonlarda ve kolon benzeri yapılarda da gerekli hava basınçlı hava kaynağı ile sağlanmaktadır (Harbort, 2021). Pünömatik hücrelerin bazılarında basınçlı hava kaynağı kullanılsa da flotasyon kolonlarından farklı olarak pünömatik flotasyon hücrelerinde hücreye hava girişi bir boru içindeki palp akışı ile oluşan basınç düşmesine (Venturi etkisi) bağlı olarak gerçekleşen hava emişi ile sağlanmaktadır.

Bu tür flotasyon hücrelerinin ana bileşeni olan “Downcomer” sisteminin genel yapısı Şekil 4’de şematize edilmiştir.



Şekil 4. Pünömatik Flotasyon Hücrelerindeki “Downcomer” Genel Görünüşü

Şekil 3’te genel görünümü verilen “Downcomer” sisteminde besleme palp giriş borusu ve bu borunun çıkış ucundaki nozul sistemi, hava giriş bağlantısının sayısı ve açısı, dış muhafazanın aşağıya ya da yukarıya doğru daralan konik yapısı, “Downcomer” ın hücreye üstten ya da yandan girişi gibi değişiklikler pünömatik hücrelerin genel tasarım değişiklikleri olmuştur. Bunların ortak noktaları bu özel besleme sisteminin hücrenin içine daldırılıyor olmasıdır. Besleme girişi hücre içindeki palp yüzeyinin altına, hücrenin yaklaşık olarak ortasına doğru olmaktadır. “Downcomer” sistemi yıllara göre değişim geçirmiş olup, Şekil 5’te pünömatik flotasyon hücrelerinde kullanılan “Downcomer” ların periyodik gelişimi özetlenmiştir.



Şekil 5. 1989-2000 Yılları Arası “Downcomer” Gelişimi, (Cowburn et al. 2005)

Tasarımdaki önemli değişiklikler, çelik “Downcomer” kullanımı ve özel nozul tasarımı, yüksek yoğunluklu polietilen kullanımını, yoğun işleme görevleri için seramik astar kullanımını ve daha sonra da mevcut Jameson hücrelerinde gözlenen genel düzenleme şeklinde olmuştur. Bu amaçla Jameson hücresindeki merceğinin (Lens) konumu (önceki delik plakası yerine) “Downcomer” daki karıştırma bölgesinde bir artış sağlayacak şekilde, kalma süresini de iyileştirmiştir. Bu sayede 0,6'dan 1,2'ye kadar daha yüksek havalandırma oranlarının elde edildiği belirtilmektedir. Çizgisel hava akış hızlarının (superficial gas velocity, Jg) 1,2 cm/s'ye kadar ulaşabildiği görülmüştür. “Downcomer” ve tank ünitesi kapasitelerinde de önemli artışlar meydana gelmiştir. Hücre çapı 1993'te 3,5 m'den 2000'de 6,5 m'ye çıkmış ve “Downcomer” kapasiteleri 30 m³/h'den 90 m³/h'e yükselmiştir. Fakat, yüksek debili akışlar, komşu “Downcomer” lardan çıkan havalandırılmış palpı etkileyerek aşırı türbülansa neden olmaktadır. Bu türbülansı en aza indirmek için kabarcık dağıtıcısının (difüzörünün) şeklini, yerini ve gözenekliliğini optimize etmek amacıyla araştırmalar yürütülmektedir.

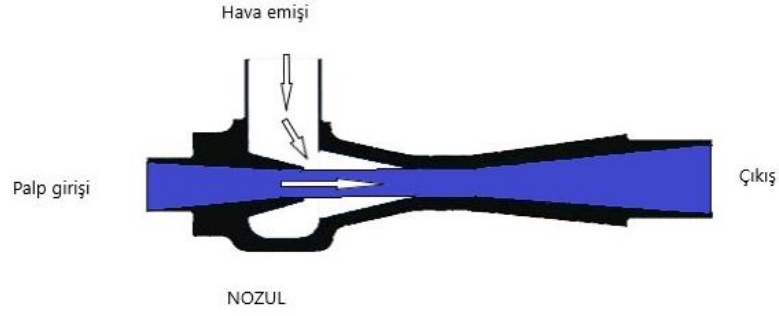
1992 yılında Amelunxen tarafından kontak hücresi olarak tanımlanan bir hücre geliştirilmiştir. Bu hücrede kabarcık tane çarpışması ve yapışması hücrenin dışında bir temas biriminde (contactor) gerçekleşmektedir. Bu birimde bir besleme nozulu palpı kapalı bir borunun içine püskürtmekte, aynı zamanda bu borunun içine hava kabarcığı üreten birimlerden hava, kabarcıklar halinde beslenmektedir. Bu şekilde basınçlı ortamda kabarcık tane çarpışması ve yapışması sağlanmaktadır. Buradan da palp bir flotasyon kolonuna beslenerek köpük ve yüzmeyen fazlar birbirinden ayrılmaktadır (Amelunxen, 1993).

Yukarıda özetlenmeye çalışıldığı üzere pünömatik flotasyon hücrelerinin yeni geliştirilen modellerinin hemen hemen hepsinde “Downcomer” kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında sunulan yeni tasarım, pünömatik hücrede “Downcomer” bulunma zorunluluğunu ortadan kalkmaktadır. Besleme hücreye yukarıdan doğrudan palp yüzeyine ya da köpük tabakasına verilmektedir. Bu sayede hücre yapısı son derece basitleşmiş, köpük yüzeyine doğrudan verilen palp akışı ile de köpüğün bir miktar çalkalanması ve daha da temizlenmesi sağlanmış olmaktadır.

Bütün flotasyon makinalarında olduğu gibi pünömatik flotasyon makinalarında da en önemli özellikleri hava sisteme girişi ve bu havanın mümkün olduğunca ince haca kabarcıkları oluşturmasının sağlanmasıdır.

Başta flotasyon kolonları olmak üzere bazı flotasyon hücrelerinde sisteme hava girişi basınçlı hava kompresöründen sağlanan basınçlı hava akışı ile olmaktadır. İlk geliştirilen pünömatik hücrelerden olan Davcra hücresinde de özel bir besleme nozulu içine basınçlı hava verilmektedir. Basınçlı hava ya gözenekli bir yapıya sahip geçirgen bir malzemedan geçirilerek palp içinde ince kabarcıklar oluşması sağlanmakta ya da özel hava parçalayıcı nozullar sayesinde parçanarak besleme palpı ile karıştırılıp hücre içine verilmektedir. Urizar Cascade Flotation Hücresi (Urizar, 1996), Flotasyon Kolonları, Cyclojet Flotasyon Hücresi (Hacifazlioglu ve Kursun, 2012) havanın hücre içine poroz bir malzemedan geçirilerek verildiği flotasyon hücrelerinin bazı örnekleridir. Hava kabarcığı oluşturmak için kullanılan poroz malzemeler doğrudan palp ile temas ettiklerinden çok sık tıkanma sorunları yaşadığı için bu sistemlerin kullanımı sınırlı kalmıştır. Günümüzdeki modern flotasyon kolonlarında hava kabarcıklarının oluşturulduğu özel püskürtme ve kabarcık oluşturma birimleri (Air Sparger) tasarlanmış ve kullanılmaktadır. Bu sistemlerin optimizasyonu üzerinde de araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmaktadır (Coterio, 2016). Özel kabarcık oluşumu sağlayan birimler içeren sistemlerde özellikle mikrokabarcık oluşturmaya çalışılmakta ve kabarcık yüzey alanı artırılmaktadır. Böylece hem genel verim artışı sağlanmakta hem de daha ince tanelerin kazanılma olasılığı artırılmaya çalışılmaktadır.

Kendiliğinden hava emişi yapan sistemler de ise dışarıdan hava sağlayacak özel bir hava kaynağına gerek yoktur. Flotasyon için gerekli hava sistem tarafından atmosferden emilir. Genel olarak hava emişi için Venturi sistemi kullanılır. Bir borudan akan akışkanın akış hızı borunun daraldığı bölgede (Venturi Bölgesi) artar. Akışkanın hızındaki bu artış bu bölgede ters basınç oluşur. Oluşan bu ters basınç ekstra bir enerji harcamadan daralma bölgesi içerisinde vakumlama etkisi yaratır. Bu noktaya açılan bir bağlantı borusu veya delikten de bir başka sıvı ya da gaz (hava) emişi sağlanır (Şekil 6).



Şekil 6. Venturi Sistemi ile Hava Emişi

Pünömatik flotasyon hücrelerinde besleme palpı bu tür bir venturi sistemine basınçla beslenerek yüksek hızlı bir sıvı akışı sağlanmış olur. Diğer bir ifade ile Ventüri sistemi içindeki akış hızını ve basınç düşmesini besleme palp akışı sağlar. Daralma bölgesinde palpın akış hızı arttığından palpın bu hızlanan palp akışı da gerekli havayı emiş bölgesinde atmosferden emer. Emilen hava bazen bu venturi sistemi içinde ya da venturinin dışına çıktığı noktada özel bir boru sistemi içinde yüksek hız ve türbülans etkisiyle oluşan kavitasyonla ince hava kabarcıkları halinde parçalanır. Burada palp içindeki katı taneleri ile hava karıcıkları çok yüksek hızda karşılaşma ve çarpışma imkanı bulur. Kabarcık ve palpın bu etkileşimi de görece hızlı bir yapışma ve flotasyon sağlar. Ventüri ve besleme boru sisteminde çeşitli değişikliker yapılarak farklı tipteki pünömatik flotasyon hücreleri tasarlanmıştır. Hibrit flotasyon hücrelerinde ise yine diğer pünömatik hücrelerdekine benzer bir şekilde venturi etkisinden yararlanan bir downcomer bulunmaktadır. Buna ilave olarak hücre tabanındaki porozlu yapıdan basınçlı hava ile sistem kabarcıklar şeklinde ilave hava girişi de sağlanmaktadır.

Pünömatik hücrelerde besleme öncelikle dışarıda bir koşullandırıcı içinde koşullandırılmaktadır. Temizleme aşamalarında kullanılırsa özel olarak kimyasallarla yeniden koşullandırma gerekmekeylemektedir. Uygun kmyasallarla koşullandırılmış palp hücre içine girdiğinde kabarcıklara yapışmış taneler hızla köpük fazına yükselir. Kabarcıklara yapışmamış taneler ise genellikle hücre tabanına çökmektedir. Tabana çöken taneler buradaki özel çıkışlardan hücreyi terk eder. Hücre tabanında birikme olmaması amacıyla hücrelerin alt kısımları çökelen tanelerin çıkışa doğru yönelmesini sağlayacak şekilde konik bir yapıya sahiptir. Hücrelerde alt çıkışı genellikle hız kontrolü olan bir santrifüj pompaya bağlıdır. Buraya gelen kabarcıklara yapışmamış taneler ya sonraki hücreye pompalanır ya da önceki aşamalara döndürülür. Eğer bu akış yeterince temizlenmiş ise bu durumda doğrudan atık akışı da olabilir. Bazı uygulamalarda bu alt çıkış akışından belirli bir miktar bölünerek hücreye geri dönüş sağlanır. Bu geri dönüşün palpa hem karışma etkisi sağladığı hem de kaçakları azalttığı yönünde açıklamalar bulunmaktadır. Palp sirkülasyon özelliği günümüzdeki modern flotasyon makinalarının kaçınılmaz bir özelliği haline gelmiştir.

Avantajları

Pünömatik flotasyon hücreleri mekanik flotasyon hücreleri ile karşılaştırıldığında önemli avantajlara sahip oldukları görülmektedir.

1. Hareketli bir karıştırma mekanizması yoktur.
2. Dışarıdan hava beslemesi yapan hava kaynağı ihtiyacı yoktur.
3. Mevcut devrelere çok kolay adapte edilebilir.
4. Özellikle temizleme devreleri başta olmak üzere her kademedede kullanılabilir.
5. Daha temiz konsantre üretir.
6. Yüksek flotasyon kinetiğine sahip ekipmanlardır.
7. Daha küçük alan kaplar.

8. Birim kapasiteleri yüksektir.
9. Farklı akış hızlarında çalışabilir.
10. Enerji sarfiyatı son derece düşüktür.
11. Ucuzdur.

Bu özellikleri nedeniyle günümüzde kullanımı hızla artmaya başlamış ve bu doğrultudaki endüstriyel talep de bu alanda yeni araştırmalar yapılmasını hızlandırmıştır.

Yeni Bir Pünömatik Flotasyon Hücresi

Yüksek bir noktadan dökülürken çağlayarak akan sular beyaz köpükler oluşturur. Bunun nedeni akıştan kaynaklanan yoğun türbülans ile hava su ara yüzeyinde havanın suyun içine girmesi, şiddetli çalkantının oluşturduğu girdapların ara yüzeyden bir miktar havayı sürükleyerek suyun içine taşınması ve bu sırada da parçalanarak hava kabarcıkları oluşturmasıdır. Diğer bir ifade ile akan suyun türbülansı su içine onu çevreleyen havadan bir miktar hava taşınmasına neden olmaktadır. Buna hava sürüklenmesi (air entrainment) veya hava yakalanması (air entrapment) denilmektedir. Doğada kendiliğinden oluşan bu durum sıvı ile dolu bir kabın içine belirli bir yükseklikten akıtılan veya dökülen su ile de gerçekleşmektedir. Akan suyun kabın içinde dolu suya girdiği noktada etrafını saran hava bu akışla suyun içine doğru çekilir ve parçalanır. Yeni geliştirilen flotasyon hücrelerinde de bu doğal olay temel alınmıştır. Downcomer kullanan bazı pünömatik flotasyon hücreleri tasarımlarında da Downcomer'ın içinde bu şekilde bir hava sürüklenmesi (air entrainment) gerçekleşmekte ve tane kabarcık yapışması çoğunlukla Downcomer içinde oluşmaktadır. Yeni geliştirilen flotasyon hücrelerinde ise herhangi bir Downcomer kullanımına gerek olmadan palp akışı doğrudan hücrenin üstünden palp yüzeyine doğru gerçekleşmektedir. Bu akış miktarı ve akış hızına bağlı olarak farklı oranlarda havayı yüzeyden kopartarak hücre içine taşımaktadır. Dolayısı ile kabarcık tane yapışması da hücre içinde gerçekleşmektedir.

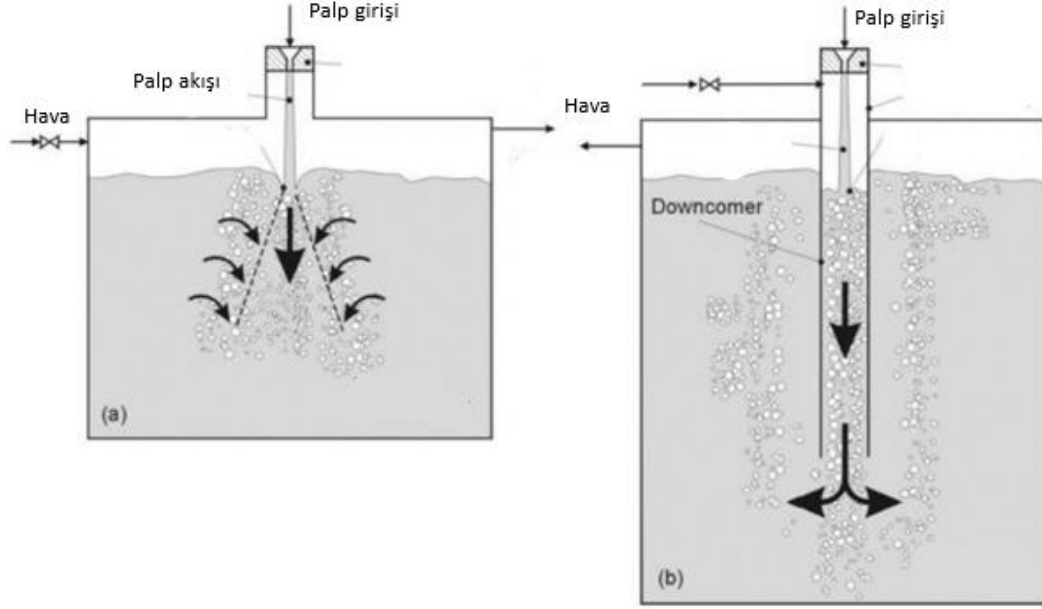
Su dolu bir kabın içine yüksek hızla akıtılan sıvının oluşturduğu kabarcık sistemi Şekil 7'da görülmektedir.



Şekil 7. Hava Sürüklenmesi (Air Entrainment) ve Kabarcık Oluşumu

Bu şekilde suyun içine hava girişi ve bunun parçalanarak hava kabarcıkları oluşturmasına yönelik literatürde çalışmalar mevcuttur (Davoust vd 2002). Özellikle akış debisindeki artışın su içine sürüklenen hava miktarını artırdığı bilinmektedir. Bu durumda da ne kadar çok besleme yapılırsa havalanmanın o oranda fazla olacağı hususu ortaya çıkmaktadır. Palpın hücre içine girişi doğrudan açık yüzeyden olabileceği (Şekil 8a) gibi kapalı bir boru vasıtası (Şekil 8b) ile de olabilir. Şekil 8b'de verilen sistem günümüzdeki birçok modern pünömatik flotasyon hücrelerinin yapısını oluşturmaktadır. Hava kabarcıklarının daha etkin dağılımını sağlamak, boru içindeki palp akışı ve seviyesinin kontrolü, buna bağlı hava akış hızlarının kontrolü gibi sorunlar nedeniyle

borulu sistemlerin işletme sorunları ortaya çıkmaktadır. Doğrudan besleme yapılan sistemde ise hava açık atmosferden çoğunlukla entrainment (yakalanıp sürüklenme) ile palp içine girdiğinden hava akış hızı kontrolü gereksinimi ortadan kalkmaktadır.



Şekil 8. Doğrudan Palp Beslemesi Yapılana Sistem (a) ve Bir Boru Vasıtası ile Palp Beslemesi Yapılan Sistem

Geliştirilen pünomatik flotasyon hücresinde besleme borusu “Downcomer” kaldırılarak ve hücre içine doğrudan besleme yapılan bu prensipten yararlanılmaktadır. Downcomer kullanılan hücrelerde palp girişi birden çok besleme borusu ile sağlanabilmektedir. Downcomer’ın kaldırıldığı sistemde de birden çok boru ile hücreye doğrudan besleme yapılabilir. Hücre içinde özel olarak tasarlanmış bir sirkülasyon sistemi yer almaktadır. Bu sayede hücre içindeki palpın belirli oranlarda hücre içinde sirkülasyonu sağlanmaktadır.

Hücreye köpük seviyesinin belirli bir mesafe yukarısından (ayarlanabilir yükseklik) özel tasarlanmış bir veya birden fazla nozul ile palp girişi mümkün olmaktadır. Yukarıdan şiddetle hücre içine akan palp hücre içine beraberinde hava sürüklemekte ve hava palp arayüzüne yakın bölgelerde oluşan kavitasyon ve türbülans etkileri ile sürüklenen hava küçük kabarcıklara bölünmektedir. Sistemde köpürtücü kullanılması durumunda hava kabarcıklarının ortalama boyu $100 \mu\text{m}$ ’nin altına inmektedir. Sadece su ve köpürtücü kullanılması durumunda hücre içinde oluşan kabarcık bulutu görünümü oluşmakta ve besleme kesilse de hava kabarcıklarının hücreden çıkması dakikalar alabilmektedir. Bulutumsu hava kabarcığı oluşumu Şekil 9’da verilmektedir.



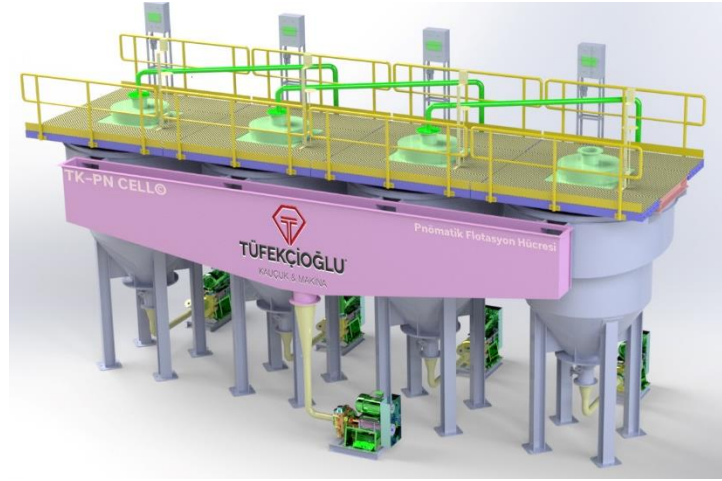
Şekil 9. TK-PN ell, Pünomatik Flotasyon Hücresi İçindeki Kabarcık Dağılımı

Şekil 9’da fotoğrafı çekilmiş olan hücre içi kabarcık dağılımı incelendiğinde maksimum kabarcık boyunun 100 μm ve daha altında olduğu anlaşılmaktadır. Köpürtücü eklenmeden de oldukça küçük kabarcıklar oluşumu söz konusu olmakla birlikte köpürtücü eklenmesi sonucunda kabarcık boyunun çok daha incelendiği belirlenmiştir. Oluşan ortalama kabarcık boyutu 100 μm ’un çok altında olduğundan optik fotoğraflama yöntemi ile kabarcık boyut dağılımı belirlenmesi mümkün olmamıştır. Hücre içinde köpürtücü ilavesi olmayan durumda J_g (superficial gas velocity) değerleri ölçülmüş ve bu değer 1,13- 2,72 cm/sn arasında bir mekanik hücreye kıyasla oldukça yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Ortalama kabarcık tane boyunun küçülmesi ve J_g değerinin de artması flotasyon kinetiğindeki önemli parametrelerden birisi olan S_b (bubble surface are flux) değerinin yükselmesine ve flotasyonun kinetiğinin yükselmesine bir kanıt olarak görünmektedir. Besleme nozul çıkış hızı 10 m/s değerlerine kadar artırılabilir. Bu durumda birim hücrenin kapasitesi 2500 m^3/h değerine kadar ulaşabilmektedir.

Sonuç ve Genel Değerlendirme (TK-PN Cell, Pnömatik Flotasyon Hücresi)

Geliştirilmiş olan pnömatik flotasyon hücreleri üzerinde yapılan incelemeler sonucunda temelde hava sürüklenmesine bağlı olarak flotasyon hücresine hava girişi sağlanan bir flotasyon hücresi tasarlanmıştır.

Bu tasarıma bağlı olarak Tüfekçioğlu Kauçuk ve Makina A.Ş. tarafından üretilmiş olan pnömatik flotasyon hücresinin genel görünümü dörtlü bir bank olarak Şekil 8’de verilmektedir (TK-PN Cell, Pnömatik Flotasyon Hücresi.)



Şekil 10. Tüfekçioğlu Pnömatik Flotasyon Hücresi (TK-PN Cell)

Besleme sistemi hücrenin büyüklüğüne bağlı olarak bir veya daha çok nozuldaki oluşabilmektedir. Flotasyon devresine besleme kondüsyoner çıkışındaki bir pompa ile yapılır. Eğer temizleme devresinde kullanılacak ise konsantr taşıyan köpük pompaları da sisteme besleme yapabilir. Hücrelere beslemenin 1 bar seviyesinde basınçla yapılması öngörülmektedir. Daha düşük ve yüksek basınçlarda da sistem çalışabilmektedir. Bu durumda köpük oluşumu ve aşırı çalkalanmalara dikkat edilmelidir. Palp seviyesi hücre içine yerleştirilmiş olan bir seviye kontrol sistemi ile kontrol edilir. Hücre içindeki palp seviyesini kontrol altında tutabilmek amacıyla, özel bir yazılım gerektiren kontrol sistemi ile her bir hücrede atık çıkışı sıkı bir şekilde kontrol altında tutulmaktadır. Her hücrenin alt akım atık çıkışı bir pompa ile sonraki hücreye beslenir. Nihai atık istenilen değerlerde olduğunda yine bir pompa ile sistemde uzaklaştırılır. Köpük akışları köpük olukları vasıtasıyla sistemden uzaklaştırılır.

Hücrenin laboratuvar ölçeklisi de tasarlanmış olup, laboratuvar ölçekli test yapılması mümkündür. Yine firma tarafından endüstriyel testlere imkan verebilecek bir prototip de üretilmiştir. Bu prototip üzerinde yapılan testlerden son derece başarılı sonuçlar alınmıştır.

İlk üretim aşaması tamamlanmış ve üretilen 4 hücreli bir birim endüstriyel testlere başlamıştır. İlk sonuçlara bağlı atık akışlarından dahi yüksek verimle kazanım olabileceği belirlenmiştir.

Geliştirilen bu yeni flotasyon hücresi yukarıda sıralanmış olan tüm avantajlara sahiptir.

KAYNAKLAR

- Amelunxen, R.L. (1993), The contact cell—A future generation of flotation machines. Eng. Min. J. 194:36–37.
- Bahr, A. 1971. The mineralization of gas bubbles during the flotation process (Zur Mineralisation der Gasblasen beim Flotationsprozess). Habilitation thesis, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Hoang D.H., Imhof R., Sambrook T., Bakulin A. E., Murzabekov K. M., Abubakirov B. A., Baygunakova R. K., Rudolph M., (2022), Recovery of fine gold loss to tailings using advanced reactor pneumatic flotation Imhoflot™, Minerals Engineering, Volume 184, 30 June 2022, 107649
- Kupka N., Tunç B., Suhonen J., Rinne A. (2024), Fine and ultrafine flotation with the Concorde Cell™ – A journey Alejandro Ya´nez, Minerals Engineering, Volume 206, January 2024, 108538
- Guner M. K., Hassanzadeh A., Vinnett L., Yianatos J., Kowalczyk P. B. (2023), Effects of operating parameters on residence time distribution in a REFLUX flotation cell , Minerals Engineering, Volume 204, December 2023, 108439
- Hacifazlıoğlu, H., Toroğlu, İ., (2008) Sklojet Hücresinde Bitümlü Şlam Kömürün Flotasyonu ve Jameson Hücres ile Flotasyon Performanslarının Karşılaştırılması, (Flotation of Bituminous Coal Slimes in the Cyclojet Cell and a Comparison of Cyclojet Cell and Jameson Cell in Terms of Their Flotation Performance), Madencilik, Cilt 47, Sayı 1, Sayfa 3-12, Mart 2008 Vol.47, No.1, pp 3-12,
- Hacifazlıoğlu, H., Toroğlu, İ., (2009), İnce boyutlu kömürlerin flotasyonu için yeni bir flotasyon makinesinin (siklojet hücresinin) geliştirilmesi / Development of a new flotation machine (cyclojet cell) for flotation of fine coals, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Hacifazlıoğlu, H., and Kursun, I. 2012. Beneficiation of lowgrade feldspar ore using Cyclojet flotation cell, conventional cell and magnetic separator. Physicochem. Probl. Miner. Process. 48(2):381–392
- Harbort, G. (2021), Pneumatic Flotation Cells, SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook, Chapter 5.4, pp561-588
- Urizar, D. 1996. Procedure and apparatus for materials separation by pneumatic flotation. U.S. Patent 5,544
- Coterio V. R., (2016), Optimization Of Air-Injection Spargers For Column Flotation Applications, Thesis, Master of Science, Blacksburg, Virginia
- Davis, W.J.N. 1964. The development of a mathematical model of the lead flotation circuit at the Zinc Corporation Ltd. Proc. Australas. Inst. Min. Metall. 212(December):61–90.
- Davis, W.J.N. 1966. The development of a mathematical model of the lead flotation circuit at the Zinc Corporation Ltd.—Discussion and contributions. Proc. Australas. Inst. Min. Metall. 220(December):79–85.
- Davoust L., Achard J.L., El Hammoumi M. (2002), Air entrainment by a plunging jet: the dynamical roughness concept and its estimation by a light absorption technique, International Journal of Multiphase Flow, Volume 28, Issue 9, September 2002, Pages 1541-1564
- Hassanzadeh A., Safari M., Hoang D.H., Khoshdast H., Albijanic B., Kowalczyk P. B. (2022), Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems, Minerals Engineering, 180 (2022) 107509, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107509>
- Güney, A., Burat, F., Kayaduman, M., and Kangal, O. 2016. Demineralization of asphaltite using free jet flotation. Asia-Pac. J. Chem. Eng. 12(1):42–49. doi:10.1002/apj.2052.

TÜNELCİLİĞİN VE TÜNEL AÇMA MAKİNALARININ (TBM) DÜNÜ BUGÜNÜ VE YARINI THE PAST, PRESENT AND FUTURE OF TUNNELLING AND TUNNEL BORING MACHINES (TBM)

R. Altındağ

*Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ISPARTA
(rasitaltindag@sdu.edu.tr)*

ÖZ

İnsanoğlu yaşamı boyunca bir yerden bir yere ulaşımı en kısa sürede gerçekleştirmenin mücadelesini vermektedir. Bu ulaşım ister karada, ister denizde isterse havada olsun hep daha kısa sürede, daha güvenli, daha konforlu ve daha ekonomik ulaşımın arayışındadır. Karasal alanlarda amaca uygun olarak zorlu topoğrafik ve zemin koşullarında tünel açma işlemini teknolojik gelişime bağlı olarak Tünel Açma Makinaları (TBM) kullanarak gerçekleştirmektedir. Bu çalışmada, tünelciliğin ve TBM'lerin gelişim süreçleri, pazar dağılımı ve gelecek açısından beklentiler irdelenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Tünelcilik, tünel açma makinaları, metro

ABSTRACT

Throughout humankind's lives, they strive to reach one place from another in the shortest possible time. Whether this transportation is by land, sea, or air, they are constantly searching for faster, safer, more comfortable, and more economical means of transportation. Tunnel boring operations are carried out in terrestrial areas, in challenging topographic and ground conditions, using Tunnel Boring Machines (TBMs) based on technological advancements. This study examines the development processes, market distribution, and future prospects of tunneling and TBMs.

Keywords: Tunnelling, tunnel boring machines, metro

GİRİŞ

Tünel açma işlemleri tarihsel süreçte büyük gelişmeler sergilemiştir. Barutun icat edilmesine kadar insan gücüne dayalı çeşitli aletler yardımıyla kaya ya da yumuşak zeminlerde tünel kazı işlemleri gerçekleştirilmekteydi. Barutun icadıyla kayaların parçalanmasında kullanılma başlanması sonucu daha verimli kazılar gerçekleştirilmiştir.

Sanayi devriminin başlamasından sonra 19. Yüzyılın ortalarında buhar makinalarının icadı ve yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte her alanda olduğu gibi kayaç kazımında da insan gücü yerine buharlı makinalar kullanılmaya başlamıştır. Sonraki yıllarda, sanayi devriminin ilerlemesiyle birlikte, buhar gücü endüstriyel üretimde giderek daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve bu da kazı makinelerinin gelişimini teşvik etmiştir. Bu ilk makineler verimsiz olmalarına rağmen, mekanize kazının temelini atmıştır.

20. Yüzyıla girerken, elektriğin kullanımı tüm endüstriyel alanda olduğu gibi kazı makinelerinin geliştirilmesine de bir ivme kazandırmıştır. Elektrikli tünel açma makinelerinin ortaya çıkmasıyla kazı çalışmalarının verimliliği önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

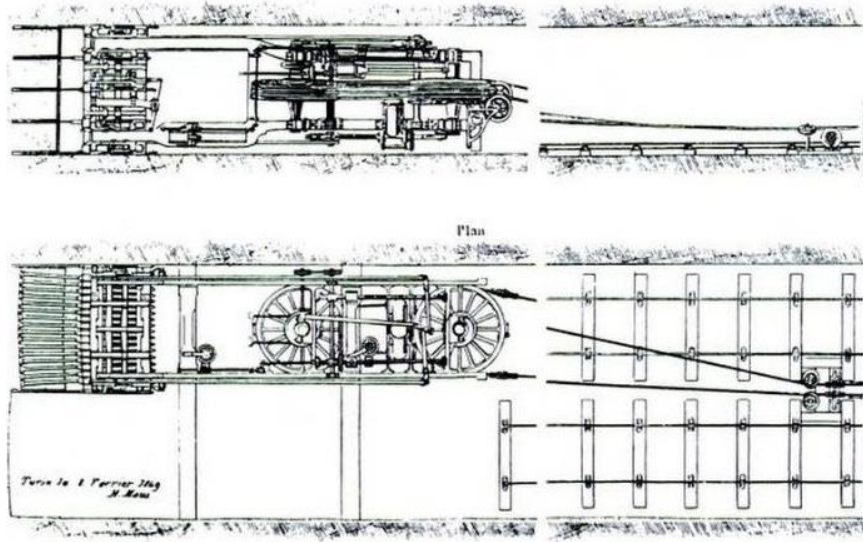
1914'te Amerikalı mucit Herbert Hoover, tünel inşaatının hızını ve güvenliğini büyük ölçüde artırmak için elektrikli kalkan makinelerini kullanan yeni bir tünel kazı yöntemi-tünel kalkanı yöntemi önermiştir. II. Dünya Savaşı'ndan sonra, küresel altyapı inşaatının hızlanmasıyla birlikte, tünel açma makinelerine olan talep de artmıştı. Bu dönemde, kalkan tipi makineleri ve sert kaya tünel açma makineleri gibi daha profesyonel ve verimli tünel açma makineleri ortaya çıkmıştır. 1957'de Almanya, ilk kez uzun mesafeli bir tünelin inşasını tamamlamak için başarılı bir şekilde bir kalkan tipi TBM kullanılmıştır.

İlk zemin basıncı dengeleyen tünel açma makinası (EPBM) 1974 yılında kullanılmış ve bugün EPBM'ler yumuşak zeminli tünel açma için en yaygın kullanılan tünel açma makinalarıdır. Yumuşak zeminli tünelcilikteki bir diğer önemli gelişme, ilk olarak İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra Avrupa'da yaygın olarak kullanılan ve 1970'ler ve 80'lerde ABD'ye yayılan prekast beton tünel kaplamalarıdır.

Geçmişten günümüze kadarki süreçte tüneller karayolu, demiryolu metro gibi ulaşım amaçlı açılabilirdiği gibi, hidroelektrik santralli tünelleri, atık su ve su taşıma tünelleri, petrol ve doğal gaz taşıma amaçlı açılan tüneller, çeşitli askeri ve sivil amaçlı yeraltı depolarının oluşturulması gibi birçok amaçlı tüneller açılmaktadır. Gelecekte de nüfusun artışına ve yaşam alanlarının genişlemesine bağlı olarak yeraltında yeni modern yaşam alanlarının oluşturulması için tüneller ve yeraltı açıklıkları açılacaktır.

TÜNEL AÇMA MAKİNELERİNİN TARİHSEL SÜRECİ

Kayada tünel açmak, toprakta tünel açmaktan daha zordur. Kaya tünelciliği, ilk olarak 1850'lerde geliştirilen delme ve patlatma kazısı şeklinde başarılı bir teknolojiye sahipti. Delme ve patlatma teknolojisi geliştikçe (nitrogliserin patlayıcılarından dinamitlere ve el matkaplarından basınçlı hava matkaplarına) mekanik kaya tünel açma makineleri geliştirmek için nispeten daha az teşvik verilmekteydi.



Şekil 1. Maus'un kaya tünel açma makinesi (Potter, 2023)

Bir kaya tünel açma makinesindeki ilk girişim 1845'te Henri-Joseph Maus tarafından yapılmıştır. Maus'un makinesi, tünelin dışındaki bir su türbinine bağlı bir dizi kabloyla tahrik edilen, birkaç sıra halinde düzenlenmiş 118 keskinden oluşan makinada keskinler kayaya dakikada 150 darbe verirken, su jetleri döküntüleri temizler ve keskinleri soğuturdu. Maus'un makinesinin bir prototipi 1847'de yapıldı ve Maus'un günde 5,48 m ile 7,31 m hızla kazabileceğini tahmin ettiği makine (Şekil 1) hiç kullanılmamıştır.

Bir kaya tüneli açma makinesine yönelik bir başka girişim, 1851'de Hoosac tüneli için Charles Wilson tarafından yapılmıştır. Wilson'ın makinesi, buharla çalışan 7,31 m'lik dönen bir silindirden oluşuyordu ve üzerine bir dizi haddeme kesici monte edilmişti. Makine, tünelin dışında bir oluk ve ortada 2 metrelik bir daire açacak şekilde tasarlanmıştır. İç ve dış oluklar kesildikten sonra, aradaki kaya delme ve patlatma yoluyla çıkarılabilirdi. Wilson'ın makinesi inşa edildi, ancak terk edilmeden ve hurdaya satılmadan önce yalnızca 3,48 m'lik kazmayı başarmış ve Hoosac tüneli nihayetinde delme ve patlatma yöntemiyle kazılmıştır.

Bu başarısız denemelerden sonra 1950'lere kadar faaliyete geçmeyen bazı çalışmalar yapılmış olsa da ticari ve teknik bir TBM üretilememiştir. İlk başarılı kaya tüneli açma makinesi, 1954 yılında Güney Dakota'daki Oahe Barajı projesi için James Robbins tarafından inşa edilmiştir. Robbins'in makinesindeki en önemli yenilik disk keskinin kullanılmasıydı. Daha önce, kaya tüneli açma makinelerindeki çoğu girişim, kayayı sürüklenerek kesen keskin çelik aletlerle olan sürüklenme kazmaları kullanıyordu. Öte yandan disk kesici, kayanın yüzüne bastırılarak, delme makinesinin kafası döndükçe yüzeyi üzerinde serbestçe yuvarlanarak ve altındaki dar bir kaya kanalını ezerek çalışmaktadır. Robbins'in yeniden tasarlanan makinesi, Oahe projesinde haftada yaklaşık 200 metre, delme ve patlatmadan beş kat daha hızlı kazı hızlarına ulaşmayı başarmıştır. İlk TBM'lerdeki kesiciler 11 inç çapındaydı, ancak 1980'lerin sonlarında, özel olarak tasarlanmış bir takım çeliğinden yapılmış 19 inç çapındaki disk kesiciler geliştirildi. Disk keskinin tarihsel gelişimi de Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Disk keskinin çaplarının tarihsel olarak kullanımı (Potter, 2023)

Çap (inch)	Yük (kN)	Kullanım Yılı
11	85	1961
12	125	1969
13	145	1980
14	165	1976
15,5	200	1973
16,25	200	1987
17	215	19883
19	312	1989
20	312	2006

Bilgi teknolojisi ve otomasyon teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte tüneli açma makineleri, 20. yüzyılın sonlarında otomasyon ve yapay zeka yönünde gelişmeye başladı. Modern tüneli açma makineleri yalnızca yüksek derecede otomasyona sahip olmakla kalmadı, aynı zamanda çalışma durumunu gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve hataları tahmin edebilir duruma geldi ve bu durum da kazı verimliliğini arttırmıştır.

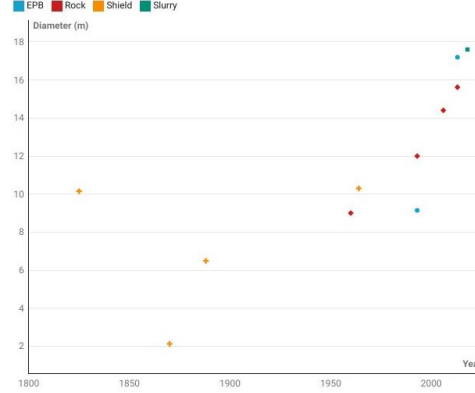
2000'li yıllarda, Avrupa ve Kuzey Amerika'daki bazı tüneli projelerinde insansız kalkan makineleri kullanılmış ve bu da tüneli açma makinesi teknolojisinin yeni bir aşamaya girdiğine işaret etmektedir.

21. yüzyıla girerken, çevre koruma ve sürdürülebilir kalkınmaya artan küresel ilgiyle birlikte, yeşil binalar ve yeşil inşaat sektöründe yeni trendler haline geldi. Bu nedenle, modern tüneli açma makinesi tasarımları, elektrikli sürücülerin kullanımı ve optimize edilmiş enerji yönetimi gibi enerji tasarrufu, emisyon azaltma ve çevre korumaya daha fazla önem verilir hale gelindi.

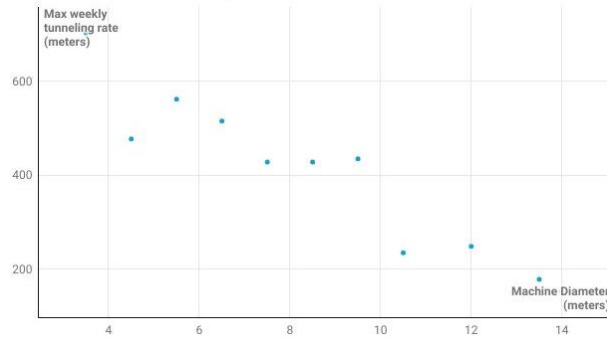
Aynı zamanda, karmaşık ve değişen jeolojik koşullara uyum sağlamak ve inşaat verimliliğini artırmak için modern TBM'ler, gerçek zamanlı olarak yeraltı bilgilerini elde edebilen ve inşaat sürecine rehberlik edebilen gelişmiş jeolojik algılama ve navigasyon sistemleri ile de donatılmıştır.

Yapay zeka ve Nesnelerin İnterneti (Internet of Things) gibi teknolojilerin sürekli gelişmesiyle birlikte, geleceğin tüneli açma makinelerinin daha yüksek düzeyde zeka ve özerklik elde etmesi bekleniyor.

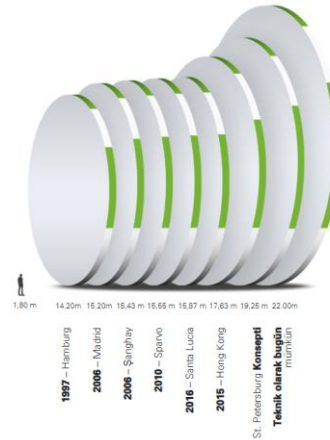
TBM'ler kayada delme ve patlatma (D&B) yöntemlerine alternatif olarak kullanılır. Tünel açma makinesi, çeşitli toprak ve kaya yapılarında dairesel tüneller açan bir makinedir. Tünel çapı 0,6 metreden (mikro TBM'ler) yaklaşık 16 metreye kadar değişir. Sert kayadan kuma kadar her türlü malzemeyi delmek için tasarlanmaktadır. Günümüzde dairesel kesitli tünel açımının yanı sıra kare ve dikdörtgen kesitli tünel açan TBM'ler tasarlanmış ve kullanılmaktadır. Ancak bu tip makineler dairesel kesitli TBM'ler kadar yaygın bir kullanıma sahip değildir.



Şekil 2. Tarihsel süreçte TBM çaplarının gelişimi (Potter, 2023)



Şekil 3. TBM çaplarına bağlı haftalık kazı hızları (Potter, 2023)



Şekil 4. Son yıllardaki bazı TBM çapları (Herrenknecht)

19. Yüzyıldan günümüze kadar süreçte TBM'lerin kazı çaplarının gelişim trendi Şekil 2'de verilmiştir. TBM çapları arttıkça maksimum haftalık kazı hızlarının da azaldığı Şekil 3'ten görülmektedir. Bugün 17,65 m çaplı TBM'ler çeşitli projelerde kullanılır duruma gelmiş olup 22 m çaplı TBM'lerin üretim ve kullanımı da teknik olarak mümkün görülmektedir (Şekil 4).

Dünyada TBM üreten başlıca şirketler;

- Kawasaki Ağır Sanayi Ltd.
- Herrenknecht AG
- Robbins Şirketi
- TERRATEC Ltd.
- Japonya Tünel Sistemleri Şirketi
- Mitsubishi Ağır Sanayi Ltd.
- Komatsu Ltd.
- SN Mercantile India Pvt. Ltd.
- Yüksek Hızlı İki Ltd.
- Amberg Mühendislik
- Mammoet
- Hitachi Zosen Sakai İşleri
- Çin Demiryolu Tünel Grubu
- Sika AG

olarak sayılabilir.

CREC, dünyanın en büyük TBM üreticisi olup, değer olarak %22,69 pazar payına sahiptir. Herrenknecht, dünyanın en büyük ikinci TBM üreticisi olup, değer bazında %16,28 pazar payına sahiptir. CRCHI, dünyanın üçüncü büyük TBM üreticisi olup, %15,85'lik bir pazar payına sahiptir. LNSS China, dünyanın dördüncü büyük TBM üreticisi olup, %8,89'luk bir pazar payına sahiptir (Anonim 1).

TBM'ler ürün türüne göre çeşitliliği;

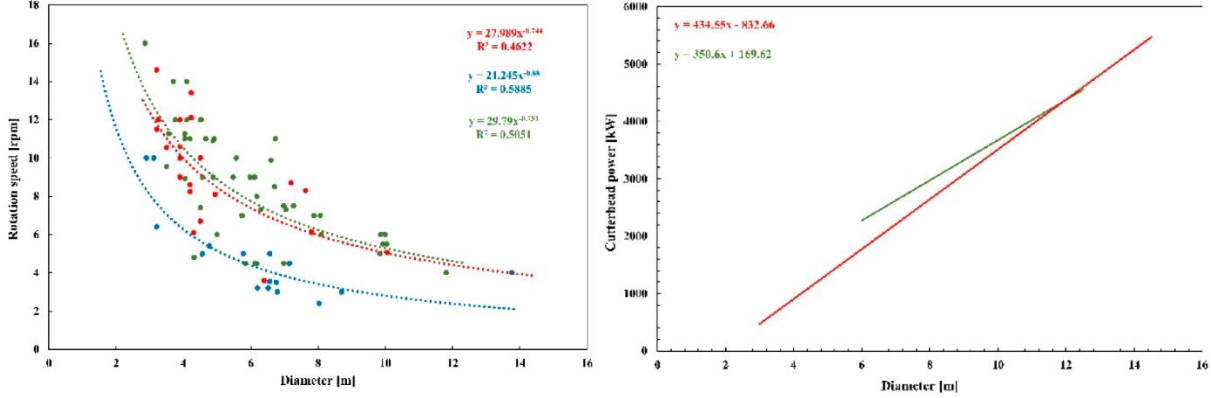
- Sert Kaya TBM
 - Kalkanlı TBM
 - Açık Tip TBM
- Yumuşak Zemin TBM
 - Bulamaç Kalkanı TBM
 - Toprak Basıncılı TBM
 - Açık Yüzlü TBM
 - Diğerleri
- Heterojen Zemin TBM'i

olarak gruplandırılabilirler.

Tünel Açma Makinaları madencilikte, karayolu ve demiryolu tünellerinde, metro tünellerinin açılmasında, atık su ve su taşıma tünellerinin açılması, petrol ve doğal gaz boru hatlarının taşınması amaçlı açılan tüneller gibi birçok alanda, kazılacak zeminin özelliklerine bağlı olarak uygun tipte seçilmektedirler.

Petrol ve gaz endüstrisi, TBM'ler için bir diğer hayati son kullanım alanını temsil ediyor. Petrol ve gaz boru hatları için tüneller inşa etmek ve hidrokarbon ürünlerinin çıkarma sahalarından işleme tesislerine ve dağıtım noktalarına verimli bir şekilde taşınmasını sağlamak için tünel açımında TBM'ler kullanılmaktadır.

Cardu vd. (2021) yaptığı çalışmaya göre tünel açımında kullanılan TBM’lerin teknolojik gelişimine göre tünel çapı ile TBM’lerin kesi kafalarının dakikadaki dönüş hızları ve kesici kafa güçleri arasındaki ilişkiler Şekil 5’de verilmiştir.

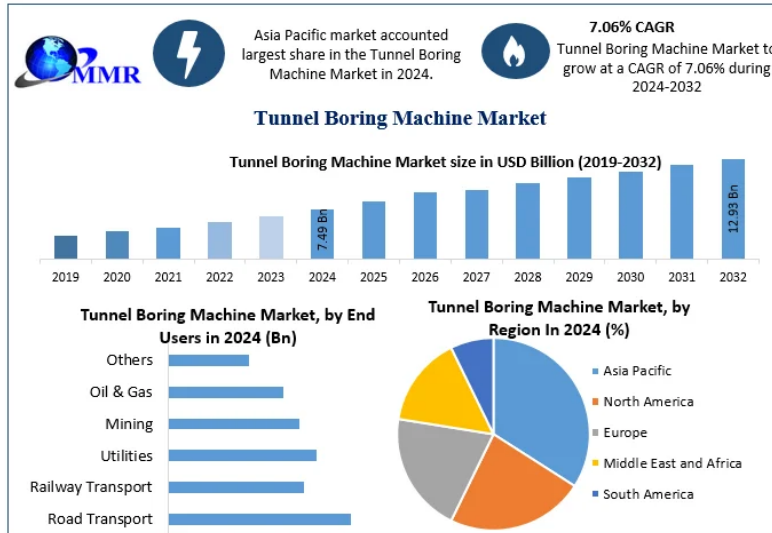


Şekil 5. TBM çapı ile dönüş hızı ve kesici kafa motor gücü arasındaki ilişki

TÜNEL AÇMA MAKİNESİ PAZARINA GENEL BAKIŞ

Küresel ölçekte dünya TBM pazarı, 2016 yılında 4.1, 2020 yılında 5.2, 2024 yılında 7,5 milyar ABD doları değerindeyken 2032 yılında 12,93 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Tünel Açma Makinesi pazarı büyüklüğünün 8 yıllık bu dönemde %7,06’lık bir bileşik yıllık büyüme oranıyla büyümesi beklenmektedir (Anonim 2).

Şekil 6 incelendiğinde TBM pazar payının Asya Pasifik bölgesinin (Çin, Güney Kore, Japonya, Hindistan, Avustralya, Endonezya, Malezya, Vietnam, Tayvan, Bangladeş, Pakistan ve Asya-Pasifik’in geri kalanı) birinci sırada, Kuzey Amerika’nın (ABD, Kanada ve Meksika) ikinci, Avrupa’nın (İngiltere, Fransa, Almanya, İtalya, İspanya, İsveç, Avusturya ve Avrupa’nın geri kalanı) üçüncü, Orta Doğu ve Afrika’nın (Güney Afrika, Körfez İşbirliği Konseyi, Mısır, Nijerya ve Orta Doğu ve Afrika’nın geri kalanı) dördüncü ve Güney Amerika’nın (Brezilya, Arjantin, Güney Amerika’nın geri kalanı) beşinci sırada olduğu görülmektedir.

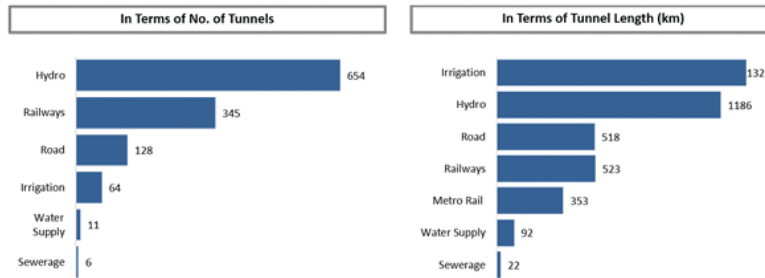


Şekil 6. Küresel TBM Pazar payının değişimi (Anonim 2)

Asya Pasifik bölgesinin önümüzdeki 10 yıllık süreçte en hızlı bileşik yıllık büyüme oranıyla (CAGR) büyümesi bekleniyor. Bu bölgedeki hızlı kentleşme ve verimli ulaşım ağlarına duyulan ihtiyaç, TBM pazarını ileriye taşımaktadır. Özellikle Çin, yüksek hızlı demiryolu ağları ve metro sistemleri de dahil olmak üzere büyük ölçekli altyapı projelerine önemli yatırımlar yaparak tünel inşaatında bir güç merkezi konumundadır.

Hindistan gibi gelişmekte olan ekonomiler de artan kentsel ulaşım ihtiyaçlarını karşılamak için TBM'lerinin kullanımını benimsemektedir. Ayrıca, Güneydoğu Asya ülkelerinde akıllı şehirlerin gelişimi ve genişleyen yeraltı şebekeleriyle birlikte tünel projelerinde bir artış yaşanmakta/yaşanacak olup bu trendin daha da artacağı öngörülmektedir.

Dünyanın şu anda en kalabalık ülkesi Hindistan olup IMF'nin Temmuz (2025) ayında yayınladığı Dünya Ekonomik Görünümü güncellemesine göre, 2023 yılında iç yatırımların Hindistan'ın GSYİH büyümesini % 6,1'e çıkarması bekleniyor. Şekil 7'de Hindistan'ın 2022 yılı itibarıyla açılan, yapımı devam eden ve ihale aşamasındaki tünellerin amaçlarına göre dağılım sayıları ve uzunluk toplamaları verilmiştir. En çok tünel 654 adetle hidroelektrik amaçlı açılmış iken sulama amaçlı açılan tünellerin toplam uzunluğu 1321 km ile birinci sırada gelmektedir. Sulama amaçlı açılan tünellerin uzunluğu karayolu ve demiryolu için açılan tünellerin toplamından fazladır. **Buradan hareketle ülkemizin akan su kaynaklarının zenginliğinin de Doğu Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgesinde olduğu ve bölgenin fiziki yapısının dağlık olduğu, akan suların hidroelektrik amaçlı kullanımları sırasında ve/veya sonrasında tarımsal amaçlı kullanımı için suyun yönlendirilmesi amacıyla sulama tünellerinin yapılması stratejik önem arz etmektedir. Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) kapsamında Harran Ovasını sulayan Şanlı Urfa sulama tünelleri ile başlayan Babakaya ve Silvan tünelleri ile devam eden Tünel inşaatlarını Konya Ovası Projesi (KOP) kapsamında Mavi Tünel ile Konya ovası sulama suyun taşınması sağlanmış ve ilave olarak Afşar Barajı ve Bozkır Barajı ve bu barajların suyunu Mavi Tünel sistemine taşıyacak Hadimi Tüneli yapımı sürmektedir. Dünyada küresel ısınmanın sonucu suyun varlığı ve kullanımı ülkeleri stratejik konuma getirmiş ve bu konunun daha da önemli noktaya geleceği gerçeğiyle hareket edildiğinden ülkemizde akan suların etkin kullanımı son derece önemlidir. Bu kapsamda bölgenin fiziki yapısı dikkate alındığında çok fazla sayıda gerek hidroelektrik santralleri gerekse suyun içme ve tarımsal sulamada kullanımını yöneten projelerin geliştirilmesi acil ve kaçınılmaz bir durumdur.**



Şekil 7. Hindistan'daki tünel türleri ve toplam uzunlukları (Anonim 3)

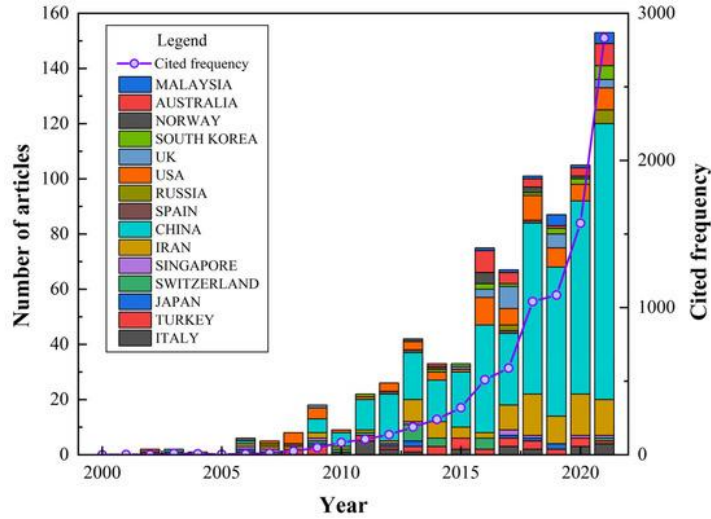
Asya-Pasifik bölgesinin, altyapıya yapılan kamu harcamalarının artması ve bölgedeki karayolu ve demiryolu ağlarının hızla gelişmesi sayesinde, bölge tünel açma makineleri için önemli bir pazar haline gelmiştir. Çin ve Japonya gibi ülkeler, bu alanda en fazla karayolu tüneline sahiptir. Çin, tünel açma makinelerinin en büyük üreticisi konumundadır. Hindistan ve Güney Kore gibi ülkelerde, demiryolu ve karayolu yapı ağlarına yapılan harcamaların artması, pazarın büyümesine yol açmaktadır. Küresel üreticilerle karşılaştırıldığında, Çinli üreticiler pazarlarını yerel pazardan uluslararası pazara doğru genişletmektedir.

TBM otomasyonu, kontrol sistemleri ve tasarımındaki teknolojik gelişmeler, tünel yapım projelerinde üretkenliği, verimliliği ve güvenliği artırmış ve bu da TBM pazarında önemli bir artışa yol açmıştır. Gelişmiş

kesici kafa tasarımları, gerçek zamanlı izleme sistemleri ve uzaktan kumanda yetenekleriyle modern TBM'ler, tünel açma operasyonları sırasında daha yüksek doğruluk, daha hızlı kazı oranları ve daha az arıza süresi sağlamaktadır. Ayrıca, çift modlu ve tutuculu TBM'ler gibi yeni gelişmeler, TBM'lerin daha geniş bir jeolojik koşul yelpazesine ve proje özelliklerine uyarlanabilirliğini ve kullanılabilirliğini artırmaktadır. İnşaat kuruluşlarının maliyetleri düşürmek ve proje programlarını en üst düzeye çıkarmak amacıyla teknolojik olarak gelişmiş TBM'leri giderek daha fazla kullanması sonucunda pazar genişlemektedir.

Küresel pazardaki önemli şirketler, Ar-Ge faaliyetlerine aktif olarak yatırım yaparak pazara daha fazla nüfuz etmeye ve böylece pazar paylarını korumaya odaklanmaktadır. Rekabet, teknolojik inovasyon, projeye özel teklif verme, satış sonrası hizmet ve tünel projelerinin özel ihtiyaçlarını karşılama becerisiyle şekillenmektedir. Bu makinelerin yapay zekâ ile entegrasyonu, şirketlerin pazara yenilikçi ürünler sunmalarına yardımcı olmaktadır.

TBM'lerin kullanımındaki verimlilikleri değerlendirmeye yönelik yapılan yayınlar 21. Yüzyılda büyük bir ivmeyle arttığı görülmektedir. Zhang vd. (2024), 2000-2021 yılları arasındaki 22 yılı kapsayan dönemde TBMler üzerine 528 tam erişimli makale kullanılarak yapılmış oldukları çalışmada yayınların yaklaşık 40 farklı alanı kapsadığını belirlemişlerdir. Bu yayın döneminde yapılan yayın ve yayınlara yapılan atıflar dikkate alındığında Şekil 8'den de görüldüğü gibi 2009 yılından sonra hızla artmış 2009 öncesine göre 18 kat arttığı görülmektedir. 2009 yılından önce, TBM performans araştırması henüz çözülmemiş önemli teknik zorluklarla karşı karşıyaydı ve bu da daha az sayıda yayınlanan makale, atıf yapılabilir makale sayısının azlığına neden olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, tünelcilikte karşılaşılan zorlukların ve sorunların giderek daha azalması ve tünel inşaat yöntemlerinin, inşaat planlamasının ve maliyet tahminlerinin seçiminde TBM performansının kritik rolünün artmasıyla birlikte, daha fazla ülke TBM performans tahmin modellerini araştırdığı anlaşılmaktadır.



Şekil 8. TBM performans literatürünün tanımlayıcı istatistiksel dağılımı.

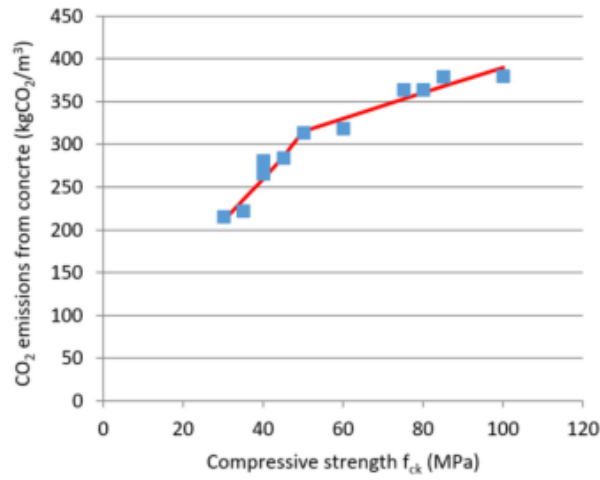
Tünel Açma Makinalarının Çevresel Açından Değerlendirilmesi

TBM'ler karayolu tünelleri, demiryolu tünelleri ve metro sistemleri de dahil olmak üzere tünel ve yeraltı geçitlerinin inşasında ulaştırma sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu makineler, yoğun nüfuslu bölgelerde ve zorlu jeolojik koşullarda tüneller kazarak yüzey bozulmalarını, trafik sıkışıklığını ve gürültü kirliliğini en aza indirmektedir. Tünel açma makineleri genellikle tünellere yapısal destek sağlayan ve uzun vadeli güvenlik ve güvenilirlik sağlayan tünel kaplaması kurulum sistemleriyle donatılmışlardır. Bu özellikleri

ve azaltılmış çevresel etkileri sayesinde, yoğun nüfuslu bölgelerde ek ulaşım altyapısının inşasına olanak tanımakta, böylece kapasiteyi artırmakta ve artan yolcu ve yük hacimlerini karşılamaktadırlar.

Rodríguez vd., (2024) yapmış oldukları çalışmada tünel açma sürecinde bulunan ana CO₂ üreticisi beton tahkimat elemanı olduğunu ve bu oranın küçük çaplı (4-5 m) tünellerde %50 ile büyük çaplı (9-10 m) tünellerde %75 arasında değişirken, bunu %16 ile yardımcı elemanlar ve %11,2 ile tünel açma makinesinin çalışması takip ederken, diğer kısımlar %1,3 ile %5,7 arasında değiştiğini ortaya koymuşlardır.

Tünel içi prekast yapımında kullanılan beton dayanımı ile CO₂ emisyonu arasındaki ilişki Şekil 9’da verilmiştir (Rodríguez vd., 2024). Bu da bize dayanımın artmasını istediğimiz prekast elemanının CO₂ salınımının daha fazla olduğu gerçeğini hatırlatacaktır. Ayrıca çap ve derinliğe bağlı olarak her bir metre başına kazıda açığa çıkan CO₂ oranının da arttığı Çizelge 2’den görülmektedir.



Şekil 9. Betonun basınç dayanımı ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişki

Çizelge 2. Tünel özelliklerine bağlı CO₂ emisyonları (Rodríguez vd., 2024)

$H \times D_i / RMR$	D_i (m)	H (m)	Tanım	tCO ₂ /m
< 20	3–4	< 300	Küçük çaplı, orta derinliğe kadar	2–3
20–60	5–6	< 500	Orta çap, büyük derinliğe kadar	3–4
60–100	8–9	< 500	Büyük çap, büyük derinliğe kadar	6–7
100–175	8–9	> 500	Büyük çap, çok büyük derinliğe kadar	8–9
> 175	8–9	> 500	Büyük çap, çok büyük derinlik ve zayıf kaya kütlesi	9–10

Rodríguez vd., (2024), tünel çapının, derinliğinin ve kaya kütlelerinin kalitesinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini incelediğinde incelenen tünellerde karbon ayak izinin öncelikle kaplama segmentleri tarafından yönlendirildiğini; yüzde oranının daha küçük çaplı (4-5 m) tünellerde %50 ile daha büyük çaplı (9-10 m) tünellerde %75 arasında değiştiğini, bunu yardımcı elemanların (%16) ve TBM'nin çalışmasının (%11,2) takip ettiğini, kesici tüketimi ve nakliyenin emisyonlara %5'ten daha az katkıda bulunduğu ortaya koymuşlardır. Öte yandan su yönetiminde oluşan emisyonların %80'i tünelden tahliyeden, %14'ü pompalanan suyun

artımından ve %6'sı ise endüstriyel su kullanımından kaynaklanmaktadır. Kayada TBM kazısının, D&B gibi diğer yöntemlere kıyasla genellikle daha düşük CO₂ emisyonlarına yol açtığını ortaya koymuşlardır.

Avrupa İklim Yasası, 2050 yılına kadar iklim nötrlüğüne ulaşma hedefi ve buna karşılık gelen zararlı emisyonları 2030 yılına kadar en az %50 oranında azaltma hedefi koymaktadır. **Yeşil ve düşük karbonlu tünellerin, kentsel yeşil ulaşım kavramında önemli bir rol oynayacağı unutulmamalıdır. Bundan sonraki süreçte sıfır karbon hedefleri çerçevesinde karbon ayak izini anlamak, çevresel sürdürülebilirlik için dikkate alınacak önemli parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.**

Birçok Avrupa ülkesi, Paris Konferansı'nda belirtilen hedeflere ulaşmak için sürdürülebilirliği ve yeşil girişimleri teşvik kapsamında araç trafiği ve emisyonları azaltmanın bir yolu olarak, yüzey sıkışıklığını ve emisyonları azaltmak için yer altı ulaşım sistemleri inşa etmekte ve TBM'ler bu tür çevre dostu ulaşım projelerini kolaylaştırmak için kullanılmaktadır.

TBM üreticileri, pazar paylarını artırmak ve çeşitli son kullanıcı endüstrilerinin değişen teknolojik gereksinimlerini karşılamak için satın almalar, birleşmeler, ortak girişimler, yeni malzeme geliştirmeleri ve coğrafi genişlemeler dahil olmak üzere çeşitli stratejiler ortaya koymaları gerekmektedir.

TBM Pazar Dinamikleri

Dünya genelinde **artan kentsel nüfus**, verimli ulaşım sistemlerine olan talebi artırıyor ve bu da metro, karayolu ve demiryolları için tünellerin inşasına yol açarak TBM'lerin kullanım eğilimini artırıyor.

Artan çevresel farkındalık, çevre dostu tünel çözümlerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını teşvik etmiş, geleneksel kazı yöntemlerine kıyasla çevresel etkiyi en aza indiren TBM'lerin kullanımını teşvik etmektedir.

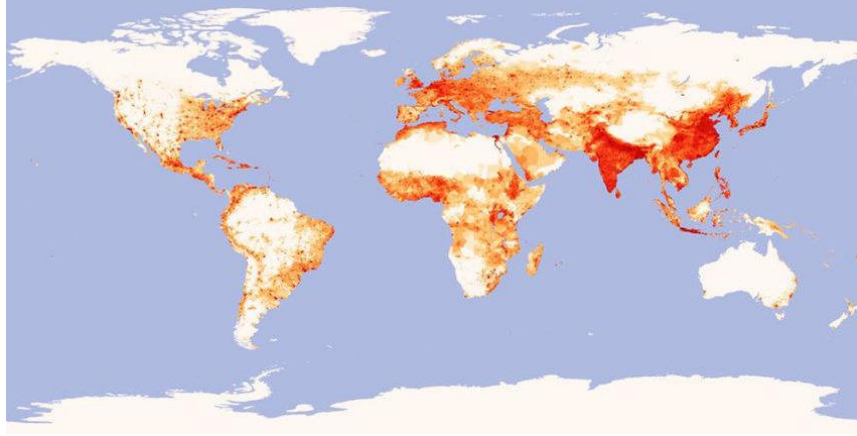
Her tünel projesi, sınırlı alan, özel güvenlik gereksinimleri veya kısıtlı inşaat programları gibi **kendine özgü zorluklarla** birlikte gelir. TBM'leri bu projeye özgü talepleri karşılayacak şekilde uyarlamak, dikkatli planlama ve mühendislik uzmanlığı gerektirir ve bu da yaygın uygulanabilirliklerini kısıtlayabilir.

Geleneksel kazı yöntemleri, zaman alıcı olsa da **düşük maliyetleri ve basitlikleri nedeniyle** bazen daha küçük ölçekli projeler için tercih edilebilir. Geleneksel yöntemlerle rekabet, özellikle sınırlı bütçeli projelerde TBM'lerin yaygın olarak benimsenmesini engellemektedir.

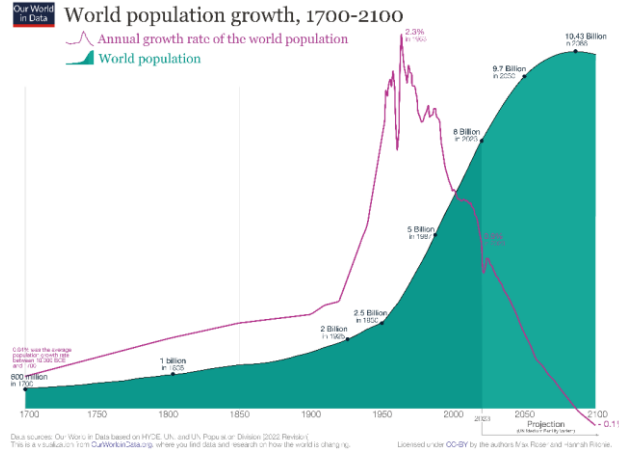
Hidroelektrik ve yeraltı pompaj depolama projeleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına artan önem, kapsamlı tünel çalışmalarını gerektirmektedir. TBM'ler, bu projeler için tünellerin oluşturulmasında hayati bir rol oynamakta ve yenilenebilir enerji sektöründe pazar büyümesi için benzersiz bir fırsat sunmaktadır.

Ülkeleri ve bölgeleri birbirine bağlayan **sınır ötesi bağlantı tünelleri**, uluslararası ticaret ve iş birliğini güçlendirmektedir. İskandinav ülkelerini ve Uzakdoğu Asya ülkelerini su altından veya karadan birbirine bağlayan tünellerin açılması uluslararası ilişkilerde önem arz etmektedir. TBM'ler, bu hayati bağlantıların inşasını kolaylaştırarak, özellikle iddialı sınır ötesi bağlantı projelerinin olduğu bölgelerde pazar genişlemesi fırsatları yaratmaktadır.

Dünya nüfus yoğunluğunun (Şekil 10), Şekil 5'de verilen 2024 yılı TBM Pazar payı ve öngörülen 2032 trendi ile örtüştüğü görülmektedir. Ayrıca dünya nüfus artışı azalma eğiliminde olmasına rağmen 2086 yılında dünyada 10,43 milyar insanın yaşayacağı öngörülmektedir (Şekil 11).



Şekil 10. Dünya nüfus yoğunluğu



Şekil 11. Dünya nüfus artış trendi

SONUÇLAR

Dünyada metropollerde yaşayan insan nüfusu ve dünya nüfusu arttıkça ve buna bağlı olarak yerleşim alanlarının nüfus yoğunluğu arttıkça ulaşım her zaman öncelikli olacaktır. Zaman daha da kıymetli hale geldiğinde ulaşımı kısaltmak için yeraltı yapılarına ihtiyaç artacak ve mutlaka daha derinlere de inilecektir. Modern yaşamların yeraltı yapılarına taşınması için mimari projeler tasarlanmaktadır.

21. Yüzyılda dünya nüfusunun artacağı ve ekonomik büyümlerin beklendiği bölgelerin başında Asya Pasifik bölgesi, Kuzey Amerika, Ortadoğu ve Afrika'nın olacağı dikkate alındığında TBM'lerin pazar paylarının bu bölgeler olacağı kaçınılmazdır. Buna bağlı olarak da TBM'ler gerek malzeme biliminde ve yapay zeka gibi teknolojik gelişmelerin ışığında gerekse kazı tekniklerinin gelişimine bağlı olarak gelişmesi beklenmektedir. Bu gelişmeler de kazı verimliliği ve ekonomiklik alanında TBM üreticilerinde rekabetçiliğe neden olacaktır.

Ülkelerin coğrafi fiziki koşulların sert olduğu bölgelerde gerek ulaşım gerekse su, enerji gibi taşıma hatlarının daha kısa mesafede, daha güvenli ve ekonomik taşınması için tünel yapılarına eğilim artmaktadır. Sınır aşan tünel yapılarının inşa edilmesi aynı zamanda uluslararası ticaretin artmasına, mal ve hizmetlere kolay ulaşımına neden olacaktır.

Ülkemiz açısından bakıldığında da Anadolu'nun büyük kısmı dağlık yapıya hakim olduğu ve akan su kaynaklarının Doğu Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu'da olduğu, küresel ısınmaya bağlı olarak suyun hayati ve stratejik bir kaynak olacağı, tarımsal alanların suya kavuşturulmasının kaçınılmaz olacağı dikkate alındığında tünel ağ yapıları oluşturulması kaçınılmazdır.

Sonuç olarak geçmişte olduğu gibi günümüzde ve özellikle gelecekte tünelcilik önemli bir alan olacaktır.

KAYNAKLAR

- Anonim 1. https://www.prof-research.com/index.php?route=information/news/news&news_id=7441
- Anonim 2. <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-tunnel-boring-machine-market/36852/>
- Anonim 3. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://indiainfrastructure.com/wp-content/uploads/2020/02/Tunnelling-in-India-2022_Released__28-Apr-2022.pdf
- Cardu, M., Catanzaro, E., Farinetti, A., Martinelli, D., Todaro, C. (2021). Performance Analysis of Tunnel Boring Machines for Rock Excavation, *Appl. Sci.*, 11(6).
- Herrenknecht, (2025). <https://www.herrenknecht.com/en/>, Erişim Ağustos 2025.
- Potter, B. (2023). Tünel Açma Makinelerinin Evrimi, <https://www.construction-physics.com/p/the-evolution-of-tunnel-boring-machines>
- Rodríguez, R., Bascompta, M., García, H. (2024). Carbon Footprint Evaluation in Tunnels Excavated in Rock Using Tunnel Boring Machine (TBM), *International Journal of Civil Engineering*, Volume 22, pages 995–1009.
- Zhang, Y., Zhou, J., Qiu, Y., Armaghani, D. J., Xie, Q., Yang, P., Xu, C. (2024). A Visual Survey of Tunnel Boring Machine (TBM) Performance in Tunneling Excavation: Mainstream Direction, Brief Review and Future Prospects, *Appl. Sci.* 14(11), 4512.

BULANIK ÇOK NİTELİKLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE EKİPMAN SEÇİMİ EQUIPMENT SELECTION WITH FUZZY MULTI ATTRIBUTE DECISION MAKING METHODS

M. Yavuz

*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
(myavuz@ogu.edu.tr)*

ÖZ

Karar verme, Yöneylem Araştırmasının hem fen hem de sosyal bilimlerde çok fazla uygulama alanı bulmuş önemli bir dalıdır. Literatürde karar verme problemlerinin en uygun çözümü için geliştirilen farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada, üç farklı Bulanık Çok Nitelikli Karar Verme yöntemi kullanılarak Açık Ocak kamyonu seçimi yapılmış ve problemin en uygun çözümü araştırılmıştır. Türkiye Kömür İşletmelerinden alınan eski tarihli ekipman alım sürecinden elde edilen veriler yöntemin uygulamasında kullanılmıştır. Bulanık Karar Verme yöntemlerinin madencilikteki farklı ekipman seçimi problemlerinin çözümünde Maden Mühendislerine ve Ekipman satış süreçleri ile ilgilenen profesyonellere yardımcı olabileceğine değinilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Karar verme, bulanık kümeler, ekipman seçimi

ABSTRACT

Decision-making is a crucial branch of Operations Research that has found extensive applications in both the physical and social sciences. Various methods have been developed in the literature to solve decision-making problems optimally. This study uses three different Fuzzy Multi-Attribute Decision Making methods to select an open-pit truck and investigate the optimal solution to the problem. Data from past equipment procurement processes from the Turkish Coal Enterprises were used in the application of the method. It is emphasized that Fuzzy Decision Making methods can assist mining engineers and professionals involved in equipment sales processes in solving various equipment selection problems.

Keywords: Decision Making, Fuzzy Sets, Equipment Selection

GİRİŞ

Karar verme süreci, hem mühendislik hem de sosyal bilim alanlarında karşılaşılan karmaşık problemlerin çözümünde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle madencilik sektöründe, yatırım maliyetleri yüksek olan ekipman seçimleri gibi stratejik kararlar, işletmelerin verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir. Bu tür kararlar, genellikle birden fazla ölçütün (maliyet, kapasite, bakım kolaylığı, yakıt tüketimi vb.) ve seçeneğin değerlendirilmesini gerektirir. Bu bağlamda, Çok Nitelikli Karar Verme (ÇNKV) yöntemleri, karar vericilere sistematik, analitik ve objektif bir değerlendirme imkânı sunar (Yavuz, 2015).

Ancak gerçek dünya problemlerinde, karar verme süreci sıklıkla belirsizlikler, eksik bilgiler, dilsel ifadeler ve uzmanların öznel yargıları ile karşı karşıyadır. Klasik ÇNKV yöntemleri bu tür belirsizlikleri yeterince yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, Zadeh (1965) tarafından önerilen bulanık kümeler teorisi, karar verme alanına dahil edilerek Bulanık Çok Nitelikli Karar Verme (Bulanık ÇNKV) yöntemleri geliştirilmiştir. Bulanık mantık, “iyi”, “orta”, “yüksek” gibi dilsel değişkenleri

matematiksel olarak modelleyebilme kabiliyetiyle, karar sürecini daha gerçekçi hale getirmektedir (Kaptanoğlu ve Özok, 2006).

Bu çalışmada, açık ocak madencilik faaliyetlerinde kullanılan 170 short ton kapasiteli kamyon seçimi problemi, üç farklı Bulanık ÇNKV yöntemi ile çözülmüştür. Seçilen yöntemler; Yager Yöntemi, Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (Bulanık AHS) ve Bulanık TOPSIS'tir. Bu doğrultuda, bu bildirinin amacı; belirsizlik içeren bir ekipman seçimi probleminde farklı bulanık karar verme yöntemlerinin karşılaştırmalı analizini yaparak, maden mühendislerine ve ekipman alım süreçlerinde görev alan profesyonellere karar destek sağlayacak bir çerçeve sunmaktır.

BULANIK ÇOK NİTELİKLİ KARAR VERME

Karar verme problemleri, çoğunlukla birden fazla ölçütü ve çözüm seçeneklerini içermektedir. Bu tür problemlerin çözümünde kullanılan ÇNKV yöntemleri, karar vericilere sistematik ve analitik bir yaklaşım sunmaktadır. Ancak karar verme sürecinde karşılaşılan belirsizlikler, öznel yargılar ve dilsel değerlendirmeler, klasik ÇNKV yöntemlerinin etkinliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle, Zadeh'in (1965) ortaya koyduğu bulanık küme teorisi üzerine geliştirilen Bulanık ÇNKV yöntemleri, belirsizliğin karar sürecine dâhil edilmesine olanak tanımakta ve kararların daha gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır.

Bulanık Kümeler

Bulanık kümeler kuramı, Zadeh'in klasik sistem kuramının matematiksel yöntemlerinin gerçek dünyadaki pek çok sistemle, özellikle insanları içeren kısmen karmaşık sistemlerle uğraşırken yetersiz kalmasından hoşnut olmayışından doğmuştur. Bulanık kümeler kuramı, muğlak ve belirsiz olan problemlerin çözülmesi için geliştirilmiştir. Zadeh'ten bu yana bulanık mantık ve bulanık kümeler kuramı pek çok alanda uygulama bulmuş ve hızla gelişmiştir (Kaptanoğlu ve Özok, 2006).

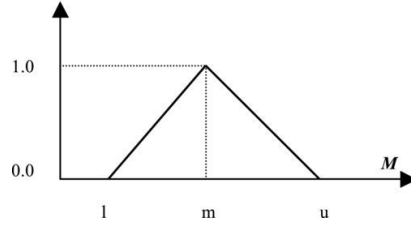
Bulanık küme, sürekli üyelik derecesine sahip nesnel kümesi olarak tanımlanmaktadır. Bulanık küme, her nesneyi 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecesine sahip üyelik fonksiyonu ile nitelendirmektedir (Zadeh, 1965). E evrensel kümesinde tanımlanan, bulanık küme A için $\mu_A: E \rightarrow [0,1]$ şeklinde ifade edilir. Bulanık A kümesindeki x elemanı için üyelik derecesinin gösterimi:

$$A = \left\{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in E \right\} \quad (1)$$

şeklindedir (Zimmermann, 1992). μ_A üyelik fonksiyonu $[0,1]$ kapalı aralığında gerçek bir sayıyı göstermektedir (Zadeh, 1975). Bu aralıktaki sayılardan "0" sayısı ilgini nesnenin kümenin üyesi olmadığını, "1" sayısı ise ilgili nesnenin kümenin tam üyesi olduğunu belirtmektedir. Bu iki değer arasında bulunan herhangi bir sayı ise ilgini nesnenin kümeye kısmi üyeliğini göstermektedir.

Bulanık sayılar dışbükey, normalleştirilmiş, sınırlı-sürekli üyelik fonksiyonları olan bir bulanık küme olarak ifade edilmektedir. Bulanık sayılar, bulanık kümelerin özel bir alt kümesidir. Yapılan çalışmaya göre farklı bulanık sayıları kullanmak mümkündür. Genelde üçgen ve yamuk olmak üzere iki farklı bulanık sayının uygulamalarda sıklıkla kullanılması söz konusudur. Bu çalışma içerisinde üçgen bulanık sayılar kullanılmıştır.

Üçgen bulanık sayılar, üç tane gerçek sayıyla tanımlanmış bulanık sayıların özel bir çeşidi olup (l, m, u) şeklinde ifade edilmektedir. l , m ve u parametreleri sırasıyla en küçük olası değeri, en olası değeri ve en büyük olası değeri göstermektedirler. Üçgen bulanık sayı \hat{A} 'nın gösterilişi aşağıdaki Şekil 1 ile verilmektedir (Kaptanoğlu ve Özok, 2006).



Şekil 1. Üçgen bulanık sayı

Yager Yöntemi

Ronald R. Yager (1977) tarafından geliştirilen Yager Yöntemi, karar seçeneklerinin bulanık küme teorisi ile değerlendirilmesini esas alır. Yager yöntemi, Bellman ve Zadeh'in (1970) maksimum/minimum yaklaşımını ve Saaty'nin Anaitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemini kullanan bir Bulanık ÇNKV yöntemidir. Burada ölçütlerin ağırlıkları ve seçeneklerin ölçütlere göre performansları bulanık sayılar (üçgen bulanık sayılar) şeklinde ifade edilir. Daha sonra, seçeneklerin toplam bulanık fayda değerleri hesaplanarak sıralama yapılır.

Yöntem, Sıralı Ağırlıklandırılmış Ortalama (OWA – Ordered Weighted Averaging) mantığı üzerine kuruludur. Yöntemin ilk aşaması Karar Probleminin Tanımlanmasıdır. Bu aşamada; Seçenekler (S_1, S_2, \dots, S_m), Ölçütler ($\bar{O}_1, \bar{O}_2, \dots, \bar{O}_n$), Ölçüt Ağırlıkları (Görelî Önem Vektörü, w_j) karar verici / karar vericiler tarafından belirlenir. Sonraki aşamada, "Performans Değerlerinin Belirlenmesi" aşamasına geçilir. Seçeneklerin ölçütlere göre değerlendirilmesi bulanık sayılar (üçgen bulanık sayılar) yardımı ile yapılır. Bu aşamada, "iyi", "orta", "kötü" gibi dilsel terimler bulanık sayılarla modellenir. Sonrasında, "Normalize Edilmiş Karar Matrisi" oluşturulur ve farklı ölçeklerdeki ölçütler normalize edilir. Fayda ve maliyet ölçütleri uygun dönüşümlerden geçirilir. Sonraki aşamada, "Yager Agregasyon İşlemi" uygulanır. Her seçenek için ölçüt değerleri ağırlıklarla birlikte OWA yöntemi kullanılarak birleştirilir. Bu aşamada "Bulanık Ağırlıklı Ortalama" ya da Yager'in önerdiği bulanık "Max–Min" tabanlı operatörler uygulanır. Sonra, "Bulanık Fayda Değerlerinin Hesaplanması" aşamasına geçilir. Her seçenek için tek bir bulanık değer elde edilir. Sonrasında ise, "Bulanıklaştırmanın Giderilmesi" (Defuzzification) aşamasına geçilir ve "Bulanık Fayda Değerleri" tek bir sayıya indirgenir (örneğin, ağırlık merkezi yöntemi, ortalama yöntemleri). Son aşamada ise, "Seçeneklerin Sıralanması" yapılır. En yüksek değeri alan seçenek en iyi seçim olarak belirlenir.

Bulanık AHS Yöntemi

Thomas L. Saaty (1980) tarafından geliştirilen AHS yöntemi belki de en yaygın olarak kullanılan ÇNKV yöntemlerinden bir tanesidir. AHS yöntemi, uzman kişilerin bilgilerini ele alan ancak insani düşünce tarzını tam olarak yansıtamayan bir yöntemdir. Bunun yanında, AHS yöntemi, ikili karşılaştırma süreçlerinde var olan belirsizlik ve kararsızlık durumlarında çeşitli yetersizliklere sahip olduğu düşüncesiyle eleştirilmektedir. Bu olumsuzlukları gidermek amacı ile Bulanık AHS yöntemi geliştirilmiştir.

Bulanık AHS, ÇNKV problemlerinde kullanılan AHS yönteminin bulanık mantık temelli genişletilmiş biçimidir. Yöntemde, ikili karşılaştırmalar klasik AHS'deki gibi kesin sayılar yerine genellikle üçgen bulanık sayılar (l, m, u) ile yapılır. Karar vericilerin öznel yargıları bu bulanık sayılar aracılığıyla modele aktarılır. Daha sonra Chang'in (1996) bulanık sentetik genişletme yöntemi veya benzeri yaklaşımlar kullanılarak ölçütlerin ve seçeneklerin bulanık ağırlıkları hesaplanır. Son aşamada, elde edilen bulanık öncelikler uygun bir bulanık sayıları kesin sayılara dönüştürme (defuzzification) yöntemi ile netleştirilir ve seçenekler sıralanır. Bu yaklaşım, karar sürecinde mevcut olan belirsizlik, dilsel değişkenler ve uzman yargılarındaki tutarsızlıkları daha gerçekçi biçimde modellemeye olanak sağlar.

İlk Bulanık AHS yöntemi ile çalışma Laarhoven ve Pedrycz (1983) tarafından üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak yapılmıştır. Buckley (1985), karşılaştırma oranlarının bulanık önceliklerinin yamuk üyelik

fonksiyonları ile belirtildiği Bulanık AHS yöntemini bilim dünyasına önermiştir. Chang (1996), ikili karşılaştırmalarda üçgen bulanık sayıları kullanarak Bulanık AHS için yeni bir yaklaşım ortaya atmış ve ikili karşılaştırmalarda genişletilmiş analiz yöntemi kullanmıştır. Bu çalışmada kullanılacak hesaplama yöntemi Chang (1996) tarafından önerilen yaklaşımdır.

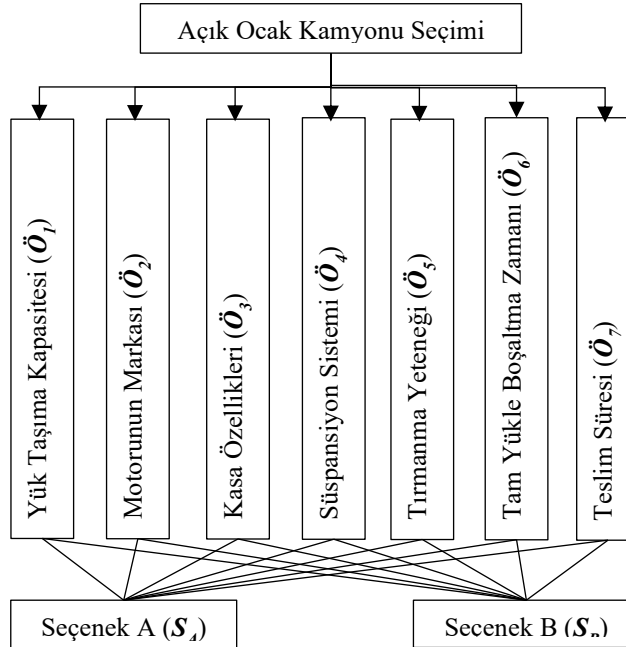
Bulanık TOPSIS Yöntemi

Bulanık TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), klasik TOPSIS yönteminin bulanık mantık ile genişletilmiş halidir ve ÇNKV problemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Yöntemin temelinde, her seçeneğin en iyi çözüm olarak tanımlanan bulanık pozitif ideal çözüme (FPIS) en yakın, en kötü çözüm olan bulanık negatif ideal çözüme (FNIS) ise en uzak olması gerektiği varsayımı yer alır.

Karar vericilerin değerlendirmeleri genellikle üçgensel bulanık sayılar ile ifade edilir ve ilk adımda bir bulanık karar matrisi oluşturulur. Bu matris normalize edilir ve ölçütlerin önem derecelerini temsil eden bulanık ağırlıklarla çarpılarak bulanık ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilir. Daha sonra her seçeneğin FPIS ve FNIS'e olan bulanık Öklid uzaklıkları hesaplanır. Son aşamada her seçenek için göreceli yakınlık katsayısı (C_i) hesaplanır. C_i katsayısı 0 ile 1 arasında değer alır ve 1'e yaklaştıkça seçeneğin ideal çözüme daha yakın olduğu kabul edilir. Böylece seçenekler bu katsayıya göre sıralanır. Bulanık TOPSIS, karar verme sürecinde belirsizlik, dilsel değişkenler ve öznel yargıları modele dâhil ederek, klasik TOPSIS'e göre daha esnek ve güvenilir sonuçlar sağlamıştır. Bu çalışmada kullanılacak hesaplama yöntemi Chen (2000) tarafından önerilen yaklaşımdır.

BULANIK ÇOK NİTELİKLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE KAMYON SEÇİMİ

Bu çalışmada Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından daha önce 1997 yılında ihalesi yapılan 170 short ton kapasiteli açık ocak kamyonu alımı için hazırlanan teknik şartnameden alınan veriler kullanılmıştır. Söz konusu alım ihalesine sadece iki firma teklif verdiği için mevcut teknik şartnameye bağlı kalınarak eldeki veriler kullanılarak ekipman seçimi probleminin çözümü için üç farklı Bulanık ÇNKV yöntemi kullanılmıştır. Problem için tasarlanan hiyerarşik yapı aşağıda Şekil 2 ile verilmiştir.



Şekil 2. Problemin hiyerarşik yapısı

Şekil 2 ile verilen üç düzeyli hiyerarşik yapının birinci düzeyini “Amaç”, ikinci düzeyini “Ölçütler” ve üçüncü düzeyini ise “Seçenekler” oluşturmaktadır. Bu çalışmada belirlenen üç farklı bulanık karar verme yöntemi ile problemin çözümü sonraki bölümlerde sırasıyla verilmiştir.

Yager Yöntemi ile Çözüm

Yager yöntemi ile çözüm için Şekil 2 ile verilen hiyerarşi kullanılmış olup iki seçenek (S_A ve S_B) ve yedi ölçüt ($\tilde{O}_1, \tilde{O}_2, \tilde{O}_3, \tilde{O}_4, \tilde{O}_5, \tilde{O}_6$ ve \tilde{O}_7) karar verme sürecinde kullanılmıştır. Ölçüt ağırlıklarının belirlenmesi [Görelî Önem Vektörü (GÖV), w_i] için Saaty tarafından geliştirilen AHS yönteminden faydalanılmıştır. Bu amaçla oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi aşağıda Çizelge 1 ile verilmiştir. Bu matriste $\lambda_{max}=7,394$, $TO=0,050$ olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi hem tutarlı hem de geçerli bir matristir.

Çizelge 1. İkili karşılaştırma matrisi ile ölçüt ağırlıklarının belirlenmesi

	\tilde{O}_1	\tilde{O}_2	\tilde{O}_3	\tilde{O}_4	\tilde{O}_5	\tilde{O}_6	\tilde{O}_7	Geo. Ort.	GÖV (w_i)
\tilde{O}_1	1	5	3	5	1	7	9	3,349	0,315
\tilde{O}_2		1	1/3	1	1/5	3	7	0,834	0,079
\tilde{O}_3			1	3	1/3	5	7	1,662	0,157
\tilde{O}_4				1	1/5	3	7	0,834	0,079
\tilde{O}_5					1	7	9	3,349	0,315
\tilde{O}_6						1	3	0,390	0,037
\tilde{O}_7							1	0,198	0,019

Çözüm için ikinci aşama karar vericiler tarafından belirlenen ölçüt ağırlıklarının kullanılarak bir karar matrisinin oluşturulmasıdır. Seçenek A ve Seçenek B için her bir ölçüt için uzman görüşleri Çizelge 2'nin üçüncü ve dördüncü sütununda verilmiş olup beşinci ve altıncı sütunlarda ise her bir seçeneğin Genel Ağırlık Değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sırasında Yager (1977) yöntem bilimi kullanılmıştır. Bellman-Zadeh'in Max-Min kuralı (1970) uygulanarak en uygun çözüm Seçenek A olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2. İkili karşılaştırmalar ile ölçüt ağırlıklarının hesaplanması

ÖLÇÜTLER	GÖV (w_i)	Uzman Görüşleri		Genel Ağırlık Değerleri		
		A	B	A	B	
\tilde{O}_1	0,315	0,700	0,300	0,894	0,684	
\tilde{O}_2	0,079	0,300	0,700	0,910	0,972	
\tilde{O}_3	0,157	0,100	0,900	0,697	0,984	
\tilde{O}_4	0,079	0,900	0,100	0,992	0,835	
\tilde{O}_5	0,315	0,700	0,300	0,894	0,684	
\tilde{O}_6	0,037	0,900	0,100	0,996	0,919	
\tilde{O}_7	0,019	0,900	0,100	0,998	0,958	
				<i>MAX - MIN</i>	0,697	0,684

Bulanık AHP Yöntemi ile Çözüm

Bu çalışmada belirlenen ve Şekil 2 ile hiyerarşisi verilen ölçüt ve seçenekler ikili karşılaştırmalar aracılığı ile karar verici/vericiler tarafından değerlendirilmiştir. Oluşturulan ikili karşılaştırma matrisleri bulanık hale getirilmeden önce her birinin tutarlılığı kontrol edilmiş ve tüm matrislerin tutarlı olduğu bulunmuştur. Bulanık ikili karşılaştırmalar matrisinde değerlendirme sonuçları üçgen bulanık sayı şeklinde olup Chang (1996) tarafından önerilen yöntem bilim kullanılmıştır.

Karar verici/vericilerin, ölçütleri ikili karşılaştırmaları ile oluşturulan birleştirilmiş bulanık ikili karşılaştırmalar matrisi aşağıda Çizelge 3 ile verilmiştir. Bu çizelge dilsel ifadeler kullanılarak doldurulmuştur. Örneğin, Ölçüt 1 ile Ölçüt 2'nin ikili karşılaştırması ile tanımlanan birinci satır ikinci sütunda bulunan “KÖ” değeri (3,5,7) bulanık sayısına karşılık gelmektedir. Yine, Ölçüt 2 ile Ölçüt 1'in ikili karşılaştırması ile tanımlanan ikinci satır birinci sütunda bulunan değer “KÖ” değerinin tersi olan (1/7,1/5,1/3) değeri olarak atanmıştır.

Çizelge 3'teki verilerden faydalanarak Chang'ın (1996) genişletilmiş analiz yöntemine göre öncelikle sentez değerlerinin bulunması gereklidir. Ölçütlere ait sentez değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$S_1 = (21.00, 31.00, 39.00) \otimes (1/150.22, 1/110.38, 1/70.3) = (0.140, 0.281, 0.550)$$

$$S_2 = (6.49, 10.73, 15.67) \otimes (1/150.22, 1/110.38, 1/70.3) = (0.043, 0.097, 0.221)$$

$$S_3 = (11.40, 19.67, 29.00) \otimes (1/150.22, 1/110.38, 1/70.3) = (0.076, 0.178, 0.409)$$

$$S_4 = (6.49, 10.73, 15.67) \otimes (1/150.22, 1/110.38, 1/70.3) = (0.043, 0.097, 0.221)$$

$$S_5 = (21.00, 31.00, 39.00) \otimes (1/150.22, 1/110.38, 1/70.3) = (0.140, 0.281, 0.550)$$

$$S_6 = (2.77, 5.15, 8.73) \otimes (1/150.22, 1/110.38, 1/70.3) = (0.018, 0.047, 0.123)$$

$$S_7 = (1.82, 2.10, 3.15) \otimes (1/150.22, 1/110.38, 1/70.3) = (0.012, 0.019, 0.044)$$

Çizelge 3. Bulanık ikili karşılaştırmalar matrisi

	\tilde{O}_1	\tilde{O}_2	\tilde{O}_3	\tilde{O}_4	\tilde{O}_5	\tilde{O}_6	\tilde{O}_7
\tilde{O}_1	EÖ	KÖ	BÖ	KÖ	EÖ	ÇÖ	TÖ
\tilde{O}_2		EÖ	1/BÖ	EÖ	1/KÖ	BÖ	ÇÖ
\tilde{O}_3		BÖ	EÖ	BÖ	1/BÖ	KÖ	ÇÖ
\tilde{O}_4				EÖ	1/KÖ	BÖ	ÇÖ
\tilde{O}_5		KÖ	BÖ	KÖ	EÖ	ÇÖ	TÖ
\tilde{O}_6						EÖ	BÖ
\tilde{O}_7							EÖ

Bir sonraki aşamada yukarıda elde edilen bulanık sayıların karşılaştırması olup ve aşağıda Çizelge 4 ile verilen değerler elde edilmiştir. Daha sonra ölçütlerin öncelik değerleri (d') her bir satırdaki sıfırdan farklı en küçük sayılar ihmal edilerek bulunmuştur.

Çizelge 4. Bulanık sayıların karşılaştırılması

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	d'
S_1		1	1	1	1	1	1	1
S_2	.31		.64	1	.31	1	1	.31
S_3	.72	1		1	.72	1	1	.72
S_4	.31	1	.64		.31	1	1	.31
S_5	1	1	1	1		1	1	1
S_6	0	.61	.26	.61	0		1	.26
S_7	0	.02	0	.02	0	.48		.02

Öncelik değerlerinin hesaplanması ile öncelik vektörü, $W' = (1, 0.31, 0.72, 0.31, 1, 0.26, 0.02)$ olarak oluşmuştur. Öncelik vektörü değerlerinin normalize edilmesi ile ölçütlerin öncelik değerleri ya da diğer bir ifadeyle ağırlıkları sırasıyla (0.276, 0.086, 0.199, 0.086, 0.276, 0.072, 0.006) olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalara göre Açık Ocak Kamyon Seçimi problemi için “Yük taşıma kapasitesi” ve “Tırmanma yeteneği” eşit öneme sahip ve önemli ölçütlerdir. Bu ölçütleri önem sırasına göre, Motorunun markası, Kasa özellikleri, Süspansiyon sistemi, Tam yükte boşaltma ve Teslim süresi takip etmektedir. Ölçütlerin ağırlıklarının

belirlenmesinden sonra, her bir ölçüt için seçeneklerin değerlendirilmesi işlemleri yapılmıştır. Her bir ölçüt için seçeneklerin aldıkları ağırlıklar aşağıda Çizelge 5 ile verilmiştir.

Çizelge 5. Seçeneklerin ölçütler karşısındaki ağırlıkları

	\tilde{O}_1	\tilde{O}_2	\tilde{O}_3	\tilde{O}_4	\tilde{O}_5	\tilde{O}_6	\tilde{O}_7	Karar
S_A	0.70	0.30	0	0.89	0.70	0.89	0.89	0.56
S_B	0.30	0.70	1	0.11	0.30	0.11	0.11	0.44
W	0.276	0.086	0.199	0.086	0.276	0.072	0.006	

Ölçütlerin ağırlıkları ile seçeneklerin her bir ölçüt altında aldıkları ağırlıkların çarpılıp ağırlıklı değerlerin toplanmasıyla her bir seçeneğin genel ağırlığı bulunmuştur. ($S_A=0.7 \times 0.276 + 0.3 \times 0.086 + 0 \times 0.199 + 0.89 \times 0.086 + 0.7 \times 0.276 + 0.89 \times 0.072 + 0.89 \times 0.006 = 0.558$). Buna göre Seçenek A, aldığı 0.56 ağırlığı ile ilk sırada yer almış ve Seçenek B ise 0.44 ile ikinci sırada yer almıştır.

Bulanık TOPSIS Yöntemi ile Çözüm

Bulanık TOPSIS yöntemi ile problemi çözmek için Chen (2000) tarafından önerilen yöntem bilim uygulanmış ve hesaplama süreci özetlenmiştir. Karar verici/vericiler, ölçütlerin önemini değerlendirmek için dilsel ağırlıklandırma değişkenlerini kullanmışlardır. Karar verici/vericiler, her bir ölçüt açısından seçenekleri değerlendirmek için Chen (2000) tarafından önerilen dilsel değişkenlerini kullanmışlardır. Dilsel değerlendirme, bulanık karar matrisini oluşturmak ve her bir ölçütlerin bulanık ağırlığını belirlemek için üçgen bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Karar verici/vericiler tarafından belirlenen dilsel ölçüt ağırlıkları aşağıda Çizelge 6 ile verilmiştir. Chen (2000) yöntem bilimine göre Çizelge 7 ile Bulanık karar matrisi, Çizelge 8 ile de Normalize bulanık karar matrisi ve Çizelge 9 ile de Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi verilmiştir.

Çizelge 6. Ölçütlerin ve ölçütlerin seçenekler karşısında aldıkları dilsel ağırlıkları

	\tilde{O}_1	\tilde{O}_2	\tilde{O}_3	\tilde{O}_4	\tilde{O}_5	\tilde{O}_6	\tilde{O}_7
Dilsel İfadeler	H	ML	M	ML	H	L	VL
Bulanık Sayılar	(.7, .9, 1)	(.1, .3, .5)	(.3, .5, .7)	(.1, .3, .5)	(.7, .9, 1)	(0, .1, .3)	(0, 0, .1)
S_A - Dilsel İfadeler	MG	MP	VP	G	MG	G	G
S_A - Bulanık Sayılar	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)
S_B - Dilsel İfadeler	MP	MG	VG	P	MP	P	P
S_B - Bulanık Sayılar	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(9, 9, 10)	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)

Çizelge 7. Bulanık karar matrisi

	\tilde{O}_1	\tilde{O}_2	\tilde{O}_3	\tilde{O}_4	\tilde{O}_5	\tilde{O}_6	\tilde{O}_7
S_A	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)	(0, 0, 1)	(7, 9, 10)	(5, 7, 9)	(7, 9, 10)	(7, 9, 10)
S_B	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(9, 9, 10)	(0, 1, 3)	(1, 3, 5)	(0, 1, 3)	(0, 1, 3)

Çizelge 8. Normalize bulanık karar matrisi

	\tilde{O}_1	\tilde{O}_2	\tilde{O}_3	\tilde{O}_4	\tilde{O}_5	\tilde{O}_6	\tilde{O}_7
S_A	(.556, .778, 1)	(.111, .333, .556)	(0, 0, .1)	(.7, .9, 1)	(.556, .778, 1)	(.7, .9, 1)	(.7, .9, 1)
S_B	(.111, .333, .556)	(.556, .778, 1)	(.9, 1, 1)	(0, .1, .3)	(.111, .333, .556)	(0, .1, .3)	(0, .1, .3)

Çizelge 9. Ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi

	\tilde{O}_1	\tilde{O}_2	\tilde{O}_3	\tilde{O}_4	\tilde{O}_5	\tilde{O}_6	\tilde{O}_7
S_A	(.389, .7, 1)	(.011, .1, .278)	(0, 0, .07)	(.07, .27, .5)	(.389, .7, 1)	(0, .09, .3)	(0, 0, .1)
S_B	(.078, .3, .556)	(.056, .233, .5)	(.027, .5, .7)	(0, .03, .15)	(.078, .3, .556)	(0, .01, .09)	(0, 0, .03)

Her bir seçeneğin sırasıyla bulanık pozitif ideal çözüm ve bulanık negatif ideal çözümden uzaklığının hesaplanması Chen (2000) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Son aşamada ise hesaplanan negatif ve pozitif çözüme uzaklıklara bağlı olarak hesaplanan yakınlık katsayıları hesaplanmış ve Çizelge 10 ile verilmiştir.

Çizelge 10. Seçenekler için negatif ve pozitif çözümden uzaklıklar ve yakınlık katsayıları

	Negatif İdeal Çözüme Uzaklık	Negatif İdeal Çözüme Uzaklık	Yakınlık katsayıları
S_A	2.259	5.229	0.302
S_B	1.733	5.631	0.235

Yakınlık katsayılarına göre, iki seçeneğin sıralama derecesi Seçenek A (S_A) ve Seçenek B (S_B) olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda, belirlenen ölçütlere ve karar vericiler tarafından yapılan değerlendirmelere göre en uygun seçim Seçenek A (S_A) ekipmanın satın alınması olmuştur.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, açık ocak madencilik faaliyetlerinde kullanılan 170 short ton kapasiteli kamyon seçimi problemi, belirsizlik ve öznel değerlendirmelerin etkili olduğu bir karar verme ortamında, üç farklı Bulanık ÇNKV yöntemi ile çözülmüştür. Kullanılan yöntemler; Yager Yöntemi, Bulanık AHS ve Bulanık TOPSIS olarak belirlenmiş ve her bir yöntemin uygulama süreci detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu üç yöntemde elde edilen sonuçlar paralel bir şekilde, Seçenek A'nın Seçenek B'ye göre daha üstün olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar, farklı matematiksel yapıya sahip üç ayrı Bulanık ÇNKV yönteminin, aynı problemde tutarlı ve benzer yönetime ulaştığını göstermektedir. Bu durum, bulanık mantık tabanlı yöntemlerin ekipman seçimi gibi karmaşık ve ÇNKV problemlerinde güvenilir ve etkili bir karar destek aracı olabileceğini doğrulamaktadır. Ayrıca, özellikle madencilik sektöründe yüksek yatırım maliyeti gerektiren ekipman alımlarında, uzman görüşlerinin dilsel ifadelerle modellenebilmesi ve belirsizliklerin hesaplara entegre edilmesi, karar sürecini daha gerçekçi ve esnek hale getirmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma; Bulanık ÇNKV yöntemlerinin madencilik sektöründe ekipman seçimi problemlerinin çözümüne başarılı bir şekilde uygulanabileceğini, farklı yöntemlerle elde edilen sonuçların tutarlılığını ve bu yöntemlerin karar vericilere sağlamış olduğu esneklik ve nesnellik açısından büyük katkı sağladığını göstermektedir. Gelecekte, daha fazla seçenek ve ölçütün dâhil edildiği, çok sayıda uzman katılımıyla yapılan grup karar verme senaryolarında bu yöntemlerin uygulanması, sonuçların daha da güçlendirilmesini sağlayabilir. Ayrıca, farklı bulanık sayı türleri (örneğin yamuk bulanık sayılar) veya melez yöntemlerin kullanımı ile çözüm süreçleri geliştirilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada veriler konusunda yardım eden Maden Yüksek Mühendisi Soner ÖĞRETMEN ve TKİ yöneticilerine bildiri yazarı teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR

- Bellman, R.E ve Zadeh L.A., (1970). Decision Making in a Fuzzy Environment, *Management Science*, 17, 141-164.
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233–247.
- Chang, D. (1996). Applications of the extent analysis method of fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research*, 95, 649–655.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1–9.
- Kaptanoğlu, D, ve Özok, A, (2006). Akademik performans değerlendirmesi için bir bulanık model, *itüdergisi/d*, 5 (1), 193–204.
- Laarhoven, P. ve Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty’s priority theory, *Fuzzy Sets and Systems*, 11, 229–241.
- Saaty, T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting*, McGraw-Hill International Book Company, New York.
- Yager, R.R. (1977). Multiple objective decision-making using fuzzy sets. *International Journal of Man-Machine Studies*, 9(4), 375–382.
- Yavuz, M., (2015). Equipment selection based on the AHP and Yager’s method. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(5), 425-433.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
- Zadeh, L.A. (1975). The Concept of a Linguistic Variable and its Applications to Approximate Reasoning-I, *Information Sciences*, 8, 199–249.
- Zimmermann, H.J, (1992). *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, Kluwer Academic Publishers.

TÜRKİYE DOĞALTAŞ PIYASASINDA OTONOM MERMER OCAĞI TASARIM-UYGULAMA VE YATIRIM ANALİZİ (OCAK 4.0)

AUTONOMOUS MARBLE QUARRY DESIGN, IMPLEMENTATION, AND INVESTMENT ANALYSIS IN THE TURKISH NATURAL STONE MARKET (QUARRY 4.0)

İ.S. Büyüksağış^{1,*}, M. Gürsoy¹, E. Kısa¹

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
(*Sorumlu yazar: sbsagis@aku.edu.tr)

ÖZ

Bu çalışmada; Endüstri 4.0 kavramı kapsamında madencilik sektöründe son zamanlarda adından sıkça söz ettiren Madencilik 4.0 uygulamaları incelenmiş ve mermer-doğal taş sektöründeki ocaklarında uygulanabilirliği analiz edilmeye çalışılmıştır. Dördüncü sanayi devrimi olarak da bilinen Endüstri 4.0 kavramı, en son üretim teknolojilerinin otomasyon ekipmanları veya sistemleri ile birbirleriyle veri alışverişinde bulunduğu sistemi ifade etmektedir. İnsanın kurduğu medeniyetler-endüstriler sırayla numaralandırılmış, makine ve bilgisayar sistemlerinin haberleşerek daha sağlıklı ve hızlı karar almada etkin bir şekilde kullanıldığı Endüstri 4.0'ın temelleri araştırılarak madencilik sektöründe halen uygulanan bazı yeni teknolojiler bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Ayrıca, Madencilik 4.0 süreci kapsamında örnek bir doğal taş ocağında kullanılan makine ve ekipmanlar incelenerek, daha verimli çalışabilmelerini sağlayacak gerekli ekipman ve yazılımlar incelenmiş, bunların en iyisi için yaklaşık bir bütçe tahmini yapılmış ve başa baş noktası hesaplanmıştır. Sonuç olarak; doğaltaş ocak yatırımında %12,8 oranında ek yatırım yapılarak, ocağın tam otonom hale getirilebileceği ve ocağın kesintisiz 3 vardiya (günde 24 saat) çalışabileceği, yatırımın yaklaşık 17,4 ayda geri kazanılabileceği saptanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Endüstri 4.0, Ocak 4.0, doğaltaş, otonom ocak, maliyet analizi

ABSTRACT

In this study; Within the scope of industry 4.0 concept, mining 4.0 applications, which have recently been mentioned in the mining sector, have been investigated and tried to analyse the applicability of the quarries in the natural stone sector. The concept of Industry 4.0, also known as the fourth industrial revolution, refers to the system in which the latest manufacturing technologies exchange data with each other by automation equipment or systems. The civilizations established by humanity-industries are given numbers in order, and some new technologies that are still applied in the mining sector have been examined within the scope of this study by researching the foundations of Industry 4.0, where machine and computer systems communicate and are used effectively in making healthier and quick decisions. In addition, the machines and equipment used in a sample natural quarry within the scope of the Mining 4.0 process have been examined and the necessary equipment and software to enable them to operate more efficiently has been examined, approximately a budget estimate has been estimated for the best of them, and head-to-head points have been calculated. As a result, an additional investment of 12.8% was made in a natural quarry investment, it was determined that it was possible to make the quarry fully autonomous, that the quarry could work 3 shifts (24 hours per day) without interruption and that the investment could be recovered in approximately 17.4 months.

Keywords: Industry 4.0, Quarry4.0, natural stones, autonomous quarry, cost analyses

GİRİŞ

Dördüncü sanayi devrimi olan Endüstri 4.0, geleneksel üretim ve endüstriyel platformların ve uygulamaların en son akıllı teknoloji ile birleşimini kapsamaktadır. Kısa adıyla I4, bir terim olarak endüstriyel üretimlerin bilgisayarla otomasyona geçmesini isteyen ve destekleyen eden Alman Hükümeti tarafından 2011 yılında kullanılmaya başlanmıştır.

İnsan müdahalesine ihtiyaç duymadan akıllı makinaların, olayları analiz edebilme ve teşhis edebilmelerinin yanı sıra makinaların birbirleri arasında iletişimini sağlayarak kullanımlarını sağlayan bir teknolojidir. Bu bilgi alışverişi sayesinde makinalar arası bir üretim organizasyonu oluşacaktır. Bu organizasyon geleceğin akıllı fabrikası olarak tanımlanan, bilgisayar tarafından yönlendirilen sistemlerin fiziksel süreçleri izlediği, fiziksel bir sanal kopyasını oluşturduğu, kendi kendine örgütlenme mekanizmalarına dayalı, otonom kararlar alabilen bir yapıyı anlatmaktadır.

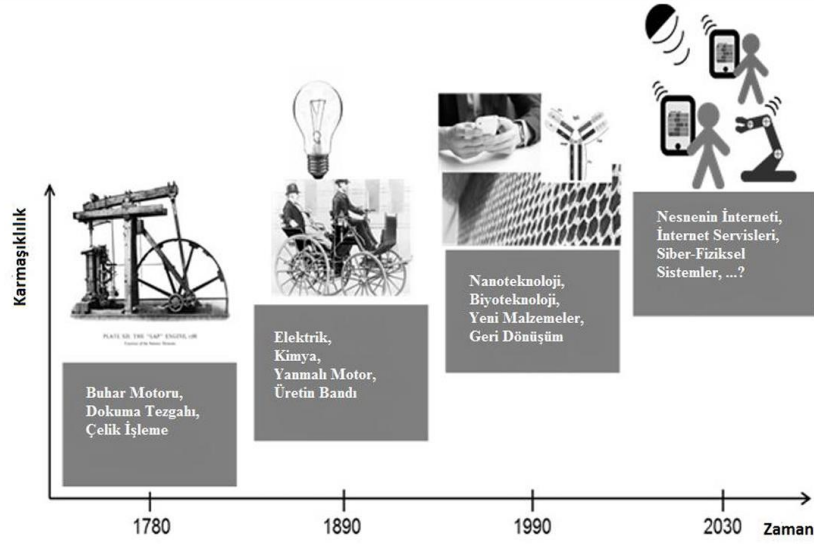
Üretim sektörlerinin birçoğunda teknolojik olarak kullanılmaya başlanmış Endüstri 4.0'ın, Maden 4.0 kavramı ile yakın gelecekte daha sık duyacağımız madencilğe uyarlanmış hali olarak karşımıza çıkmaktadır. Maden 4.0 ile bir maden ocağında kullanılan makinaların ve donanımların yönetimlerini, yakıt izlemelerini, jeolojik etütleri ve maden üretim planlaması gibi işlem basamaklarını sistemleştirmeyi ve bunların takiplerini kolaylaştırmayı sağlamaktadır. Risk grubu çok yüksek olan madencilik sektöründe daha az can kayıpları yaşanması açısından da bu ileri teknolojinin kullanılması çok önemli görülmektedir.

Ülkemizin oldukça fazla doğaltaş kaynaklarına sahip olmasından ve son yıllarda ihracatı bir hayli hız kazandığından dolayı doğaltaş sektörünün Maden 4.0'daki yeri, önemi ve uygulanabilirliği bu çalışmada araştırılmıştır.

Örnek bir mermer ocağında kullanılan makinaların üzerine otomasyon donanımlarının ocak şartlarına en uygun olanları saptanmıştır. Mermer ocağının maliyet analizlerinde hem otonom ve otonom olmayan olarak başa baş miktarları-süresi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar her ne kadar kendi içerisinde sapmalar gösterecek olsa bile, mermer ocağına uygulanması durumunda hem verimliliği arttıracığı, hem maliyetleri azaltacağı hem de sermayenin hızlı bir şekilde geri kazanılmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Bu örnekte gösterildiği gibi yalnızca bir doğaltaş ocağında değil, mümkünse tüm madencilik işletmelerinde uygulamasında büyük yarar olduğu ve gelecekte daha da gelişerek yaygınlaşacağı görülmektedir.

ENDÜSTRİ 4.0 KAVRAMI

Endüstri 4.0 kavramının ortaya çıkışı Alman hükümetinin yürüttüğü ileri teknoloji temalı bir projesiyle başlamıştır. Proje üretimin bilgisayarlaştırılması yaklaşımı ile hazırlanmıştır. Daha önceki sanayi devrimlerindeki önemli dönüşümlerden esinlenen proje, yeni dönemi Endüstri 4.0 olarak adlandırmıştır. Kavram ilk kez 2011 yılında Hannover Fuarı'nda kullanılmıştır. Endüstri 4.0, kuramsal boyutta ise ilk kez Kagerman ve arkadaşları tarafından 2011 yılında yayınlanan "Endüstri 4.0: Nesnelerin interneti ile 4. Endüstri Devrimine Giderken" başlıklı makale ile gündeme gelmiştir. Makalede dünyanın yeni bir döneme girdiği ve bu dönemin Endüstri 4.0 olarak nitelendirilmesi gerektiği belirtilmekte ve bu süreci oluşturan bileşenler hakkında bilgi verilmektedir. Daha sonra Alman Ulusal Bilim ve Mühendislik Akademisi tarafından 2013 yılında yayınlanan "Endüstri 4.0 Stratejik İnisyatifinin Uygulanmasına Yönelik Tavsiyeler" başlıklı raporla konu kuramsal boyutta resmi bir çerçeve kazanmış oldu (Soylu, 2018). Endüstri devrimlerinin kronolojisi Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Endüstri devrimlerinin kronolojisi (Akben ve Avşar, 2018)

Endüstri 4.0, değer zinciri boyunca birbirleriyle özerk bir şekilde iletişim kuran teknoloji ve cihazlara dayanan üretim süreçlerinin organizasyonunu ifade etmektedir. Bu organizasyon geleceğin “akıllı” fabrikası olarak tanımlanan, bilgisayar tarafından yönlendirilen sistemlerin fiziksel süreçleri izlediği, fiziksel bir sanal kopyasını oluşturduğu, kendi kendini örgütlenme mekanizmalarına dayalı, otonom kararlar alabilen bir yapıyı anlatmaktadır (Soylu, 2018).

Karanlık Üretim

Karanlık Üretim (KÜ), bilgisayar tarafından kontrol edilen, onu çalıştırmak için hiç bir insana ihtiyaç duymayan makine ile imalat sürecini tanımlar. Üretim bandında insan faktörü olmadan işin yürütüldüğü fabrikalarda, önceden yüklenmiş aygıtlar dışardan yönlendirme olmadan kendi başlarına proseslere devam edebilmektedirler. Bu yapı bazı kaynaklarda KÜ olarak ifade edilirken, bazı kaynaklarda ise Karanlık Fabrika (KF) ifadesi görülmektedir (Akben ve Avşar, 2018).

Karanlık Fabrika ilk olarak 1980’li yılların başında gündeme gelmiştir ve ilk Karanlık Fabrika örnekleri 1980’lerde Japonya’da ortaya çıkmaya başlamıştır. Şirketler insan işçiliğinin yüksek maliyetlerini aşmak için robotik ve otomasyon teknolojisindeki gelişmelerden yararlanmaya başlamışlardır.

O sıralarda iş analistleri, teknolojinin gelişmesi, kalifiye işçilerin bulunması zorlaştıkça Karanlık Fabrikaların dünya çapında daha yaygın hale geleceğini öngörüyorlardı. Ancak ucuz insan emeği ile gelişmekte olan ülkelere imalatın yayılmasının, Karanlık Fabrikaların yükselişini geçici olarak önlediği söylenebilir (Akben ve Avşar, 2018).

Ayrıca, General Motors firmasının 1980’lerde Karanlık Fabrikalara örnek gösterilen otomatik imalat uygulamasında başarısız olması, bu başarısızlığın sonucu olarak kalitenin ve satışların düşmesi piyasanın dikkatinden kaçmayan bir deneyim olmuştur. Buna rağmen piyasada farklı uygulamaların olduğunu görmekte mümkündür. Çin’de kurulan bir cep telefonu parçası üreticisi Karanlık Fabrikalara örneklerden biridir. Fabrikadaki bir robotun yaklaşık 6-8 kişinin iş gücüne karşılık bir performans göstermesi sonucunda başlangıçta fabrikada çalışan 650 kişi olmasına rağmen Karanlık Üretime geçildikten sonra çalışan sayısı 60’a, hatalı ürün oranı ise %25’den %5’e inmiştir (Akben ve Avşar, 2018).

Karanlık Fabrika kavramı üretimde makinelerin ön plana çıktığı, insana ihtiyacın olmadığı bir otomasyonu ifade eder. Makinelerin karanlık ortamlarda da çalışabilmelerinden dolayı Karanlık Fabrika olarak adlandırılan bu üretim devrimi ülkelerin ve işletmelerin gelecekleri için önemlidir (Akben ve Avşar, 2018).

Değişen pazarlar ve müşteri talepleri nedeniyle imalat sistemleri çeşitli şekillerde değişmektedir. Çeşitli talepleri karşılamak için esnek ve çevik üretim sistemleri gerekmektedir. Esnek ve çevik üretimde, ürün türleri, spesifikasyonlar, miktar ve teslim tarihi gibi konular çok karmaşıktır ve müşterilerden gelen siparişler zamanla değişmeye devam eder. Bu gibi durumlarda geleneksel imalat sistemlerinin verimliliği de bir hayli düşük kalabilir (Akben ve Avşar, 2018).

Karanlık Üretimin Avantaj ve Dezavantajları

Karanlık üretim, üreticilere birçok avantaj sağlamaktadır ve sağladıkları bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir;

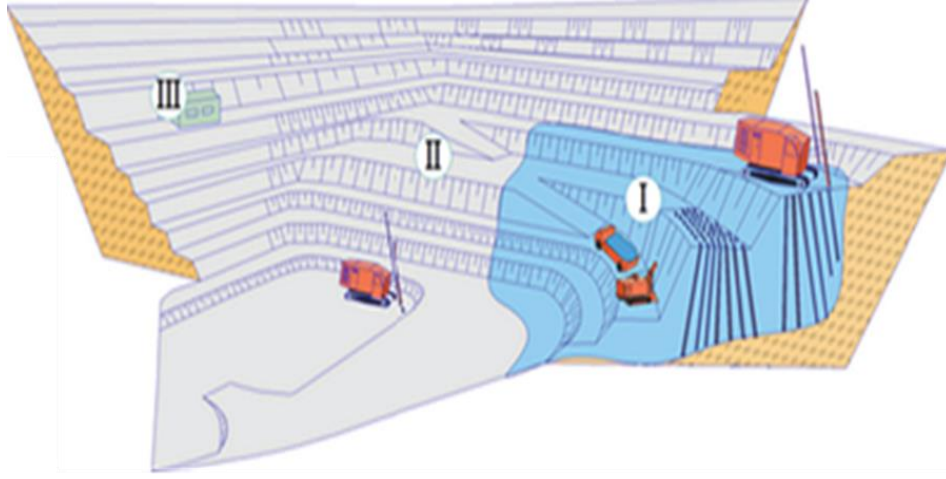
- Makine ile üretim, daha fazla çalışma saatine karşın daha az kusurlu parça imkânı tanır,
- İlk yatırım maliyeti ve bakım onarım giderleri ile bile makinenin üretimi daha ucuzdur,
- İyi bir planlama ile makinelerin 24 saat çalışması mümkündür,
- İnsanlar Ar-Ge gibi alanlara kaydırılarak daha verimli işlerde kullanılabilirler,
- Bilhassa gece üretimleri gibi durumlarda işletmelere enerjide maliyetin azalması imkânı verir,
- Hızlı üretim imkânından dolayı rekabette geleneksel firmalara göre avantajlıdır (Akben ve Avşar, 2018).

Karanlık üretimin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajlarının olduğu bir gerçektir. Karanlık Üretimde eğitilmiş insan gücüne ihtiyaç duyulacak alanlar;

- Acil ve rutin bakım,
- Kalite kontrol,
- Sistem kurulumu, yeniden yapılandırılması ve yükseltmeleri,
- İç sistemlerin yönetimi, elektrik, sıhhi tesisat ve iletişim,
- Üretim ve işleme sistemlerinin izlenmesi,
- Üretim planlaması ve koordinasyonu,
- Yeni ürün üretiminin uygulaması,
- Yönetim (Akben ve Avşar, 2018).

MADEN 4.0 KAVRAMI

Endüstri 4.0 de madencilik sektörünü etkilemektedir. Aslında, bazı madenler geleceğin dijitalleşmiş madene doğru önemli adımlar atmıştır. Yavaş yavaş, madencilik endüstrisi Endüstri 4.0 ve tam otomatik madenlerin vizyonlarının yanı sıra teknolojik olarak daha karmaşık cevher işleme tesislerinin vizyonlarına daha da yaklaşmaktadır. Endüstri 4.0'ın madencilikte uygulanması da benzer şekilde, madencilik 4.0'ı madenciler için üretimin sorunsuz çalışmasını sağlayan bir yapının olduğu, bir maden işletmesi olarak kavramsallaştırılmaktadır. Maden 4.0 sadece operatörün içinde olduğu bir kontrol odasıyla sınırlı değildir. Bunun yerine, gerçek zamanlı işlem verileri ve makinelerin durumu madenin etrafında hareket ederken madenciyi takip etmektedir. Madenci, diğer operatörler, uzmanlar, tedarikçiler ve müşterilerle çok yetkin ekipler halinde uzaktan etkileşim kurarak sorunları doğrudan kaynakta çözmektedir. Kısacası, Maden 4.0 duyuları ve bellek teknoloji ile genişletilmiş bir madenciyi öngörmektedir (Abrahamsson vd, 2019). Endüstriyel madencilik ve taşıma robotlarının kullanımıyla bir maden mühendisliği sisteminin çalışma prensibi Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Endüstriyel madencilik ve taşıma robotlarının kullanımıyla bir maden mühendisliği sisteminin çalışma prensibi (Klebanov vd, 2017)

Modern madencilikte, işletme düzeyindeki sistemler (ERP, CRM, SCM) ve atölye sistemleri arasında gerçek zamanlı bir bilgi akışı olması zorunludur. İki alan arasındaki boşluklar, yöneticilerin en iyi karar alma süreçleri için zamanında bilgiye sahip olmalarını zorlaştırmaktadır.

Bir madencilik şirketi, optimum ve etkili operasyonlar elde etmek için üretim, kalite, çevrim süreleri, makine durumu ve diğer önemli operasyonel değişkenler üzerinde anlık görünüme ihtiyaç duyar. Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasıyla parçalanmış atölye sistemleri ve kurumsal düzey sistemler optimum operasyonlar sunmada sorunsuz bir şekilde iletişim kurar (Sishi ve Telukdarie, 2017).

Sonuçta madendeki şu beş sistemin entegrasyonu sağlanır; SAP ERP, Yakıt Yönetim Sistemi (FMS-Fuel Management System), Modüler Yönetim Sistemi (MMS-Modular Management System), Lastik Yönetim Sistemi (TMS-Tire Management System), Üretim Uygulama Sistemi (MES-Manufacturing Execution Systems) ve Jeoloji Maden Planlaması (GMP-Geology Mine Planning) (Sishi ve Telukdarie, 2017).

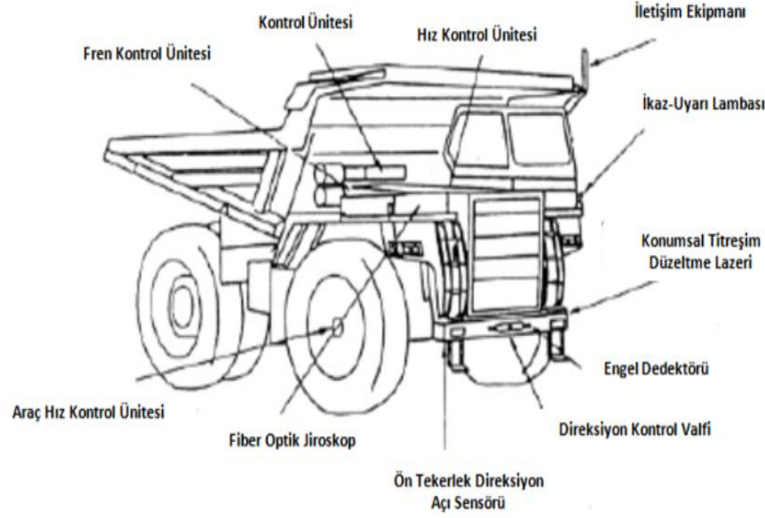
Madencilikte Otonom Araçlar

1990'lı yılların başlarında ABD'de ve 1995'te Avustralya'daki maden ocaklarında, otonom kamyonların testlerine başlanmış, 2010 yılında ise 11 otonom kamyon Şili'deki Gaby bakır ocağında, ocak içi nakliyede kullanılmaya başlanmıştır. 2000'li yılların başlarında ise otonom delik delme makinelerinin testleri yapılarak, 2006 yılında Avustralya'daki Pilbara'daki demir ocağında kullanılmaya başlanmış ve tam otonom makinelere geçişi 2010 yılında gerçekleşmiştir. Birkaç yıl içerisinde, otonom teknolojinin hızlı bir şekilde gelişerek; arama, patlatma, kazı ve madencilikte kullanılan diğer araçlarda kullanılmaya başlayacağını tahmin edebiliriz. Günümüzde, Avustralya ve Şili başta olmak üzere, dünya genelinde pek çok ülke de otonom araçlar ve teknolojiyi kullanmakta ve yatırım yapmaktadırlar (Keskin, 2017).

Günümüzde, otonom olarak kullanılan araçların başında, ocak içi nakliyede kullanılan kamyonlar gelmektedir. Otonom nakliye kamyonları, Şekil 3'te detaylı olarak belirtilen iletişim, fren, hızlandırıcı, direksiyon, konumlandırma sistemleri, radar sensörleri ve diğer ekipman ve aktümatörler gibi çeşitli alt sistem ve araçlarla donatılmışlardır (Keskin, 2017).

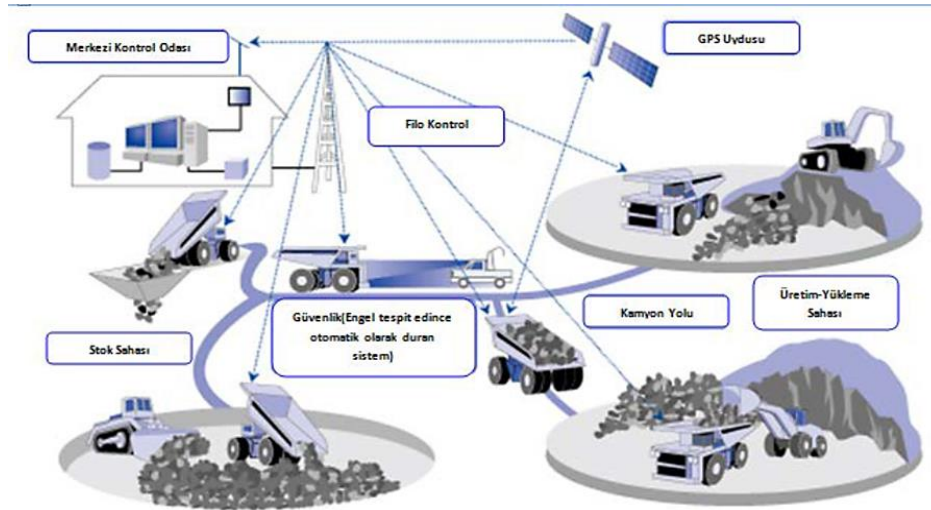
Otonom nakliye kamyonunun yol koşulları, robotik olmayan araçlarla etkileşimler, iklim koşullarındaki değişken ortamlar için davranış şekilleri incelenmeli ve analiz edilmelidir. Farklı otonom davranışları simüle etmek, bir alt sistem ya da genel sistemde davranışların nasıl olabileceğini tahmin etmek için bilgi üretebilir ve

herhangi bir sistem parametresinde bir adım değişikliği meydana geldiğinde, sistem verimliliğini artırmak üzere yeniden yapılandırmaya gidilebilir. Otonom bir nakliye kamyonunun çeşitli alt sistemlere ayrılması ve bunların Monte Carlo yaklaşımı ile simüle edilmesi, farklı alt sistem varyasyonlarına karşı sistem hassasiyetlerini anlamayı mümkün kılar (Keskin, 2017).



Şekil 3. Otonom kamyon alt sistemleri (Keskin, 2017)

Yakın bir gelecekte, çeşitli ülkelerde, birbirine entegre olmuş ve aynı çalışma düzleminde hareket eden, merkezi kontrollü, insan hataları ve kaza risklerinin en aza indirildiği, maliyetleri günümüze göre daha da düşürülmüş, tam otonom ocak işletmeciliğine geçiş yapılacağı tahmin edilmektedir (Şekil 4) (Keskin, 2017).



Şekil 4. Tam otonom bir açık ocak işletmesinde kullanılan tasarım parametreleri (Keskin, 2017)

Madencilikte Otonom Sistemin Kullanımının Önemi ve Gerekliliği

Madencilik sektöründe robot makinaların kullanımı öncelikle gereksiz, hatta bazı açılardan imkânsız görülebilir. Fakat konuya yakın olmayanların gözden kaçırdığı bazı noktalar, konuya büyük miktarda kaynak

aktarmasının ve yüzlerce personelini seferber etmesinin sebebini kolaylıkla açıklar. Zira, makina verim hesaplamalarında en önemli faktörlerden biri, operatör verimidir (Sönmez vd, 1996).

Operatör verimi insana bağlı özelliklerden dolayı operatörün makinayı, gerçek veriminin ancak %8-9'u ile çalıştırabileceğinden yola çıkılarak ortaya konmuştur. Beklenmedik her türlü şartlar göz önüne alınarak hazırlanmış bir algoritmaya dayalı olarak çalışan, hassas algılayıcılara, yüksek kapasiteli ve hızlı mikroişlemcilere ve kaliteli aktivitelere (hareketlendirici) sahip bir robot-makinada, bu oran, %95-99' u kadar çıkarabilir. Bu da en azından %5'lik bir verim artışıdır ki yüksek kapasitelerde üretim yapan bir ocak için büyük bir rakama karşılık gelir. Personel problemleri, robotik kontrolü gerekli kılan diğer önemli bir öğedir.

Günümüze kadar maden ocakları, nispeten düşük ücretli bir personel bolluğu yaşıyor idiyse de, değişen ekonomik şartlar, madencilik firmalarını otomasyon ve robotik kontrole yöneltmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerde büyük yerleşim birimlerine uzak madenler için işçi bulmak gün geçtikçe güçleşmektedir (Sönmez vd, 1996).

İşgücünün bol ve ucuz olduğu az gelişmiş ülkelerde ise, günümüz gelişmiş maden makinalarını verimli bir şekilde kullanacak uzman eleman bulmak oldukça, zordur. Ayrıca, sektörde verimliliğin artırılması için geliştirilen mekanize ekipmanların kontrolü, gün geçtikçe daha pahalı ve karmaşık hale gelmekte olup, zaten işi oldukça zor olan operatörlerin kapasitelerini aşmaya başlamıştır (Sönmez vd, 1996).

Yukarıda belirttiğimiz gibi, bir makinanın potansiyel işgücü kapasitesini, operatörlerin öz becerileri sınırlar. Karmaşık makinalar iyi eğitilmiş operatörler tarafından bile güçlükle kullanılmaktadır. Ayrıca söz konusu büyük maden makinalarının, madenciler diğer işlerle ilgilenirken atıl kalmaması gerekmektedir. Kendi kendine işleyen bir robot-makina, (sahip olduğu diğer avantajlarla birlikte) maden sahiplerine bu tip sorunlar için mükemmel bir çözüm olarak gözükmektedir (Sönmez vd, 1996).

MERMER OCAĞI 4.0 UYGULAMASI

Bu bölümde Maden 4.0 uygulamasının bir örnek bir mermer-doğaltaş ocağına uygulanabilirliği ve bunun ekonomik boyutları ile yararları incelenmektedir.

Mermer ve Doğaltaş Ocaklarında Kullanılan Makinalar

Mermer ocaklarında, üretim yöntemine ve sahanın özel durumuna göre çok çeşitli makine ve donanımlar kullanılır. Bununla birlikte, kesintisiz üretim için bu makinaların ihtiyaç duyabileceği yedek parçaların ve tamir takımlarının da bulunması gerekir (Kurt vd, 2016).

Mermer ocaklarında ihtiyaç duyulan başlıca makine ve donanımlar (Şekil 5-11);

- Enerji temini için kullanılan donanımlar; Trafo, jeneratör, yakıt tankı vb.
- İş makinaları; Ekskavatör, Lastik tekerlekli veya paletli yükleyici (Loader), merkezi yükleyici vinç (derrick), kaya kamyonu vb.
- Üretim için kullanılan; Elmas tel kesme, zincirli kollu kesici, traktör kollu kesici, delik delme makinası vb. (Kurt vd, 2016).



Şekil 5. Ekskavatör Borusan CAT 336 GC modeli (İnt. Kyn 1, 2025)



Şekil 6. Lastikli yükleyici (Loader) CAT 980L modeli (İnt. Kyn 1, 2025)



Şekil 7. Kaya Kamyonu Borusan CAT 740EJ modeli (İnt. Kyn 1, 2025)



Şekil 8. Kule (Derrick) Vinç



Şekil 9. Paletli Zincirli Kollu Kesici (Tataroğlu SVC 70 modeli) (İnt. Kyn 2, 2025)



Şekil 10. Traktör kollu kesici (DEMMAK TKZK-3400 modeli) (İnt. Kyn 3, 2025)



Şekil 11. Delik Delme Makinası (Demmak Paletli modeli) (İnt. Kyn 3, 2025)

Yukarıda bir mermer ocağı için bulunması gereken makine ve donanımlar genel olarak verilmiş olup, bunların satın alma maliyetleri Çizelge 1’de görülmektedir.

Çizelge 1. Mermer ocaklarında kullanılan makine fiyat listesi

Ekipman Adı	Minimum Adet	Ortalama Fiyat
Ekskavatör 336gc	1	278.330 \$
Loader 980l	1	334.000 \$
Kamyon 740ej	1	556.660 \$
Delik Delme Makinası	1	52.700 \$
Elmas Tel Kesme Makinası	2	20.000 \$
Paletli Zincirli Kollu Kesici	1	130.000 \$
Sayalama Makinası	1	2.350 \$
Traktör Kollu Kesici	1	150.000 \$
Vinç	1	300.000 \$
TOPLAM		1.824.040 \$

Mermer Ocağı İçin Önerilen Otonom Araç Donanımları

Bu bölümde örnek bir mermer-doğaltaş ocağında kullanılan iş makinelerinin Maden 4.0 felsefesine göre otonom kullanımı için gerekli olan ve uygun görülen donanımlar hakkında detay bilgiler yer almaktadır.

Lidar Seçimi

Örnek doğaltaş ocağında kullanılacak iş makinelerinin otonom hale dönüştürülmesinde kullanılması planlanan lidarlara ait fiyat listesi Çizelge 2’de görülmektedir.

Çizelge 2. SICK marka Lidar sensörlerin fiyat listesi

Makina	Lidar Modeli	Fiyatı (\$/adet)
Ekskavatör	SICK LD-MRS (3D)	10.000
Loader	SICK LD-MRS (3D)	10.000
Kamyon	SICK LD-MRS (3D)	10.000
Tel Kesme	SICK MRS1000	5.700
Paletli Kollu Kesici	SICK MRS1000	5.700
Paletli Delici	SICK MRS1000	5.700
Derrick Vinç	SICK MRS1000	5.700
Traktör Kollu Kesici (Sayalama)	SICK MRS1000	5.700
TOPLAM		58.500\$

GNSS Seçimi

Örnek doğaltaş ocağında kullanılacak otonom iş makinelerinde kullanılması planlanan GNSS'lere ait fiyat listesi Çizelge 3'te görülmektedir.

Çizelge 3. CHCNAV i50 GNSS fiyat listesi

Makina	Fiyatı (\$/adet)
Ekskavatör	4.000
Loader	4.000
Kamyon	4.000
Tel Kesme	4.000
Paletli Kollu Kesici	4.000
Paletli Delici	4.000
Derrick Vinç	4.000
Traktör Kollu Kesici (Sayalama)	4.000
TOPLAM	32.000\$

Kamera Seçimi

Kamera sistemlerine ait seçim ve fiyat listesi Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Kamera sistemleri fiyat listesi

Cihaz ve Kurulum	Adet	Fiyat (KDV hariç- \$)
Mobiliz DT614 4 Kanal 3G DVR	1	350
Mobiliz DT6603 IP66 Kızılötesi Led Kamera	1	70
1TB 2,5" Sata HDD	1	100
Montaj ve Devreye alma	1	30
TOPLAM		550\$

İnsansız Hava Araçları (İHA) Seçimi

İnsansız hava araçları (İHA) sistemine ait seçim ve fiyat listesi Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. İHA Seçimi ve fiyat listesi

Cihaz	Birim Fiyatı (\$)
DJÍ PHANTOM 4 RTK Drone	5.250

Çarpışma Sakınma Sistemi

Çarpışma, madencilikteki en büyük güvenlik tehditlerinden biridir. Bu çarpışma iki makine parçası arasında veya bir işçi ile bir araç arasında gerçekleşebilmektedir. Ekipmanın gücü ve boyutu, küçük bir hatanın bile trajik koşullara neden olabileceği anlamına gelir. Yeni teknoloji, madencilik ölüm riskini azaltmaya yardımcı oluyor, ancak çarpışmalar hala işçilerin işyerindeki güvenliği için bir tehdit oluşturmaktadır. Madencilik tehlikeli bir endüstri olması şaşırtıcı değildir. Ağır trafik sadece şantiyede hareket etmekle kalmaz, aynı zamanda işçiler genellikle kör noktalar ve zayıf görüş nedeniyle engellenir. Kazı, görünürlüğü azaltan kir ve toz ile sonuçlanır ve hava koşulları, sahada karşılaşılan zorlukları artırabilir (Smoot, 2019).

İnsanlar iş sahasındayken, güvenliği korumak zor olmaktadır ve kaza-çarpışma riski her zaman mevcuttur. Ne yazık ki, bir çarpışma büyük makinelerin etkisiyle ciddi yaralanmalara hatta ölüme neden olabilir. Sadece işçilerin güvenliğini sağlamak değil, aynı zamanda çarpışmadan kaçınmanın da işletme maliyetleri üzerinde doğrudan etkisi vardır. Madencilik şirketleri, yaralanma ile ilgili tıbbi maliyetlerden tasarruf edebilir ve onarım veya değiştirme ihtiyacını önlemek için ekipmanı koruyabilir. Doğru madencilik güvenliği stratejilerinin uygulanması, daha az ıskalama, çarpışma ve diğer maliyetli olaylarla sonuçlanabilmektedir (Smoot, 2019). SICK RAS4xx radar sensörü fiyat listesi Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. SICK RAS4xx radar sensörü fiyat listesi

Makina	Fiyatı (\$/adet)
Ekskavatör	3000 \$
Loader	3000 \$
Kamyon	3000 \$
Tel Kesme	3000 \$
Paletli Kollu Kesici	3000 \$
Paletli Delici	3000 \$
Derrick Vinç	3000 \$
Traktör Kollu Kesici (Sayalama)	3000 \$
TOPLAM	24.000\$

Lineer Elektrik Motor Seçimi

Lineer motorlar, araçların hızlanmasını yönetmek için kullanılmakta olup, makineler için gerekli Lineer motor fiyatları Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Lineer Elektrik Motor fiyat listesi

Makina	Fiyatı (\$/adet)
Ekskavatör	150
Loader	150
Kamyon	150
Paletli Kollu Kesici	150
Paletli Delici	150
Traktör Kollu Kesici (Sayalama)	150
TOPLAM	900\$

Merkezi İşlemci Seçimi

Otonom aracın direksiyon kontrolü gaz ve fren fonksiyonlarının kontrolünü PLC otomasyonla sağlamada Allen Bradley marka donanım tercih edilmiştir. (İnt Kyn 4, 2025). Buna ait fiyat listesi Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8. Merkezi İşlemci fiyat listesi

MAKİNA	FİYATI (\$/adet)
Ekskavatör	320
Loader	320
Kamyon	320
Tel Kesme	320
Paletli Kollu Kesici	320
Paletli Delici	320
Derrick Vinç	320
Traktör Kollu Kesici (Sayalama)	320
TOPLAM	2540\$

Mermer Ocağı Maliyet Analizi

Projeye konu sahada kullanılacak makine ve teçhizat Çizelge 9’daki gibidir. Bunlar seçilirken açık işletme şeklinde çalışacak karbonat kökenli bir doğaltaş ocağı için gerekli iş makineleri ve ataşmanları dâhil, “vergi+sigorta hariç” anahtar teslim fiyatları dikkate alınmıştır. Otomasyon için gerekli donanımların adet ve fiyatları Çizelge 10’da görülmektedir.

Çizelge 9. Makine parkı toplam maliyeti

Makine Adı	Adet	Birim Fiyatı (\$)
Ekskavatör	1 adet	278.330
Lastikli Yükleyici	1 adet	334.000
Kaya Kamyonu	1 adet	556.660
Zincirli Kollu Kesici	1 adet	130.000
Elmas Tel Kesme Mak.	2 adet	20.000
Delik Delme Makinası	1 adet	52.700
Traktör Kollu Kesici	1 adet	150.000
Kule Vinç	1 adet	300.000
TOPLAM		1.821.690

Çizelge 10. Otomasyon donanımları ve yazılım toplam maliyeti

Ekipman Adı	Miktar(Adet)	Tutarı (\$)
SICK LD-MRS(3D) Lidar	3	30.000
SICK MRS1000 Lidar	6	34.200
CHCNAV i50 GNSS	9	36.000
SICK RAS4xx Radar Sensör	9	27.000
SICK safeRS Radar Sensör	9	5.400

Çizelge 10. Otomasyon donanımları ve yazılım toplam maliyeti (devamı)

Ekipman Adı	Miktar(Adet)	Tutarı (\$)
Lineer Elektrik Motor	9	1.350
Merkezi İşlemci	9	2.880
Mobiliz DT6 144 Kanal 3G DVR	9	18.900
Mobiliz DT6603 IP66 Kızılötesi Led Kamera	18	1.080
1TB 2,5" Sata HDD	9	765
DJİ PHANTOM 4 RTK Drone	2	10.500
YAZILIM (Araç otonom karar desteği, üretim verimlilikleri toplama ve analizi için)		100.000
TOPLAM TUTAR		268.000\$

(NOT: Yazılım fiyatı yaklaşık olarak belirtilmiştir)

Örnek Mermer Ocağı Hakkında Bilgi

Bu kısımda örnek olarak karbonatik kökenli bir doğaltaş ocağı ele alınmaktadır. Bu ocakta kaliteli blok alınabilecek kısımlarda 400m boyunda, 300m genişliğinde bir alanı kaplayan mermer zonunun ortalama kalınlığı da 40m olarak varsayılmıştır. Bu verilere göre; Görünen rezerv: $400m \times 300m \times 40m = 4.800.000m^3$ olarak hesaplanır. Satılabilir blok verimliliğinin %10 olacağı düşünüldüğünde ise, İşletilebilir rezerv: $4.800.000m^3 \times 0,10 = 480.000m^3$ olarak bulunur. Yıllık üretim miktarı $4.800m^3$ ($\square 13.000$ ton) blok mermer üretimi olarak seçilmiştir. Bu varsayımına göre; Ocak Ömrü=İşletilebilir rezerv miktarı/yıllık kapasite = $480.000m^3/4800m^3/yıl = 100yıl$ olarak ortaya çıkmaktadır.

Amortisman ve Yıllık Toplam Maliyet Hesaplama

Ocak makineleri ve otomasyon donanımları-yazılım için Toplam Yatırım Tutarı= 2.089.690\$ olup, bunların amortisman ömrü 5 yıl olarak alınacaktır. Buna göre; Demirbaşlar için Yıllık Amortisman: $2.089.690\$/5yıl = 417.938\$/yıl$ olacaktır.

Bir doğaltaş ocağında amortisman, sarf malzeme, işçilik (10 işçi), elektrik, dizel yakıt ve işletme giderleri yıllık olarak hesaplanmalıdır. Çizelge 11'de hem otonomsuz hem de otonomlu bir ocak için günde tek vardiya çalışılması durumunda yıllık maliyetler görülmektedir.

Otonom çalışan ocaklarda klasik işçi ve iş makinesi operatörleri görev yapmayacak, sadece sistem operasyonunu kontrol ve kumanda yapan 1-2 operatör ve bakım onarım için 1-2 tekniker görev alacaktır. Yani otonomsuz çalışan ocaklarda 10 kişiye ihtiyaç varken, otonom ocaklarda 3-4 kişi yeterli olacaktır. Ayrıca, otonom sistemlerin klasik sistemlere göre birim zamanda %10 daha verimli çalışması durumunda çok daha az enerji-yakıt-sarf malzemesi, bakım-onarım vb tüketimleri olacaktır. Diğer taraftan, günlük çalışma miktarı 3 kat civarında artacağından bu tasarruf çok daha büyük bir önem kazanacaktır.

Çizelge 11. Otonomsuz ve otonomlu ocaklar için yıllık giderler

Gider Türü	Otonomsuz Tutar (\$/yıl)	Otonomlu Tutar (\$/yıl)
Demirbaş Amortismanları	377.000	417.938
Sarf Malzeme	8.000	7.000
İşçilik giderleri (sigorta dahil)	100.000	40.000
Elektrik	20.000	15.000
Dizel	85.000	70.000
İşletme	12.000	10.000
Toplam	602.000	559.938

Başabaş Noktasının Hesaplanması

Bu kısımda önce otonomsuz sonra ise otonomlu araçların çalıştığı ocak için başabaş noktaları hesaplanacaktır. Ancak, burada en önemli husus otonomsuz ocaklar günde 1 vardiya çalışırken, otonom araçların çalıştığı ocakların günde 3 vardiya çalışabileceği dikkate alınacaktır.

Başabaş üretim noktasının hesaplanmasında, birim blok satış değeri kayaç cinsine bağlı değişken olabilmekte birlikte yaklaşık $100\$/m^3$ alındığında;

$$\begin{aligned} \text{Otonomsuz başa baş üretim miktarı} &= 1.821.690\$/100\$/m^3 = \underline{18.217 m^3} \text{ iken} \\ \text{Otonomlu başabaş üretim miktarı} &= 2.089.690\$/100\$/m^3 = \underline{20.896 m^3} \text{ olacaktır.} \end{aligned}$$

Otonomsuz klasik bir ocakta yılda $4.800 m^3$ üretim olduğu ve mevsim şartlarından dolayı 9 ay fiili üretim yapılabileceği varsayıldığında;

Otonomsuz başabaş süresi= $18.217m^3/4.800/m^3yıl = \underline{3,80 yıl}$ (45,6 ay) olurken, Otonomlu ocaklarda günde 3 vardiya çalışabileceğinden yılda $14.400m^3$ üretim elde edilebilecek ve buna göre de;

$$\text{Otonomlu başabaş süresi} = 20.896m^3/14.400/m^3yıl = \underline{1,45 yıl} \text{ (17,4 ay) olacaktır.}$$

Otonom Ocakların Maliyet Değerlendirmesi

Görüldüğü gibi otonomlu sistemler her ne kadar satın alma maliyetlerini $((268.000\$/2.089.690\$/x100)$ %12,8 oranında arttırsa da, üretim hızını 3 kat arttırmasından dolayı yaklaşık 3 kat daha çabuk tüm yatırımı amorti edilebilmektedir. Özellikle madencilik hem teknik olarak hem de ekonomik açıdan riskli bir yatırım olduğu düşünüldüğünde, yatırılan paranın mümkün olan en kısa sürede amorti edilmesi özellikle istenilen bir durumdur. Doğaltaş ocaklarından otonom sistemlerinin kullanılması ve Maden4.0 olarak işletilmeye başlamaları; ilk yatırım aşamasında %12,8 gibi küçük bir maliyet artışına neden olurken, tüm yatırımın teorik olarak yaklaşık 18 ay gibi kısa sürede geri dönebilmektedir. Bu hesaplamalar her ne kadar kendi içerisinde sapmalar gösterecek olsa bile, bunun her durumda uygulanması hem verimliliği arttıracak, hem maliyetleri azaltacak hem de sermayenin hızlı bir şekilde geri kazanılması sağlanacaktır. Bu nedenle Maden4.0 uygulamalarının sadece bu örnekte gösterildiği gibi bir doğaltaş ocağında değil, mümkünse tüm madencilik işletmelerinde uygulanmasında büyük yarar görülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada dördüncü sanayi devrimi olarak nitelendirilen Endüstri4.0 kavramı kapsamında üretim teknoloji altyapısı için gerekli olan otonom donanımları ve sistemleri yardımıyla Maden4.0 kavramı

irdelenmiştir. Maden 4.0 kavramının, maden ocaklarını için ortaya çıkardığı teknoloji altyapısı sayesinde otonom mermer ocağı tasarımının altyapısı oluşturulmuştur.

2024 yılında madencilik sektörünün toplam 6 milyar dolar civarında ülkemize ihracat katkısı olmuş ve bu miktarın yaklaşık olarak 1,9 milyar dolar kısmını doğaltaş sektörü sağlamıştır. Bu miktarın %33'e yakını ise doğaltaş ham blok ihracatı oluşturmaktadır. Giderek artan hammadde talebi, yeni ocak yatırımlarını gündeme getirmekte ve halen işletilen ocakların makine parklarının revizyon ve güncellenmesini gerektirmektedir. Yurtdışındaki önemli ihracatçı ülkelerle olan rekabette geride kalmamak için ve mevcut pazar payını koruyabilmek için teknolojik yatırımların da artırılması gerekmektedir, yeni seçilecek makinelerin otomasyonel sistemlerle haberleşebilecek modellerinin tercih edilmesi gerekmektedir. Doğaltaş sektöründe kullanılan makine ve ekipmanların kendi kendine yönetebilen-karar alabilen bir sisteme dönüştürülmesi hedefiyle bu çalışmada, yeni deyimle “Doğaltaş 4.0 (Stone 4.0)” konusu araştırılmıştır.

Bu çalışmada, otonom mermer ocağı tasarımına uygun olarak gerekli donanım ve ekipmanlar, bu teknolojik altyapıya uygun bir şekilde seçilmiştir. Tüm otonom donanımları ise mermer ocaklarının oldukça ağır çalışma şartlarına (toz, çamur, ses, titreşim ve iklim vb.) uygun olan IP67 standartlarında seçilmiş ve ona göre fiyat ve teknik özellikleri saptanmıştır.

Bu çalışma sonucunda, orta ölçekli bir otonomsuz doğaltaş ocağı için gerekli olan makine ve ekipmanları için toplam yatırım maliyeti yaklaşık olarak 1.821.690\$ olarak hesaplanmıştır. Bu ocağa yapılan ilk yatırım maliyeti normal şartlarda yaklaşık olarak 3,8 yılda (45,6 ay) kendini amorti etmektedir. Otonomlu orta ölçekli bir doğaltaş ocağı için gerekli makine-ekipman, otonom donanımlar ve yazılım maliyeti ise yaklaşık olarak 2.089.690\$ olarak hesaplanmıştır.

Otonomlu doğaltaş ocağı 3 vardiya (24 saat) kesintisiz çalışmasından dolayı ilk yatırım maliyetini yaklaşık olarak kendini 1,45 yıl (17,4 ay) gibi kısa sürede amorti etmektedir. Bu hesaplamalardan görüldüğü gibi, yeni bir doğaltaş açmak için gerekli makine ve donanımlara ilaveten % 12,8'lik ek bir yatırımla %60 daha erken bir zamanda tüm maliyetlerin geri kazanımı mümkün olmaktadır. Buradaki hesaplamalar her ne kadar yaklaşık ve ideal şartlar altında düşünülerek hesaplanırsa da, elde edilen sonuçlar otonomlu ocakların az bir yatırım farkı ile ekonomik geri dönüşün çok daha fazla olacağını, madencilik gibi riskli sektörlerde sermaye geri dönüşünün kısa sürede olması ise en büyük avantajı olacağını ortaya koymaktadır. Ayrıca, halen çalışan ocaklardaki makinelerin bir kısmına yapılacak küçük otomasyonel ek yatırım ve güncellemelerle, birçok makine-ocanın otonomlu sistemlere dönüştürülmesi de mümkün olup, üretim süreçlerinin, verimliliklerinin ve maliyetlerinin anlık olarak denetlenebilir olmasını sağlamak ta mümkündür. Bu çalışmadan hareketle örnek birkaç doğaltaş ocağının otonomlu sistemlere dönüştürülmesi ile gerçek uygulama değerleri elde edilerek verimlilik ve maliyetlerin saptanması, Doğaltaş 4.0'ın Türkiye'de hızlı yayılmasına büyük etkisi olacağı ortadadır.

Bu ileri teknolojinin madencilik sektöründe kullanılmaya başlanmasıyla “Otonom Makineler/Madenciler” sayesinde, en az oranda oluşabilecek kazaların sonucunda kaybedilen sadece para olacak, artık insanlar hayatlarını maden ocak kazalarında kaybetmeyeceklerdir. Madencilik sektörüne toplumun bakış açıları bu yolla daha olumluya dönüştürülebilecektir. Diğer taraftan artık Endüstri 4.0 kavramı Toplum 5.0 kavramına göre evrilmekte olup, gelecekte madenciliğin de bu kavram paralelinde gelişmesi beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Abrahamsson, L., Löw, J., Johansson, J., 2019, Mining 4.0-The Impact of New Technology from a Work, XXXVI. Mining, Metallurgy & Exploration, 701-707.
- Akben, İ. ve Avşar, İ. İ., 2018, Endüstri 4.0 ve Karanlık Üretim: Genel Bir Bakış, Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi 3(1), 26-32.

- Keskin, M.Ö., 2017, Otonom madencilik; teknoloji ve riskler, Uluslararası Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve Güvenliği Sempozyumu, Ed: M. Altın, A.C. Özdemir, M. Yılmaz, Adana, 166-177.
- Klebanov, D., Rynnikova, M., Radchenko, D., 2017, Intelligent Mining Engineering Systems in the Structure of Industry 4.0, XXI. E3S Web of Conferences, Moscow, 1-7.
- Kurt, H. Yeşilkaya, L. Ersoy, M., Kekeç, B., 2016, Mermer ve Parlatılabilir Kayaçlar, Atlas Akademi Basımevi, İstanbul, 274 sf.
- Sishi, M.N., Telukdarie, A., 2017, Implementation of Industry 4.0 Technologies in the Mining Industry: A Case Study, IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 201-205.
- Soylu, A., 2018, Endüstri 4.0 ve Girişimcilikte Yeni Yaklaşımlar, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 32, 43-57.
- Sönmez, A.T., Mamurekli, D., Aydın, C., Deveci, H., 1996, Madencilikte Robotik Kontrol, Madencilik Dergisi, 35(2), 3-18
- Smoot, A., 2019, Collision Avoidance in Mining And Tunneling, Heavy Equipment For Heavy Jobs, 1(5), 76sf.

İnternet Kaynakları

- İnt. Kyn 1, Erişim Zamanı: 01.08.2025, <https://www.borusancat.com/tr>
- İnt. Kyn 2, Erişim Zamanı: 01.08.2025, <http://www.tataroglu.net/tr/12206/SVC-70>
- İnt. Kyn 3, Erişim Zamanı: 01.08.2025, <http://www.demmak.com/>
- İnt. Kyn 4, Erişim Zamanı: 01.08.2025, <https://www.plcmerkezi.com.tr/>

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE ASSESSMENT OF MINING MACHINERY: A LIFE CYCLE PERSPECTIVE

N. Demirel

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
(ndemirel@metu.edu.tr)

ABSTRACT

The challenges of global environmental problems around the world have become pressing and mining has been a significant component to such problems, contributing to the total global greenhouse gases emissions at about 8-10 percent of the total amount. The growing environmental needs and social license necessitate an immediate requirement to reduce the environmental impact of mining. Environmental performance of the mining machine is an important approach to the performance of a sustainable mining process that must involve holistic assessment as opposed to merely focusing on the operating periods of the equipment in use but instead the whole lifecycle. This review investigates how Life Cycle Assessment (LCA) has been used to assess the environmental performance of mining machinery and equipment. LCA offers a holistic model of measuring the environmental effects throughout the life cycle including manufacturing, operation, maintenance and disposal stages. The paper summarizes existing studies on application of LCA to the evaluation of mining equipment, examples of important environmental hotspots and performance measures. By evaluating case studies of different types of mining equipment, the review shows how LCA allows defining crucial lever points in order to apply interventions to minimize the environmental impact. In key findings, though the operational phases tend to dominate the burden to environment, there is much to be done in terms of posing effect mitigation with manufacturing and end-of-life phases based on enhanced design and circular-economy strategies. The paper concludes that comprehensive LCA-based environmental performance assessment is essential for developing sustainable mining machinery solutions that address growing environmental concerns while maintaining operational efficiency and social acceptance.

Keywords: Life cycle assessment, mining machinery, environmental performance, sustainability, greenhouse gas emissions

ÖZ

Dünya çapında küresel çevre sorunları giderek daha acil hale gelmiştir ve madencilik faaliyetleri bu sorunların önemli bir bileşeni olarak, toplam küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %8-10'una katkıda bulunmaktadır. Artan çevresel ve sosyal onay ihtiyaçları, madencilik faaliyetlerinin çevresel etkisinin azaltılması konusunda acil bir gereklilik ortaya çıkarmaktadır. Madencilik makinelerinin çevresel performansı, sürdürülebilir bir madencilik sürecinin önemli bir bileşenidir ve sadece kullanılan ekipmanın çalışma sürelerine odaklanmak yerine, tüm yaşam döngüsünü kapsayan bütünsel bir değerlendirme yapılmasını gerektirir. Bu inceleme, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)'nin madencilikte kullanılan makine ve ekipmanların çevresel performansını değerlendirmek için nasıl kullanıldığını araştırmaktadır. YDD, üretim, işletme, bakım ve imha aşamaları dahil olmak üzere yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri ölçmek için bütünsel bir model sunar. Bu bildiri, maden makinaları ve ekipmanlarının değerlendirilmesinde YDD'nin uygulanmasına ilişkin mevcut çalışmaları, önemli çevresel sorunlu alanlara ilişkin örnekleri ve performans ölçütlerini özetlemektedir. Farklı türdeki madencilik ekipmanlarına ilişkin vaka çalışmalarını değerlendiren bu inceleme, YDD'nin çevresel etkiyi en aza indirmek için müdahaleler uygulamak üzere kritik kaldiraç noktalarını tanımlamaya nasıl olanak sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, operasyonel aşamaların çevreye olan yükü domine etme

eğiliminde olsa da, gelişmiş tasarım ve döngüsel ekonomi stratejilerine dayalı olarak üretim ve ömür sonu aşamalarında da etki azaltma konusunda yapılacak çok şey olduğu bilinmektedir. Bu derleme çalışması, operasyonel verimliliği ve sosyal kabulü korurken, artan çevresel endişeleri ele alan sürdürülebilir madencilik çözümleri geliştirmek için kapsamlı bir YDD tabanlı çevresel performans değerlendirmesinin gerekli olduğu sonucuna varmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Yaşam döngüsü değerlendirmesi, maden makineleri, çevresel performans, sürdürülebilirlik, sera gazı emisyonları

INTRODUCTION

Global mining is under more pressure than ever on environmental conditions, with the industry accounting for 8-10 percent greenhouse gas emissions worldwide and presence of many resources diminishing (IEA, 2022). Mining equipment is one of the key elements of such environmental implications, and the classical evaluation considers only the operation periods and neglects production and disposal effects.

As defined by ISO 14040 (2006) in Life Cycles Assessment (LCA), a systematic environment-related assessment is focused on the whole life cycle of equipment, i.e. from extraction of raw materials up to the manufacturing process of equipment, its use and its disposal (Thorpe, 2004). This whole approach allows uninitiating environmental hotspots and optimization possibilities that could be missed by operational-oriented reviews.

Table 1. Primary Environmental Impact Categories of Mining Machinery

Impact Category	Primary Sources	Contribution (%)
Climate Change	Fuel combustion, electricity	60-75
Energy Depletion	Diesel fuel, grid electricity	15-25
Resource Depletion	Manufacturing, spare parts	5-15
Air Quality	Exhaust emissions, dust	8-12

Source: Compiled from Norgate & Haque (2010); Azapagic (2004); Durucan et al. (2006)

This paper aims to survey LCA applications, review cases studies, and offer suggestions about sustainable equipment practice.

The process of environmental assessment in mining has gone through a non-complex operation monitoring to the complex lifecycle assessment. Initial research was more on the direct operational effects, and it is revealed by Norgate & Haque (2010) that mining operations play a role in the 4-7 percent of all global energy consumed mainly using equipment in operation.

More recent researchers have developed to encompass upstream and downstream effects. Azapagic (2004) designed a framework on mining indicators of sustainable development and focused on the necessity of cradle-to-grave evaluation. Firstly, Durucan et al. (2006) proposed mining lifecycle modeling where they identified manufacturing phases to provide a contribution of 15-30 percent to overall environmental impacts.

LIFE CYCLE ASSESSMENT METHODOLOGY

Life Cycle Assessment (LCA) has come out as an important element in assessing and reducing environmental impacts of mining machines over the course of their life. Mining machinery plays a significant role in causing environmental degradation since the extraction of raw materials, manufacture, use, service, and even during disposal at the end of life are some of the processes that contribute to environmental degradation

via energy consumption, greenhouse gases emissions, and depletion of resources. Using LCA methodologies, researchers can measure these effects and determine some of the stages in the lifestyle of machinery that have the potential of creating the environment more friendly. As an example, the actual working process of mining machinery, especially diesel vehicles, becomes the key to the overall environmental impact because of large fuel consumption costs and emissions. To mitigate these burdens, LCA findings have suggested the move to electric or hybrid equipment, enhance the efficiency of the engine, and minimize periods of maintenance.

Environmental performance enhancement in the light of LCA not only helps in the reduction of the damage of the ecological area but facilitates regulatory compliance and sustainable development objectives. Sophisticated LCA software can assist in the choice of materials that are eco-efficient, develop modular designs to facilitate the recycling process, and develop innovative solutions in cleaner technologies. Moreover, the combination of LCA and digital technologies like IoT and predictive maintenance can be used to maximize the machine performance and prolong their lifespan, hence decreasing environmental loads. LCA can act in the context of mining as a diagnostic tool and a strategy since it is through this aspect that the industry players move to adopt greener equipment and newer practices in mining that are less harmful to the environment (Norgate & Haque, 2010).

The methodological framework that underpins LCA of mining machinery is the ISO 14040: (i) Goal and Scope Definition: Development of specific functionality units, system boundaries and assessment objectives based on mining operations, (ii) Inventory Analysis: Quantification of inputs and outputs (emissions, waste, etc.) in all stages of a product lifecycle, (iii) Impact Assessment: The conversion of the inventory data to possible environmental effects, using characterization factors, and (iv) Interpretation: Interpretation of results to define hotspots and areas of opportunity.

The application of LCA to mining machinery has a number of challenges with regard to methodology:

1. Functional Unit Definition: The functional units are different in different studies, hours of operation (Memary et al., 2012), tons of materials processed (Awuah-Offei & Adekpedjou, 2011) etc.
2. System Boundaries: There is no consistency in the definitions used in the determination of boundaries and in some studies there is no inclusion of end-of-life phases (Reid et al., 2009).
3. Data Quality: The poor availability of primary information results in the usage of generic databases (Paraskevas et al., 2016).

Given in the literature review, the environmental impacts of mining machinery can be ascribed to several different environmental impact types with peculiar features and contribution patterns. Climate change due to operational fuel use comes out as the key environmental issue and is a major contributor to operationalizing greenhouse gases over the lifecycle of the equipment (Wu et al., 2021). The category of impact is distinguished by direct emission of CO₂ during the diesel combustion in heavy methods of the machine engines, and the operation periods constituting between 60-75 percent of all the climate changes consequences.

The second massive category of impacts is resource depletion that largely occurs in the manufacturing process of steel (Kumar et al., 2018). The heavy steel consumption involved in the assembly of mining equipment, which usually extends to 150-400 tons of an average heavy machinery set, causes substantial loss of abiotic sources and related environmental demand. The scope of this category of impact goes past steel production; to a wide range of extraction of different metals and minerals needed in the special components like hydraulic systems, electronic control units, and wear-resistant materials.

Ecosystem impact is another important but, in most cases, neglected environmental issue and it occurs mainly through the processes of lubricant leakage, oil spills and atmospheric emission when using the equipment (Finnveden et al., 2009). Such effects relate to terrestrial and due to the water bodies contamination, groundwater pollution as well as air quality. Spatial patterns of these effects is highly variable based on the

environments of operation, the methods of maintaining them, as well as the establishment of environmental management standards on mining grounds.

LIFE CYCLE ASSESSMENT of MINING MACHINERY

Understanding the environmental impacts of mining equipment requires a comprehensive lifecycle assessment approach that evaluates three distinct phases: manufacturing, operation, and end-of-life. This analysis examines the relative contribution of each phase to total environmental burden and identifies key impact drivers within each stage. The following assessment synthesizes findings from multiple lifecycle assessment studies to provide a quantitative framework for understanding equipment-related environmental impacts across the mining sector.

The manufacturing phase accounts for 20-30% of total environmental impacts in mining equipment lifecycle assessments. Steel production represents the dominant contributor within this phase, responsible for 60-70% of manufacturing impacts. Component manufacturing constitutes 20-25% of manufacturing-related environmental burdens, while assembly and transportation activities contribute the remaining 10-15%. Research by Memary et al. (2012) and Paraskevas et al. (2016) demonstrates that significant environmental costs are incurred before equipment deployment at mining sites.

The operational phase constitutes the most environmentally intensive period, accounting for 60-75% of total lifecycle impacts. Fuel consumption emerges as the primary environmental burden within operations, representing 80-85% of operational impacts. Maintenance activities contribute 8-12% of operational environmental effects, while hydraulic fluids and spare parts account for 5-7%. Studies conducted by Norgate and Haque (2010) consistently identify fuel consumption as the predominant environmental hotspot, contributing 45-60% of entire lifecycle impacts across multiple assessment frameworks.

The end-of-life phase represents 5-15% of total environmental impacts, presenting both environmental burdens and resource recovery opportunities. Material recovery potential ranges from 40-60%, indicating substantial recyclability of equipment components. Dismantling and waste treatment processes account for 30-40% of end-of-life impacts, with final disposal representing 10-20% of this phase's environmental burden. Research by Kumar et al. (2018) and Reid et al. (2009) indicates that end-of-life management strategies significantly influence overall environmental performance. Lifecycle assessment studies consistently identify steel production during manufacturing as the second major environmental hotspot after operational fuel consumption, contributing 12-18% of total lifecycle impacts.

The lifecycle assessment of mining machinery and equipment depicts a distinct hierarchy of the environmental impacts where operational fuel consumption shows the highest environmental impact as amounting to 45-60 percents of the total impacts. The second key hotspot, steel manufacture at 12-18 % of total impacts, is manufacturing activity. These results imply that improvements in operating efficiency and alternative fuels should be the first areas of research that need to be carried out in environmental mitigation methods followed by sustainable production procedures and raw material selection. The high rate of material recovery of between during final stages implies that there is a high potential of ensuring that circular economy concepts play a massive role in ensuring that we reduce the total impact. Further studies need to resolve the question of standardization of the assessment methods to make comparisons of the results of different studies more reliable and to assist in making evidence-based choices of the equipment and managing options.

Off-Highway Mining Trucks

Lifecycle assessment studies of large capacity haul trucks have given a great deal of insight to the environmental performance of the trucks over the operating lifespan. Feng et al. (2022) examined the energy efficiency and CO₂ emission reduction potential of several emerging solutions for MHT, including diesel

hybrid, battery electric, and fuel cell hybrid for haul trucks and they revealed that the hybridization of diesel electric powertrain can significantly improve the energy efficiency and reduce the CO₂ emission. Studies of Keckojevic and Komljenovic (2011) and consequently Ključnikov et al. (2023) show that these giant vehicles produce about 45,000 tons of CO₂-equivalent emissions during their average 15-year useful life. Operation dominates the environment impact profile comprising an overwhelming majority of impacts totaling 72 percent of the total lifecycle global warming impact. The fuel consumption process of these trucks is extremely noteworthy, as each of them requires an estimated 2.8 million liters of diesel to operate over its reference period. This huge fuel demand relates squarely to the dominance of the operational stage in the environment impact assessment. Nevertheless, the analysis also demonstrates the high potential of environmental impact minimization gained due to technological enhancement.

Thompson et al. (2019) showed that a relatively small increase in fuel efficiency of 15 percent would decrease overall lifecycle effects by 10-12 percent, proving that more operating optimization strategies have disproportionately positive consequences. In circular economic terms, heavy haul trucks are a source of material recovery potential. Recycling potential of steel approaches 85 percent of the overall weight of the truck which offers a clear indication that recycling methods of end-of-life products can be used to cover manufacturing impacts. This very recyclability level indicates that the process of sustainable equipment management ranges far beyond the efficiency aspect and incorporates the full material stewardship process of equipment lifecycle.

Hydraulic Excavators

Lifecycle assessment of 200-ton hydraulic excavators illustrates that the impacts are spread across a different range than with haul trucks. Guerin (2002) indicates that manufacturing effects contribute to 28 percent of total lifecycle impacts of these machines, which is a larger proportion compared with haul truck assessments. Such a high manufacturing impact is explained by sophisticated hydraulic and high-quality engineering that engages in excavator operations. Hydraulic excavation has operational peculiarities that are relevant to the environment. Workforce - Hydraulic system maintenance contributes to 8 percent of the overall harm caused due to operation, is a major aspect that would necessitate different approaches in sustainable strategies.

Although this does put an additional burden on maintenance, it should be noted that the potential to recover end-of-life materials is carried out on a 78% by weight metric, showing there are still possibilities toward circular economy processes in heavy equipment management. Powerful modern technologies in the hydraulic system are the ways to decrease environmental impacts without doubt. Kanazawa et al. (2022) conclude that global warming potential (GWP) per mining machine throughout its lifecycle (LC) could be reduced by approximately 194 ton-CO₂eq./LC. Assuming that the number of mining machinery in operation at a global scale is 571 machines (or units) per year, the GWP would be reduced by approximately 110,000 ton-CO₂eq./year.

In comparison to conventional hydraulic systems, high-efficiency hydraulic systems can decrease operational energy use by 12-18 percent (Khan, 2023). In these efficiency gains, however, there are tradeoffs related to increased manufacturing complexity, providing an interesting example of why lifecycle thinking in technology selection and equipment specification processes should be comprehensive.

Drilling Equipment

Sustainable drilling techniques and innovations yielding increased efficiency and less impact on environment have recently been studied. Use of artificial intelligence and machine learning particularly in predictive modeling and resource optimization was discovered to increase recovery and decrease the environmental pollution (Chen et al., 2022). Rotary drill rig evaluation also gives information regarding

equipment with various operational cycle and environmental effects. The studies indicate that the great level of material and energy input is needed in the process of drilling in the mining environment setting. Operational efficiency of drilling equipment is highly geological-dependent as the efficiency differs by 25-40 % due to site-specific matter.

This variability is the key to the fact that the choice of equipment and optimization of its operation strategy on the basis of the peculiarities of mining and geological conditions are extremely important. Recent technological improvements in the drilling process have proven to have significant potential in the improvement of the environment, as well as operations. Long et al. (2024) and Kokkinis et al. (2024) have revealed that fully automated drilling systems significantly improve drilling efficiency when combined with a concurrent reduction of the operator exposure to such harmful conditions.

The results indicate that automation systems have the potential to provide multiple benefits in the areas of environmental performance, operational efficiency, and employee safety, such that innovation in one area may now become a multi-dimensional success, coupling industrial sustainability and operational excellence at the same time.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Based on this review, Life Cycle Assessment (LCA) can give vital information on the environmental performance of mining machinery. Major findings include that the greatest portion of environmental impacts, 60-75 percent, are emitted during the operational period which is majorly because of the consumption of fuel, thus the largest contributor to total emissions. Moreover, manufacturing has an impact of 20-30 percent of the lifecycle, which is, however, usually ignored in conventional analyses. The prospects of improvement or opportunity provision are also outlined such as improving fuel economy, implementing improved hydraulic, and implementing end-of-life machinery material recovery.

Nevertheless, it is hard to compare various studies because they have significant methodological issues. The major concerns are that the researchers employ varied system boundaries and operating assumptions to do their assessments. These discrepancies should be resolved to ensure that there is standard and consistent life cycle assessment of its practices in the mining industry.

Resting on these results, several industry recommendations are suggested. In the short run, the companies need to adopt fuel economy tracking and intervention initiatives, create detailed pieces of equipment regimes, and create effective material salvaging procedures on retired equipment. Medium term solutions must include incorporating LCA considerations into the purchasing of new equipment, the development of partnerships with manufactures to drive down elements of the life cycle, and to establish site-specific standards regarding environmental performance.

In the long term, the long-term objective of the industry would be to shift to electrified processes and machinery and renewable energy systems, to implement circular economy principles in the design equipment, and develop industry-wide LCA databases and standards. Future research efforts ought to build on dynamic LCA modeling, including operational variability, incorporating social and economic sustainability metrics, assessing emergent technology like autonomous systems and electrification, and normalizing LCA models that are specific to mining equipment.

Policy-wise, better performance of environmental functions will need regulatory schemes that encourage lifecycle perspective, financial inducements in implementing sustainable equipment, the development of worldwide standards of LCA, and improving cooperation among industries in sharing information and best strategies. A shift to sustainable mining equipment will require OEMs, mining companies, regulators and

research centers to act jointly around a set of sustainable mining equipment criteria as a set of evidence-based decisions centered around an LCA.

REFERENCES

- Awuah-Offei, K., & Adekpedjou, A. (2011). Application of life cycle assessment in the mining industry. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(1), 82-89.
- Azapagic, A. (2004). Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 12(6), 639-662.
- Chen, X., Du, X., Weng, C., Yang, J., Gao, D., Su, D., & Wang, G. (2024). A real-time drilling parameters optimization method for offshore large-scale cluster extended reach drilling based on intelligent optimization algorithm and machine learning. *Ocean Engineering*, 291, 116375. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116375>.
- Chugani, T. & Rahmani, R. (2025). Full emissions and energy consumption life cycle assessment of different Heavy-Duty vehicles powered by Electricity, Hydrogen, Methanol, and LNG fuels produced from various sources. *Energy Conversion and Management*, 326, 119439.
- Durucan, S., Korre, A., & Munoz-Melendez, G. (2006). Mining life cycle modelling: A cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1057-1070.
- Feng, Y., Liu, Qiang, Li, Y., Yang, J., Dong, Z. (2022). Energy efficiency and CO2 emission comparison of alternative powertrain solutions for mining haul truck using integrated design and control optimization. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 370, 10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133568>.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... & Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1-21.
- Guerin, T. (2002). Heavy equipment maintenance wastes and environmental management in the mining industry. *Journal of Environmental Management*, Vol. 66(2), 185-199.
- IEA. (2022). *Energy transitions and critical minerals*. International Energy Agency.
- ISO 14040. (2006). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- Kanazawa T., Matsumoto M., Yoshimoto M., Tahara K. (2022) Environmental impact of remanufacturing mining machinery. *Sustainability*, 14(13), 8118.
- Keckojevic, V. & Komljenovic, D. (2011). Haul truck fuel consumption and CO2 emission under various engine load conditions. *Mining Engineering*, 63(12), 44-48.
- Khan A.U. & Huang L. (2023) Toward zero emission construction: a comparative life cycle impact assessment of diesel, hybrid, and electric excavators. *Energies*, 16(16), 6025.
- Ključnikov, A., Siwiec, D., Pacana, A., & Lacko, J. (2023). Life cycle assessment (LCA) of heavy vehicles used in the mining industry. *Acta Montanistica Slovaca*, 28 (3), 553-565. <https://doi.org/10.46544/AMS.v28i3.03>
- Kokkinis, A., Frantsiz, T., Skordis, K., Nikolakopoulos, G., & Koustoumpardis, P. (2024). Machines, MDPI, 12, 845. <https://doi.org/10.3390/machines12120845>.
- Kumar, A., Holuszko, M., & Espinosa, D. C. R. (2018). E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 32-42.
- Long, M., Schafic, S., Kolapo, P., Agioutantis, Z., and Sottile, J. (2024). Equipment and Operations Automation in Mining: Review. *Machines*, MDPI, 12(10), 713. <https://doi.org/10.3390/machines12100713>
- Memary, R., Giurco, D., Mudd, G., & Mason, L. (2012).. *Journal of Cleaner Production*, 33, 97-108.
- Norgate, T., & Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, 18(3), 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>
- Paraskevas, D., Dadbakhsh, S., Vleugels, J., Dewulf, W., & Dufloy, J. R. (2016). Solid state recycling of pure Mg and AZ31 Mg machining chips via spark plasma sintering. *Materials & Design*, 109, 520-529.
- Reid, C., Bécaert, V., Aubertin, M., Rosenbaum, R. K., & Deschênes, L. (2009). Life cycle assessment of mine tailings management in Canada. *Journal of Cleaner Production*, 17(4), 471-479.

Wu., W., Sheng, L., Tang, F., Zhang, A., & Liu, J. (2021). A system dynamics model of green innovation and policy simulation with an application in Chinese manufacturing industry. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 987-1005. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.007>.

AÇIK İŞLETMELERDE SÜREKLİ SİSTEM DÖNER KEPÇELİ EKSKAVATÖR YÖNTEMİNDE ÜRETKENLİK
CONTINUOUS SYSTEM BUCKET WHEEL EXCAVATOR METHOD INCREASING PRODUCTIVITY IN OPEN-PIT

T. Mallı ^{1,*}, A.H. Deliormanlı ¹, C.O. Aksoy ¹
¹ *Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü*
 (*Sorumlu yazar: tahir.malli@deu.edu.tr)

ÖZ

Türkiye elektrik üretimi 2024 yılında %5.36 artarken elektrik tüketiminde ise %3.8 oranında artış gerçekleşmiştir. Türkiye elektrik üretiminde kömürün payı yaklaşık %35 düzeyinde olup %12'si linyit kömürüne dayalıdır. Linyit gibi yerli kaynaklarının etkin ve verimli kullanımı yükseltilmesi; elektrik enerjisi talebinin karşılanması ile birlikte sürdürülebilir enerji ve arz güvenliği açısından gereklidir. Bu yönden, linyit rezervlerinin ideal değerlendirilmesi ve işletmelerin olabildiğince yüksek verimlilikle çalışması gerekmektedir. Afşin-Elbistan Linyit (AEL) İşletmesi; 4.6 milyar ton görünür rezerv ile Türkiye toplam linyit rezervinin %22.6'sını oluşturmaktadır. Ayrıca toplamda yaklaşık 2800 MW kurulu gücündeki A ve B termik santralleri ile Türkiye linyite dayalı elektrik kurulu gücünün yaklaşık %24'ünü oluşturmaktadır. AEL işletilebilir rezervlerinin ve potansiyel elektrik kurulu gücünün; yüksek kapasiteli üretim planlaması ile maksimum ölçüde değerlendirilmesi gereklidir. Bu nedenle, döner kepçeli ekskavatörlerin daha etkin, yüksek üretkenlikle ve olabildiğince yüksek kapasitede kullanımı önemlidir. Böylelikle, sürdürülebilir ekonomik elektrik üretimlerinin gerçekleştirilmesi sağlanırken ülke linyit kömür kaynaklarının rasyo-ekonomik ve etkin değerlendirilmesi de olasıdır.

Anahtar Sözcükler: Açık işletme, sürekli sistem, döner kepçeli ekskavatör, üretkenlik, kapasite.

ABSTRACT

Türkiye's electricity production increased by 5.36% in 2024, while electricity consumption increased by 3.8%. Coal accounts for approximately 35% of Türkiye's electricity production, 12% of which is based on lignite. Increasing the effective and efficient use of domestic resources such as lignite is essential for generating electrical energy demand, ensuring the sustainability of the energy and ensuring supply security. Therefore, lignite reserves must be utilized and enterprises must operate at the highest possible efficiency. The Afşin-Elbistan Lignite Enterprise, with 4.6 million tons proven reserves, accounts for 22.6% Türkiye's total lignite reserves. Furthermore, its A and B thermal power plants, with a total installed capacity of approximately 2800 MW, account for approximately 24% domestic coal based installed power capacity. In this respect, AEL's exploitable mining reserves and potential installed electricity capacity must be maximum utilized through high-capacity production planning. Therefore, it is crucial to utilized bucket wheel excavators more efficient, with higher productive and maximum capacity. This will ensure sustainable electricity generation while enabling the rational-economical and efficient utilization of the country's lignite reserves.

Keywords: Open pit, continuous system, bucket wheel excavator, productive, capacity.

GİRİŞ

Türkiye elektrik üretiminde kömürün payı %35.18 düzeyinde olup %12.05'i linyite ve %23.13'ü ithal kömüre dayalıdır. Türkiye elektrik enerjisi üretimi bir önceki yıla göre %5.36 oranında bir artış gösterirken

elektrik enerjisi tüketimi ise bir önceki yıla göre %3.8 artış gerçekleşmiştir. Artan elektrik enerjisi talebinin karşılanmasında yerli kaynakların etkin ve verimli kullanımı, güvenilir ve ekonomik elektrik üretimi gerçekleştirilmesi yanısıra sürdürülebilir enerji ve arz güvenliği açısından oldukça önemlidir. Bu yönüyle, ülke linyit kömür rezervlerinin ve mevcut işletmelerin olabildiğince yüksek oranda değerlendirilmesi gerekmektedir. Türkiye yaklaşık 20.53 milyar linyit kömür rezervi ile Dünya kömür rezervlerinin %2.1'ine sahip bulunmaktadır. Rezervleri belirlenmiş santral kurulabilecek linyit sahalarının devreye alınması, mevcut santral kapasitelerinin geliştirilmesi mümkün görülmektedir. Linyit rezervleri ortalama 2500 kcal/kg kalori değerinin altında olduğundan üretimin %85'i termik santrallere yöneliktir. (MTA,2023). Afşin-Elbistan Linyit (AEL) İşletmesi; 4.6 milyar ton görünür rezerv ile Türkiye toplam linyit rezervinin %22.6'sını oluşturmakta ve yerli kömüre dayalı elektrik kurulu gücünün yaklaşık %24'ünü oluşturan 1355 MW kurulu güçteki A termik santrali ile 1440 MW kurulu güçteki B termik santrallerine kömür tedarik etmektedir. AEL işletilebilir rezervlerinin ve potansiyel elektrik kurulu gücünün; yüksek kapasiteli üretim planlaması ile maksimum ölçüde değerlendirilmesi gereklidir. Sürdürülebilir enerji ve enerji arz güvenliği için ekonomik elektrik üretimlerinin gerçekleştirilmesi sağlanarak ülke linyit kömür kaynaklarının rasyo-ekonomik ve etkin değerlendirilmesi de sağlanmalıdır.

Türkiye'de madencilik sektöründe tüm süreçlerde; daha ekonomik üretim gerçekleştirmek için girdi maliyetlerini düşürmek ve bunun için çalışan ana makina ve sistemlerin verimlilik düzeyleri ile kapasiteleri arttırmak gereklidir. Özellikle ülkemizde bu enerji ve elektrik maliyetleri olarak madencilığe yansımaktadır. Özellikle elektrik enerjisi üretimine yönelik planlanan açık kömür işletmelerde sürdürülebilir, verimli ve rekabetçi efektif üretimlerin sağlanmasını da gerektirmektedir. AEL İşletmesi işletmesi; yaklaşık 4 milyar ton görünür rezerv ülkemizin en büyük linyit havzası olup özellikle elektrik enerjisi üretimine yönelik olarak planlanmıştır. Yüksek kapasiteli üretimine dayalı planlanan işletmede sürdürülebilir, verimli ve ekonomik kömür üretimlerinin gerçekleştirilmesi açısından da oldukça önemlidir.

Enerji sektöründeki darboğaz ve madencilik realitesi, üretim kapasitelerinin artırılması yönündedir. Büyük rezervli kömür işletmelerinin efektif maliyetli değerlendirilmesi ancak yüksek kapasiteli kazı planlamasını gerektirmektedir. Özellikle kazı ve taşıma kapasitesinde yapılacak iyileştirme ve kapasite artışları, işletmelere önemli kazanımlar sağlanacaktır. Bu yönüyle, sürekli sistem döner kepçe ekskavatör + bantlı konveyör örtü-kazı yöntemi, yüksek kapasiteleri ile avantajlar sağlayabilmektedir. Almanya'da ve diğer ülkelerde olduğu gibi Türkiye'de Afşin-Elbistan linyit havzasında ekonomik olarak yüksek kapasiteli döner kepçeli ekskavatör (DKE) sisteminden yararlanılmaktadır. Özellikle elektrik enerjisi üretimine dönük kömür işletmelerin ekonomik üretimleri gerekliliktir. Ancak DKE kazıcıların ortalama ömürleri 30-35 yıl olduğu için kazı performansları giderek düşmekte verimlilik ile üretkenlik azaldığı için toplam kazı miktarında düşüşler de kaçınılmazdır. Buna karşın işletmede kapasite artışı sağlanması amacıyla sürekli kazı sistemi ile uyumlu konvansiyonel ekskavatör-kamyon yöntemi ile birlikte kombine örtü-kazı sistemi planlanmıştır. DKE'lerin performanslarının geliştirilmesi ve üretim önü kazı sahalarının ekskavatör-kamyon ile kazılması işletmecilik açısından zorunlu bir gerekliliktir.

DKE sürekli sistemlerinin yüksek kapasiteli kazı avantajı sağlaması ve elektrik tahrikli olması işletme için bir avantajdır. Bu nedenle sistemin iyileştirilmesi ve verimlilik ile birlikte kapasite artışı kazı maliyetlerinde minimizasyon sağlaması öngörülmektedir. Kapasite artışı sağlanamadığı durumlar için mutlaka sürekli kazı sisteminin konvansiyonel ekskavatör-kamyon yöntemiyle desteklenmesi ve yeni makine-ekipman ilk yatırımları gerekmektedir. Genişleme yatırımları kapsamında yeni ekskavatör ve kamyonlara ilişkin yatırımlar beraberinde amortismanları etkileyerek kazı maliyetlerinde yükselmeye neden olacaktır. Bu nedenle, DKE sürekli kazı sisteminde verimlilik artışının sağlanması işletme kapasitesinin de yükselmesini sağlayarak yeni ek yatırımlar ile amortisman şarjlarının minimize edilmesi olasıdır. Afşin-Elbistan Kışlaköy kömür işletmesinde; DKE+ bant konveyör sürekli sisteminin konvansiyonel ekskavatör-kamyon yöntemiyle kombine edilmesi ile kapasite artışlarının sağlandığı görülmektedir. DKE sürekli sistemindeki verimlilik artışları ve kombine sistemin uyumlu çalışması ile kazı ve üretim kapasiteleri yükseltilerek düşük amortismanlarla rekabetçi üretimlerin gerçekleştirilmesi öngörülmektedir. Böylelikle, açık işletmelerde sürdürülebilir, efektif

maliyetli üretimin gerçekleştirilmesi ile ülke kaynaklarından olabildiğince ekonomik-fayda sağlanması olasıdır (Mallı,2021).

Bu model çalışmada, AEL işletmesinde üretimlerinin kapasitesi artışlarının sağlanmasına yönelik DKE sisteminde yapılacak iyileştirmelerin etkisi öngörülme çalışılmaktadır. Böylelikle makinalarda yapılan iyileştirmelerle; işletme kapasitelerinin gelişimi sağlanarak maden işletmelerin güçlendirilmesi ve sürdürülebilirliklerinin artırılması sonucunda linyit rezervlerinin rasyonel ve ekonomik değerlendirilmesi olasıdır. Böylelikle, işletmelerinin daha rantabl çalışması sağlanarak, ülke kaynaklarından daha yüksek rasyo-ekonomik faydalar sağlanabilmesi de olasıdır.

TÜRKİYE KÖMÜR SEKTÖRÜNDE AEL

Türkiye kömür üretim değerleri son yıllarda düşüş trendinde olup 2024 yılında da devam ettiği görülmektedir. Türkiye kömür üretimi; 2018 yılında 100.83 milyon ton düzeyinde iken 2022 yılında üretim değeri 105.56 milyon ton seviyesine yükselmiştir. Ancak sonraki yıllarda düşerek 2024 yılında 88.84 milyon ton düzeyine gerilemiştir. Son yıllarda kömür üretim değerlerinde düşüş trendi sürmekte ve 2022 yılına göre yaklaşık % 15 ve 2018 yılına göre yaklaşık % 12 oranında gerilediği görülmektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Türkiye kömür üretim miktarları (MAPEG,2025)

Kömür üretim miktarları (ton)				
Yıl	Linyit	Taşkömürü	Asfaltit	Toplam
2024	86.777.354	1.385.780	684.058	88.847.792
2023	80.478.995	1.423.726	1.290.309	83.239.165
2022	102.097.456	1.794.712	1.499.605	105.576.399
2021	90.780.036	1.726.109	1.552.566	94.058.712
2020	84.811.522	1.613.624	2.444.416	88.956.400
2019	92.993.461	1.805.118	2.187.974	97.371.718
2018	97.017.695	1.620.682	1.808.405	100.831.833

Kömür sektöründe üretim miktarında önemli oranda düşüş olduğu ve bu trendin devam etmesi durumuna karşın sektör bilimsel bir bakış açısıyla yeni çözüm ve stratejiler geliştirmelidir. Madencilik sektörünün önemli bir alt kolu olan kömür madenciliği Türkiye’de önemli bir yere sahiptir. Ülkemiz kömür madenciliği sektöründe 2023 yılı verilerine göre işletme sayısı 9 kamu 438 özel sektör olmak üzere 447 işletme faaliyet göstermektedir. 2012 yılında işletme sayısı 51 kamu olmak üzere 756’ dır (MAPEG,2025).

Türkiye’de linyit kömür madenciliğinde yüksek miktarlarda üretim gerçekleştiren Afşin-Elbistan linyit işletmelerinde döner kepçeli ekskavatör bant konveyör örtü-kazı sistemine dayalı yüksek kapasitede kömür üretilmekte ve termik santrale beslenmektedir (Şekil 1). Ülkemiz linyite dayalı termik santral toplam kurulu gücün %24 oluşturan AEL Afşin-Elbistan linyit kömür havzası genelinde yapılan arama ve etüdler sonucu; 4.3 milyar ton görünür ve 3,4 milyar ton işletilebilir rezerv ile Kışlaköy açık işletmesi için yaklaşık 582 milyon ton rezerv belirlenmiştir AEL Kışlaköy açık işletmesinde 25 yıllık işletme planlamasına göre üretim hedefleri, yıllık bazda 20 milyon ton ve beş yıl sonrasında 27 milyon ton kömür üretimidir. Üretim hedeflerine yönelik dekapaj kazı kapasitesinin artırılması, DKE kazıcıların daha yüksek verimlilik ve kapasitede çalışmasının sağlanması böylece kömür üretim kapasitesinin yükseltilmesi planlanmaktadır. Kışlaköy Açık işletmesinde örtü tabakası dekapaj kazısı ve linyit kömür kazısında 2260 m³/h (yerinde) kapasiteli 6 adet DKE (döner kepçeli ekskavatör); döküm işleminde 5600 m³/h kazılmış kapasiteli 5 adet dökücü(absetzer) ve dekapaj + kömür nakliyat işlemi de yaklaşık 57 km uzunluğundaki bant konveyörler ile yapılmaktadır (Çelikler,2023).

Günümüzde, açık maden işletmelerinde artan üretim kapasitesiyle birlikte üretimin ekonomik olarak sağlanması önem kazanmaktadır. Bunun yanı sıra, kazılıp nakledilecek malzeme miktarının artması kazı, yükleme ve nakliye ekipmanlarının daha yüksek kapasitelere sahip olmasını gerektirmektedir. Maden makine-ekipmanları geliştirmekte olan yeni teknolojilerle, daha büyük kapasitelere erişmekte ve daha yüksek verimlilikler üretilebilmektedir. Böylelikle, açık işletme birim maliyetleri düşürülerek ekonomik açık ocak derinliği daha da derinleştirilmektedir (Çebi, 1987). Açık işletme madenciliğinde kömür ve dekapaj malzemesinin kazılıp taşınması işlemi, işletme ekonomisinde belirleyici olmaktadır. Bu nedenle, işletmelerde uygulanacak örtü-kazı sistemi ve uygun makina-ekipman seçimleri, kapasite ve verimlilik artışı için önem kazanmaktadır.



Şekil 1. Afşin-Elbistan linyit havzası Kışlaköy açık işletmesi ve DKE sistemi

Açık işletme madenciliği için makina-ekipman seçimi bir işletmenin ekonomik değerlendirmesini etkileyen, işletme tasarımı ve üretim planlamasında en önemli unsurlardan biridir. Planlamanın temeli, ideal işletme parametreleri ve makina-ekipmanlarla maliyet değerini olabildiğince düşürmektir. Açık işletmelerde planlama ve tasarımlarda teknik ve ekonomik kriterler ile birlikte çevresel kısıtların da dikkate alınması ve üretim maliyetlerini minimize edilmesini gerektirmektedir. Dolayısıyla bu problem bir optimizasyon problemidir. Açık işletme optimizasyonu, genel olarak rezerv, üretim planlama, üretim kapasitesi, koşullara uygun makine-ekipman planlaması ve tasarım alternatiflerinin ekonomik değerlendirilmesinden oluşmaktadır (Dohm,1979).

Sürekli madencilik sistemleri, Almanya açık işletmelerinden sonra Polonya, Romanya, Yunanistan ve Çek Cumhuriyeti gibi bazı Avrupa ülkelerinde adapte olarak uygulanmaktadır (Kavouridis,2008; Huss,2014). BWE, gevşek ve konsolide olmayan formasyonlarda büyük kapasiteli üretimler için en etkin makinedir. Ancak nispeten daha yüksek yatırımları karşılayacak düzeyde rezervlerin bulunması, geniş alanda yataklanma gerekmektedir. Almanya’da ortalama günlük çalışma süresi 3 vardiya devamlı olarak iyi şekilde adapte olmuş makine için 19.2 saat olduğu yılda 5000 saat aktif çalışma planlanabilmektedir (Atkinson,1971). Kontinus sistemlerin avantajı; düşük operasyonel giderler, yüksek sistem uyumluluğu, düşük emisyon, yüksek kapasitelerde (240,000 m³/gün) kazı performansı sağlamasıdır (Thyssenkrupp,2020). Kazılabilirliği ve makine performanslarını kesin olarak belirleyen örtü tabakası malzemesinin geometrik, fiziksel ve mekanik özelliklerinin döner kepçeli ekskavatörlerin verimliliği üzerindeki etkisinin tahmini, uzun vadeli maden planlama ve tasarım fazları için çok önemlidir (Galetakis,2014). Ayrıca, örtü tabakasında çoğunlukla çakıltaşları ve sert kumtaşlarından oluşan sert jeolojik oluşumlar, bağımsız olarak veya mevcut sürekli maden ekipmanı ile kombinasyon halinde kesikli işletme yöntemlerinin ekskavatör-kamyon ve/veya patlatma kullanılmasını zorunlu kılmaktadır (Galetakis,2016). DKE’ler sürekli kazıcı sistemler büyük yatırımlara gerektirdiğinden maksimum sürede yüksek verimlilikle çalışması gerekmektedir. Ayrıca, yumuşak kayalarda örtü-kazı sistemleri birim giderler açısından karşılaştırıldığında sürekli sistem Döner Kepçeli Ekskavatör + bant konveyör örtü kazı sisteminin ekskavatör kamyon sistemine göre daha ekonomik olduğu belirtilmektedir (Çebi,

1987). Özellikle elektrik enerjisi üretimine yönelik rekabetçi düşük maliyetli üretimlerin ekonomik zorunluluk olduğu işletmelerde yüksek kapasiteli döner kepçeli ekskavatör sisteminden yararlanılmaktadır.

Ayrıca, işletmede örtü-kazı oranı giderek yükselmekte; 2018 yılında R: 2.56 t/m³ iken günümüzde R: 3.11 t/m³ düzeyine yükselmiştir. Artan örtü-kazı oranıyla birlikte dekapaj hacmi beraberinde kazı ve nakliye sistemlerinde ilave kapasite artışı getirmektedir. İşletmede aktif çalışan DKE'lerin, ekskavatör-kamyon yöntemiyle desteklenmesi, yıllık 18 milyon tonu aşan üretim hedefleri için kombine uygulaması gerekli görülmektedir. İşletmede kapasite artışları kazı, yükleme ve nakliye operasyonlarda çalışacak ana makine-ekipman ilk yatırımlarını arttırırken işletme ekonomisini ve amortisman değerlerini de etkilemektedir. Özellikle yükleyici ile kamyonlar için kapasite ve sayısal artışlar, ilk yatırımları oldukça yükseltmektedir. Açık işletmelerde kazı-nakliye sistemlerinin planlamasında üretim kapasitesinin yükseltilmesi ile daha ekonomik avantajlı çözümler sağlanabileceği öngörülmektedir (Mallı,2021).



Şekil 2. Kışlaköy açık işletmesinde döner kepçeli ekskavatör

MODEL ÇALIŞMA

Model çalışmada, işletmede yıllık kömür üretim kapasite artışı ve kömür üretim hedeflerinin sağlanması için DKE kazıcı makinaların örtü-kazı yöntemi üzerindeki etkisi değerlendirilerek artan üretim kapasitesine göre kazı hacimleri ve gerekli ilave kazı kapasiteleri belirlenmiştir. Belirlenen kazı miktarlarına göre, teknik kısıtlar nedeniyle DKE sürekli sistem konvansiyonel ekskavatör-kamyon sistemi ile kombine uygulanmaktadır. İşletmede makinaların çalışma süreleri ve kapasite değişkenler dikkate alınarak yıllık kazı miktarları öngörülmektedir. İşletmede; DKE sistemine ve ekskavatör-kamyon yöntemi için parametre ve kabuller Çizelge 2'de verilmektedir.

Çizelge 2. İşletme parametreleri

Parametreler	Değer
DKE yıllık çalışma günü	345
DKE yıllık net çalışma saati (h)	3000-55000
DKE kapasite (m ³ /h-yerinde) (maksimum)	2260
Ekskavatör-kamyon sistemi yıllık çalışma saati	5220 (290 x 18)

Çizelge 2. İşletme parametreleri (devamı)

Parametreler	Değer
Kamyon taşıma mesafesi (m)	4000
Ortalama kamyon çevrim ort. süresi (sn)	927
Maden kamyonu hacmi (m ³)	60
Hidrolik ekskavatör kova hacmi (m ³) (ort)	11 m ³

Model çalışmada, açık işletmede örtü-kazı oranı (R); 3.2 t/m³ alınarak yıllık kömür üretim kapasiteleri 14.5 milyon ton ile 22.0 milyon ton arasında değişken alınarak yıllık bazda toplam kazı hacimleri belirlenmiştir. İşletmede örtü kazı dekapaj ve kömür üretim miktarlarına bağlı olarak işletmede DKE sürekli sisteminin 16.0 milyon m³ kömür ve 40.0 milyon m³ yıllık kazı kapasitesinin aşılması durumlarında ekskavatör-kamyon sistemine gereksinimi olmaktadır. İşletmede 14.5 milyon ton ve üzerindeki kapasiteli yıllık kömür üretimlerinde sürekli DKE sistemin konvansiyonel ekskavatör-kamyon sistemiyle kombine uygulaması kaçınılmaz görülmektedir (Çizelge 3).

Çizelge 3. İşletme üretim kapasitesi ve kazı programı

Kazı	2025	2026	2027
Kömür üretim hedefi (ton/yıl)	14,542,207	20,000,000	22,000,000
Kömür kazısı hedefi (m ³ /yıl)	11,100,921	15,267,176	16,793,893
Dekapaj miktarı (m ³ /yıl)	28,899,079	24,732,824	23,206,107
DKE toplam kazı miktarı (m ³ /yıl)	40,000,000	40,000,000	40,000,000
Ekskavatör-Kamyon sistemi (m ³ /yıl)	39,013,028	46,667,176	55,333,893
Toplam kazı miktarı (m ³ /yıl)	79,013,028	86,667,176	95,333,893

İşletmede üretim miktarlarına bağlı olarak örtü-kazı sistemi ana makina DKE kapasitesinin maksimum 2260 m³/h olması ve etkin çalışma süresinin en fazla 5500 h durumunda mevcut 6 adet DKE' ün 22.0 milyon ton kömür üretimi için yeterli olup olamama durumu araştırılmaktadır. DKE kazı miktarı 40 milyon m³/yıl mertebesinde ve toplam kazı hacminin yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır (Çizelge 4).

Çizelge 4. DKE kazıcı makinalara ait kazı değerleri

Kazıcı makina	Ortalama Kazı miktarı (milyon m ³)
DKE-1	4.29
DKE-2	4.99
DKE-3	2.75
DKE-4	7.70
DKE-5	6.21
DKE-6	3.59
Toplam	29.54

İşletmede DKE kazıcıların kazı miktarlarının olabildiğince yükseltilmesi birim kazı maliyetlerini düşmesini sağlayacağından ekonomik kazıların gerçekleşmesine de olanak sağlanacaktır. İşletmede son yıllarda toplam kazı miktarı içinde DKE kazılarının artarak % 60 yaklaştığı ve artırılması yönünde iyileştirme

çalışmaları planlanmaktadır. DKE kazı makinalarının toplam kazı içindeki yüzdesel pay değerleri Çizelge 5'te verilmektedir.

Çizelge 5. DKE kazı dağılım değerleri

Kazıcı makina	2024	2023	2022	2021
DKE-1	8.29	5.95	7.71	7.33
DKE-2	7.85	8.05	7.87	8.62
DKE-3	7.71	7.68	4.41	3.00
DKE-4	16.64	8.33	15.37	12.77
DKE-5	12.02	10.01	10.38	9.90
DKE-6	7.16	7.60	7.02	6.00
Toplam (%)	59.67	47.62	52.76	47.63

ANALİZ VE DEĞERLENDİRMELER

İşletme için yapılan model çalışmada DKE kazı kapasitesi ve yıllık çalışma sürelerine bağlı olarak kazıcı makinaların maksimum gerçekleştirebileceği kazı miktarları öngörülmektedir. İşletmede üretim hedefine ulaşılması için DKE kazıcıların yüksek kapasitelerde üretkenlik sağlaması gerektiği ya da bunun sağlanamadığı durumlar için çalışma sürelerinin olabildiğince artırılması gerekli görülmektedir. İşletmede DKE makinalar için öngörülen yıllık bazda kazı miktarları Çizelge 6'da verilmektedir.

Çizelge 6. DKE kapasite ve yıllık çalışma saatlerine bağlı öngörülen kazı değerleri matrisi

Kapasite	DKE kazı miktarları (m ³ /yıl)					
	3000 h	3500 h	4000 h	4500 h	5000 h	5500 h
1250 m ³ /h	3,750,000	4,375,000	5,000,000	5,625,000	6,250,000	6,875,000
1500 m ³ /h	4,500,000	5,250,000	6,000,000	6,750,000	7,500,000	8,250,000
1750 m ³ /h	5,250,000	6,125,000	7,000,000	7,875,000	8,750,000	9,625,000
2000 m ³ /h	6,000,000	7,000,000	8,000,000	9,000,000	10,000,000	11,000,000

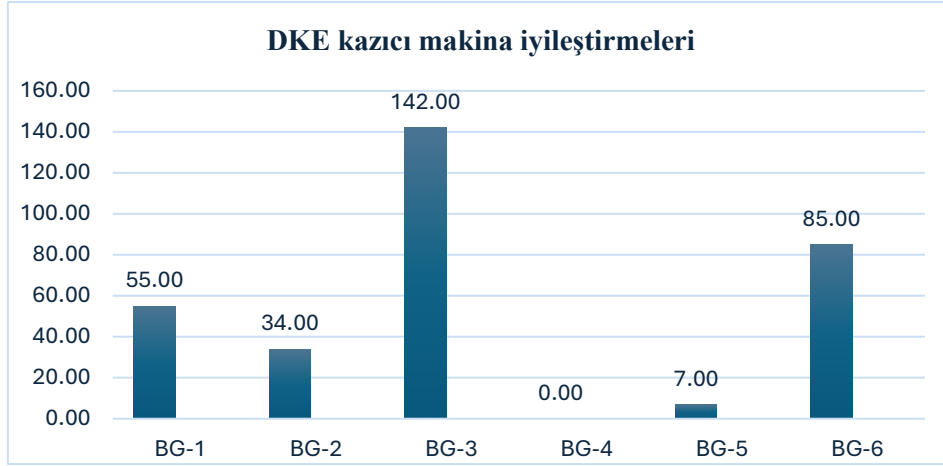
Model sonuçları ve analizlere göre; DKE kazıcı makinalar yüksek kapasiteli çalışmadığı durumlar için 1500 m³/h ortalama kapasitede 4500 saatlik çalışma öngörülmektedir (Çizelge 7).

Çizelge 7. DKE tahmini kazı değerleri

Kazıcı makina	İyileştirme
DKE-1	%55.48
DKE-2	%33.67
DKE-3	%142.54
DKE-4	%0.00
DKE-5	%7.40
DKE-6	%85.48

DKE kazıcılar için;

- 3000 saatlik ortalama çalışma yeterli olmadığı, 3500 saatlik ortalama çalışmanın ancak 2000 m³/h gibi yüksek kapasiteler için ancak yeterli olduğu görülmektedir.
- 4000 saatlik çalışma süresinde ve ortalama 1750 m³/h kapasitenin yeterli olduğu,
- 4500 ve 5000 saatlik ortalama çalışma durumunda 1500 m³/h kapasitenin yeterli olduğu,
- 5500 saatlik çalışmada ortalama 1250 m³/h gibi düşük kapasitenin yeterli olacağı görülmektedir.



Şekil 3. DKE kazıcı makineler için öngörülen iyileştirme yüzdeleri

İşletmelerde genel olarak kazıcı makina üretkenlik iyileştirmelerinde genel olarak; DKE kazıcı makinelerde yıllık çalışma sürelerinde iyileştirmeler sağlanarak üretkenlik ve verimlilik artışlarının sağlanmasına odaklanılmalıdır. Böylelikle işletme ve makinelerde sağlanacak iyileştirmeler toplamda operasyon giderleri ile genel maliyetlerin düşürülmesini de beraberinde sağlaması olasıdır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

DKE kazıcı makinelerin daha yüksek verimlilikle çalışmalarını sağlamak için iyileştirmeler gerçekleştirilerek yıllık kazı süreleri iyileştirilerek kömür ve dekapaj kapasitesinde önemli artışlar sağlanması olasıdır. DKE kazıcı makinelerde iyileştirmelerle gerçekleşen verimlilik ve kapasite artışları, işletmede sürdürülebilir ve daha ekonomik çözümleri de sağlayabilecektir. Böylelikle DKE kazı sistemindeki iyileştirmelerle gerçekleşen verimlilik ve kapasite artışları, yüksek kazı miktarı ile yüksek kömür üretimlerinin gerçekleşmesini ayrıca işletmede sürdürülebilir ve ekonomik olarak linyit kömürlerin değerlendirilmesini olanak sağlarken ülke kaynaklarının üst düzeyde rasyonel ve etkin kullanımı da olasıdır.

TEŞEKKÜR

Çalışmalar sırasında EÜAŞ ve Çelikler Holding yetkili ve mühendislerine yapmış oldukları değerli katkı ve öneriler için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Atkinson, T. (1971). Institution of Mining and Metallurgy, Transaction, July 1971. Açık işletmelerde kazı ve yükleme teçhizatının seçimi, (Çeviri) Ömer Ünver, Madencilik, Cilt 11, Sayı:5,36-72.

- Çebi, Y., Köse, H., 1987. A Computer Program for the Selection of Open-Pit Mining Equipment and Economical Evaluation of Open-Pit Mining Methods, *Proceedings of the Third International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, İstanbul. 417-420.
- Çelikler (2023). Afşin-Elbistan Elektrik Üretim ve Tic. A.Ş. Aylık Faaliyet Raporu, Ocak 2023.
- Dohm, G. C. Jr., (1979). Circular Analysis-Open Pit Optimization. Open Pit Mine Planning and Design, (Ed. Hustrulid, W., Kuchta, M.) Balkema Rotterdam, 1995, 625.
- Galetakis M., Papadopoulos S., Vasiliou A., Roumpos C., M. Theodoros, (2014). Development of an Expert System for the Prediction of the Performance of Bucket-Wheel Excavators Used for the Selective Mining of Multiple-layered Lignite Deposits. C. Niemann-Delius. (ed.), Proc. of the 12th International Symposium Continuous Surface Mining, Aachen 2014, 47-58.
- Galetakis M., Michalakopoulos T., Bajcar A., Roumpos C., Lazar M., Svoboda P., (2016). Project Bewexmin: Bucket Wheel Excavators Operating Under Difficult Mining Conditions Including Unmineable Inclusions and Geological Structures with Excessive Mining Resistance. 13th ISCSM 2016 Belgrade, 11-14 September.
- Huss W., (2014). Problems of Bucket-Wheel Excavators Body in Hardly Workable Grounds in Polish Open Pit Mines, C. Niemann-Delius. (ed.), Proc. of the 12th Int. Symp Continuous Surface Mining, Aachen, 59-71.
- Kavouridis K., Roumpos C., Galetakis M., Pavloudakis F., (2008). Methods and technological Improvements for the efficient removal of the overburden hard rock formations at South Field Lignite Mine, Ptolemais, Greece. Proceed of 9th International Symposium ‘Continuous Surface Mining’, 8-11 October 2008, Petrosani-Romania, 91-100.
- Mallı, (2021). Açık Kömür İşletmeleri Makina Planlamasında Örtü-kazı Sistemlerinin Yatırım Analizi. 8. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi, 8. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi Bildirileri Kitabı, 13-15 Ekim, 2021, İzmir, pp.96-105.
- MAPEG (2024). Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, Maden İstatistikleri, maden Üretim Değerleri. <https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik>
- M.T.A., (2023). MTA Kömür Arama Araştırmaları, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur-arama-arastirmalari>.
- Thyssenkrupp, (2021). Industrial Solutions, Continuous Mining Systems. www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/products-and-services/mining-systems/bucket-wheel-excavators.

MEKANİK KAZIDA BİLGİSAYAR UYGULAMALARI
COMPUTER APPLICATIONS IN MECHANICAL EXCAVATION

O.Z. Hekimoğlu

Emekli Öğretim Üyesi
(ozhekimoglu@gmail.com)

ÖZ

Mekanize sistemlerle kazı yapan makineler etkin özelliklerinden ötürü madencilik ve inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makineler değişken özellik gösteren ve genelde homojen olmayan kayaç gibi malzemelerin kazıldığı koşullarda duraylılığını yitirebilme ve hedeflenen kazı yönünden sapma gibi zorluklarla karşılaşmaktadırlar. Bu sorunlar daha çok otomasyon sistemleri ile çözülmektedir. Bunun yanı sıra kazı makinelerinde kesici uçların kesici kafa veya tamburlar üzerindeki etkin bir dizilimi ile verimli bir makine ve kazı performansı elde edilmektedir. Optimum bir dizilim için gereken parametrelerin etkin bir şekilde ilişkilendirilmesi gerekmekte ve bu da zaman alıcı karmaşık işlemler gerektirmektedir. Bu amaçla kesici kafa tasarımında bilgisayar destekli uygulamalar geliştirilmiştir. Bu bildiride etkin ve verimli bir kazı işlemi için kazı makinelerinde uygulanan otomasyon sistemleri ve bilgisayar destekli kesici kafa ya da tambur tasarımı konusunda yapılan çalışmaların genel bir değerlendirilmesi yapılmaktadır. Kazı mekanizasyonunda etkin bir kazı için uygulanan bazı otomasyon sistemleri anlatılmıştır. Ayrıca günümüzde kesici kafa tasarımında kullanılan bilgisayar programlarının temeli açıklanmış ve bunların algoritmasında bazı değişikliklerin yapılması hususları tartışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Mekanize kazı, madencilikte otomasyon, bilgisayar destekli kesici kafa tasarımı, .

ABSTRACT

Mechanical excavation has been widely used in various aspects of mining and civil engineering operations. Machines employed in mechanical are subject to deviation from targeted cutting direction and stationary position, due to difficulties arising from non-homogeneous nature of rock materials. excavation The stability problems as such are, to a greater extent, attempted to overcome by means of application of automation systems. Arrangement of cutter tools on the cutter head or drum, termed as cutter head design, is one of the important parameters affecting overall machine and excavation performance. For an efficient design, a rational combination of the parameters involving time-consuming and tedious calculation process are required to be accomplished in cutter head design. A number of computer-aided-design packages has, therefore, been developed in this respect. This paper evaluates, in general, the automation systems employed for machine stability and computer-aided-design packages developed for efficient machine performance. A number of automation systems employed in practice for smooth steering and machine stability was explained. Furthermore, fundamentals of current computer-aided-design packages were presented, and suggestions for improved cutting performance were explained and discussed.

Keywords: Mechanical excavation, automation in mining, computer-aided-cutter head design.

GİRİŞ

Mekanize kazı sistemleri madencilik ve inşaat mühendisliği alanında önemli bir kullanım alanına sahiptir. Mekanize kazı sisteminde kullanılan makinelerin önemli bir kısmı boyut, kapasite ve kurulu güç

açısından yüksek değerlere sahiptirler. Güvenli ve verimli bir performans için bu tür makinelerin çalışmaları sırasında düzenli ve etkin bir kumanda sistemi gerekli olmaktadır. Küçük kapasiteli makineler için de etkin bir kesme işlemi için kontrol mekanizmaları aynı şekilde gereklidir. Bütün bunların yanı sıra bu tür makinelerin tasarımı için de bilgisayar destekli teknikler gereklidir.

Çok hızlı gelişen bilgisayar teknolojisi mühendisliğin ve yaşamın birçok alanında da gittikçe artan bir uygulama haline gelmiştir. Mekanize sistemlerin kullanıldığı maden işletmelerinde yeraltında kullanılan tüm makineler birbirleriyle eşgüdüm içerisinde olacak şekilde yeryüzünde tek bir merkezden kumanda edilmekte ve performans gözlemleri yapılmaktadır. Ülkemizde böyle bir uygulama ilk kez TKİ Kurumuna bağlı Çayırhan Linyit Madeninde yapılmıştır (Hekimoğlu v.d., 1989). Bu tür ocak gözlem ve kumanda sistemlerinde başlangıçta veri iletim hızı ve bunların aynı anda birden fazla kanallara iletiminde yetersizlikler bulunmaktaydı. Ancak gelişen bilgisayar teknolojisi ile bu sorunlar önemli ölçüde giderilmiştir. Türkiye’de faaliyet gösteren birçok yeraltı kömür ocaklarında bugün gelişmiş bilgisayar teknolojisinin kullanıldığı etkin ocak gözlem sistemleri kullanılmaktadır.

Gelişen bilgisayar teknolojileri bu haliyle kazı mekanizasyonu alanında da önemli ölçüde kullanılmaktadır. Burada genel anlamda iki tür kullanım amacının olduğu görülmektedir. Bunlardan birincisi kazı makinesinin kazı sırasında duraylılığının korunması ve kazı pozisyonundan sapmamasının sağlanmasıdır. İkinci amaç ise makine tasarımında özellikle kazı makinelerinin kesici kafa ya da tambur üzerindeki kesici uçların optimum konumunda dizilimleri ile ilgilidir. Her iki konuda da bugüne kadar çeşitli uygulamalar bulunmaktadır. Kesici kafa tasarımında bilgisayar uygulamaları birçok yerde görülmesine karşın, bunlardan en etkin olanının 1980 li yılların başında İngiltere’de yapılan çalışmalar olduğu görülmektedir (Hurt v.d., 1986). Burada geliştirilen bir bilgisayar program paketinde kazı makinelerinin kesici kafa ve tamburların tasarımında keskinin en etkin bir şekilde kazı gerçekleştirebilmeleri için tork ve tepkime kuvvetlerinin büyüklüğü ile bunlardan kaynaklanan titreşimlerin geniş bir analizi yapılarak, kesici kafanın performansı önceden ortaya konulmaktadır. İngiltere’de geliştirilen bilgisayar destekli kesici kafa tasarımında (Computer-aided Cutter head Design) kullanılan algoritma bugün dünyada çeşitli versiyonlarda halen kullanım alanı bulmaktadır. Oldukça etkin olan bu programda yine de düzeltilmesi ve araştırılması gereken halen bazı önemli konuların var olduğu anlaşılmıştır.

Bu makalede, bilgisayar teknolojilerinin maden ve inşaat mühendisliği alanında kullanılan kazı makinelerindeki uygulamalarından söz edilmektedir. Makinelerin kazı duraylılığının sağlanması konusunda uygulanan bazı yöntemler açıklanmıştır. Ayrıca günümüzde kazı makinelerinin kesici kafa ya da tambur tasarımında kullanılan bilgisayar programının algoritması ve program çıktıları anlatılmıştır. Günümüzde en etkin olarak kullanılan bilgisayar programında düzeltilmesi yada yeniden gözden geçirilmesi gereken hesaplama tekniklerinin neler olduğu açıklanmış ve bunların nasıl giderileceği konusunda bazı öneriler sunulmuştur.

MAKİNELERİN KAZI SIRASINDAKİ DURAYLILIKLARININ KORUNMASI İLE İLGİLİ OTOMASYON UYGULAMALARI

Kazı makineleri genel olarak kayaç, kömür, sert toprak ve beton gibi değişken özellikteki malzemelerin kazısında kullanılırlar. Özellikle kayaç ve kömür gibi malzemeler yapıları itibarıyla homojen özellik göstermezler ve bu değişken yapı nedeniyle makinenin kesme sırasındaki hızını ve duraylılığını olumsuz olarak etkilerler. Yeraltı kömür kazılarında özellikle kömür-kayaç arayüzünde iki farklı malzemenin aynı anda kesilmesi söz konusu olabilmektedir. Kömür kazısında kullanılan tamburlu kesiciler genel olarak kömür gibi yumuşak malzemelerin kazısına uygun olacak şekilde tasarlandıklarından ötürü özellikle sert kayaçların kazısına uygun değildir. Tabaka düzleminin düzgün olmadığı durumlarda tamburun kazı sırasında tavan ya da taban kayacın bir kısmını da kesme durumunda kalmakta olduğu sıklıkla gözlenen durumlardır. Tamburun yalnızca kömür içinde kazı yapıp bu sınırlar dışına çıkmaması için bazı teknikler kullanılmıştır. Bunlardan İngiltere’de 1980 li yılların başında geliştirilen ve kömür ile kayacın radyoaktif davranış farklarını temel alan

bir otomasyon sistemi kullanılmıştır. Buna göre tambur koluna yerleştirilen bir cihaz üzerinden kayaca beta ışınları gönderilerek kayaçtaki radyasyon davranışının büyüklüğü saptanarak, bu değer daha sonra kömürün davranış değerleri arasındaki fark ile karşılaştırılmıştır. Kayaç ve kömür içerisinde bulunan radyoaktif madde miktarı genelde farklılık gösterdiğinden dolayı makineye gönderilen bu sinyaller arasında da fark bulunmaktadır. Bu fark aygıt tarafından algılandığında tambur kayaç içerisinde kesme yapmamakta ve kömür içerisindeki kesme konumunu korumaktadır.

Galeri açma makinelerinde değişen kayaç özellikleri nedeniyle makineye etkiyen anlık tepkime kuvvetleri de değişmektedir. Böyle koşullarda makinenin kesme konumu ve doğrultusu önceden belirlenmiş hedef değerlerden sapma gösterir. Bu durumda galerinin hedeflenen kesit geometrisi değişir ve bununla birlikte galeri ekseninde oluşan sapmalar nedeniyle kazı ve tahkimat maliyeti artar. Bunun önlenmesi için makine üzerine, otomasyon ve bilgisayar sistemleri yardımıyla galeri kesit profilindeki sapmaları algılayan aygıtlar yerleştirilir. Bu aygıtlar, makinenin kesme sırasındaki yatay ve düşey eksenlerdeki sapmaları anlık olarak algılar ve hedef kesit koordinatları ile karşılaştırır. Herhangi bir sapma sinyali alındığında makinenin hareket sağlayan itme silindirleri v.b. elemanlarına müdahale ederek sapmayı giderir ya da en az düzeye indirir (Zhang v.d., 2023). Kazı mekanizasyonunda makineler kesme sırasında oluşan titreşimlerden olumsuz olarak etkilenirler. Bunlar makineye zarar verdikleri gibi doğrultudan sapmalara da neden olurlar. Son zamanlarda makinenin normal titreşim düzeyinden yüksek titreşimleri algılayarak çalışmayı dengeleyen otomasyon sistemleri de kullanılmaktadır.

KESİCİ KAFA VE TAMBUR TASARIMINDA BİLGİSAYAR DESTEKLİ UYGULAMALAR

Kesici kafa ve tambur tasarımında kesme görevini gören kesici uçların dizilim düzeni yada kesici kafa/tambur tasarımı olarak bilinen konu büyük önem taşımaktadır. İyi bir tasarım ile bireysel keski kuvvetleri düşerek tork ve tepkime kuvvetlerinin de düşmesine neden olur. Bu sayede makinenin ömrü artar, daha az bakım ve arıza oluşur. Ayrıca iyi bir keski dizilim tasarımı ile kesici uçların ömrü artar, keski körelmesi azalarak toz ve ince malzeme oluşumu da en aza indirgenir. Keski diziliminde etkin olan parametreler çok genel olarak kesme derinliği, kesiciler arasındaki mesafe, keski eğim açısı, spiral sayısı ve bir kesme hattındaki kesici uç sayısı olarak verilebilir. Bu parametreler daha önceki çalışmalarda ayrıntılı olarak verildiği için burada ayrıca değinilmeyecektir (Hekimoğlu, 1984). Etkin ve verimli bir tasarım için bu parametrelerin bir arada birbirleriyle ilişkili olarak gözetilmeleri gerekmektedir. Bunun için keski kuvvetlerinin tayini ve bunu izleyen tork ve tepkime kuvvetlerinin büyüklüğü ve bunlardan kaynaklanan titreşimler üzerinde dikkatli bir analiz yapılması gerekmektedir. Ancak burada sözü edilen parametrelerin hesaplanması ve birbirleriyle ilişkilendirilmesi çok zaman alıcı ve karmaşık işlemler gerektiren süreçlerdir. Bunu gidermek için bu alanda bilgisayar programları geliştirilmiştir.

Kesici kafa veya tambur tasarımında bilinen en etkin bilgisayar uygulamaları ile ilgili çalışmalar İngiltere Kömür İşletmeleri Kurumunun Araştırma ve Geliştirme Bölümünde yapılmıştır (Hurt v.d., 1986). Bir paket halinde ticari olarak uygulamaya sunulan bu bilgisayar programının giriş verileri ve çıktıları genel hatlarıyla aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- Kesilen malzemenin türü ve özellikleri tanımlanır.
- Kesici kafa ya da tamburun boyutları ile birlikte kullanılacak kesici uçlar ve bunların tutucularının boyutları belirtilir.
- Bu verilere göre kesici kafa üzerine yerleştirilecek toplam kesici uç sayısı saptanır.
- Bu kesici uçların birbirleriyle çakışabilecek konumları gözetilerek imalat fizibilitesi belirlenir.
- Kesicilerin optimum konumunu elde etmek amacıyla için tork, tepkime kuvvetleri ve bu parametrelerdeki titreşim karakteristikleri hesaplanır.

Bu bilgisayar program paketinin uygulamada başarılı sonuçlar vermesi üzerine dünyanın çeşitli yerlerinde yaygın kullanım alanı bulmuştur. Bu bilgisayar programının en önemli işlevlerinden birisi kesici

uçlara etkiyen bireysel kesme kuvvetlerini belirleme yöntemidir. Bu değer belirlendikten sonra kesici kafaya etkiyen tork ve tepkime kuvvetlerinin büyüklüğü hesaplanır. Bu hesaplama sonucu elde edilen değerler ile kesici kafanın titreşim karakteristiği yani programdaki diliyle ‘dengesi’ ortaya çıkarılarak optimum tasarıma ulaşılır. Burada haliyle en hassas konu bireysel kesme kuvvetlerini belirleme yöntemidir. Çünkü bu değer temel alınarak tork ve tepkime kuvvetleri hesaplanmaktadır. Programın algoritmasında, bireysel kesme kuvvetleri her bir kesici ucun süpürdüğü alanın miktarına orantılı olacağı kabulüne göre hesaplanmaktadır. Bunun için daha önce belli özelliklere sahip bir kireçtaşı üzerine yapılan yoğun laboratuvar ölçekli kesme deneyleri sonucu elde edilen ve aşağıda verilen ampirik bir formül kullanılmaktadır ((Hurt v.d., 1988):

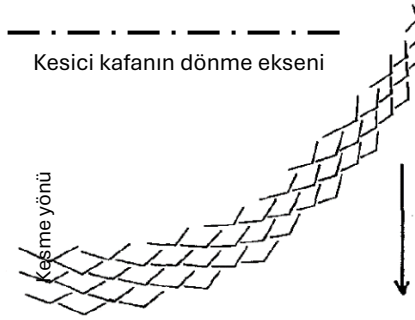
$$F_c = 2,4 + 0,0064 A \quad (1)$$

$$F_n = 1,5 F_n \quad (2)$$

Burada;

- F_c = Kesme kuvveti bileşeni (kN),
- F_n = Normal kuvveti bileşeni (kN),
- A = Keskinin süpürdüğü alan (mm^2).

Kesici uçların tambur ya da kesici kafa üzerinde yerleştirilmesi yapıldıktan sonra kesici kafanın bir dönüşü sırasında her bir kesici ucun süpürdüğü alanları gösteren bir kırılma (breakout) diyagramı program tarafından çizim olarak oluşturulmaktadır. Her bir alan hesaplanarak bireysel kesme kuvvetleri belirlenmektedir. Bir galeri açma makinesi için oluşturulmuş tipik bir kırılma diyagramı Şekil 1 de gösterilmiştir.



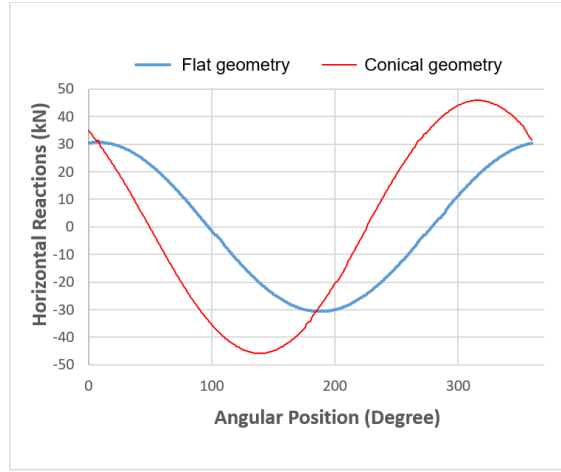
Şekil 1. Bir galeri açma makinesi için oluşturulmuş tipik bir kırılma diyagramı.

Burada tartışmaya değer olan en önemli konu programın ana temelini oluşturan bireysel kesme kuvvetlerinin hesaplanmasında esas alınan yöntemdir. Yönteme göre bireysel keski kuvveti genel anlamda kesici ucun süpürdüğü alana orantılı olduğu kabul edilmektedir. Ancak kesici kafa tasarımında birçok dizilim konfigürasyonları gözetildiğinde aynı keski alanı süpürüldüğünde bireysel kesme kuvvetlerinin de farklı olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir. Örnek olarak tamamen eşit koşullarda ancak farklı spiral sarılma açıları makine kesme yaparken aynı alanın süpürülmesine karşın bireysel kesme kuvvetlerinin farklı olduğu anlaşılmıştır (Hekimoglu ve Ozdemir, 2004). Aynı şekilde, bir kesme hattındaki kesici uç sayısının tek ya da çift olmasına bağlı olarak tamamen eşit kesme koşullarında aynı kesit alanını süpüren bireysel kesme kuvvetlerinin farklı olduğu belirtilmiştir (Hekimoglu, 2018a). Bu nedenle bu hesaplama yönteminin farklı keski konfigürasyonlarının da önüne alınarak yapılmasının daha gerçekçi olacağı savı öne çıkmaktadır. Yukarıda sözü edilen bu farklılıklar göz önüne alınarak bireysel kesme kuvvetlerinin süpürülen alan üzerinden belirlenmesi için aşağıdaki ampirik bağıntı önerilmiştir (Hekimoglu, 2018b):

$$F_c = 0,3942 + 0,0124 A \quad (3)$$

Bu bağıntı, daha önceki bağıntı gibi tek bir kayaç örneği üzerinde yapılan yoğun laboratuvar kesme deneyleri sonucu belirlenmiştir. Bunun geliştirilmesi için farklı dizilim konfigürasyonlarında daha ayrıntılı araştırma çalışmalarının yapılması çok yararlı olacaktır.

İngiltere’de 1980’li yılların başındaki koşullara göre geliştirilen bu bilgisayar programında kullanılan yöntemler ve çıktılar, kullanışlı ve güvenilir olması nedeniyle bugün halen kullanılmaktadır. Ancak bilgisayar ve bilgi teknolojilerinde oluşan hızlı gelişmeler ile bu programlar çok daha kullanışlı hale getirilebilir. Bu programda gözetilen titreşim analizi aynı zamanda tünelcilik ve inşaat mühendisliğindeki temel ve kanal kazısında kullanılan makineler içinde kullanılabilir. Örneğin bir tam cephe tünel açma makinesinde (TBM) konik ve kubbeli şekilli kesici kafaların karşılaştırılmalı titreşim analizi Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 1. Bir tam cephe galeri açma makinesinin (TBM) konik ve kubbeli şekilli kesici kafaların karşılaştırılmalı titreşim analizi.

SONUÇLAR

Günümüzde madencilik ve inşaat mühendisliği alanında kullanılan mekanik kazı makinelerindeki otomasyon ve bilgisayar uygulamalarının genel bir tanımı verilmiştir. Makinenin kesme konumu ve kesme doğrultusunda oluşabilecek olası sapmaların önlenmesi için otomasyon sistemleri kullanılmaktadır. Günümüzde gelişen teknolojiler ile bu otomasyon uygulamaları çok daha ileri düzeye getirilmiştir.

Mekanik kazıda kullanılan kesici uçların makinenin tamburu ya da kesici kafaları üzerindeki yerleşim konumları çok önem taşımaktadır. İyi bir tasarım ile makinenin ömrü artar ve maliyet düşer. Optimum tasarımın elde edilmesi zaman alıcı ve karmaşık hesaplamaları gerektirdiğinden bu alanda bilgisayar programları kullanılmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bilgisayar programında özellikle bireysel kesme kuvvetlerinin hesaplanması konusunda bazı eksikliklerin olduğu anlaşılmaktadır. Bunun giderilmesi için kapsamlı laboratuvar ve arazi deneylerinin yapılması çok yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Hekimoğlu, OZ, (2014). Studies on increasing the performance of chain saw machines for mechanical excavation of marbles and natural stones, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 72, December, pp. 230-241.
- Hekimoğlu, O.Za., A pick force calculation method suggested for tool lacing of mechanical excavators employing drag tools, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, (2018) Vol. 32, No. 8, 564-585.

- Hekimoglu, O. Zb., Investigations into tilt angles and order of cutting sequences for cutting head design of roadheaders. *Tunnelling and Underground Space Technology* 76 (2018) 160–171.
- Hekimoglu, O. Z., Karaman, H., Demir, İ., OAL'de ocak gözlem sisteminin pratik uygulaması, *Madencilik*, Sayı 3, cilt XXV, Eylül 1989.
- Hekimoglu, O.Z. and Ozdemir, L., 'Effects of Angle of Wrap on the Performance of Continuous Miners and Drum Shearers, *Trans. Inst. Min. Metall. A*, Vol. 113, No. 2 2004.
- Hurt K. G., Morris C. J. and Mullins R. Developments in coal cutting techniques. *The Mining Engineer*, 145, May 1986, 467-77.
- Hurt K. G., MacAndrew K. M. and Morris C. J. Boom roadheader cutting vibration: measurement and prediction. In *Proc. conf. applied rock engineering* (Newcastle upon Tyne, 1988), 89-97.
- Zhang, D., Liu, S., Li, S., Zhu, Q. and Niu, X., Roadheader's Pitch and Yaw Pose Deviation Compensation Control by Cutting Mechanism Motion to Improve Excavating Efficiency. *Available at SSRN 4589744*. <https://ssrn.com/abstract=4589744>

**NEVŞEHİR BENTONİTLERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLME SÜREÇLERİNİN VERİMLİLİĞE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**
*INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ENRICHMENT PROCESSES ON THE EFFICIENCY OF
NEVŞEHİR BENTONITES*

A.K. Özdoğan ^{1,*}, Y.Y. Özpamuk ², H. Akıncı ³, A. Akbulut ¹

¹ *Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara*
(*Sorumlu yazar: akozdogan@gmail.com)
² *KB Bentonit Mad. A.Ş., Nevşehir*
³ *Irmak Dan. Müh. Ltd. Şti., Ankara*

ÖZ

Kil mineralleri ikincil mineraller grubu içinde yer almaktadır. Bentonit (smektit) grubu ise sağladığı katma değer, kullanım alanları ve üretim miktarları açısından kil mineralleri arasında önemli bir yere sahip olarak değerlendirilmektedir. Çok çeşitli alanlarda kullanılması ve rezerv potansiyelinin yüksek olması sebebi ile bentonit üretimine ilgi her geçen gün artmaktadır. Bentonit üretiminde Türkiye Dünya’da ilk üç ülke arasında kendisine yer bulmaktadır. Doğal kaynakların verimli şekilde işletilerek kullanılması ekonomik kalkınmanın temel ilkeleri arasında bulunmaktadır. Hammaddelerin uç ürün haline getirilmesinde hammaddenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine uygun şekilde tasarlanmış makine ve ekipmanların seçilmesi ile verimli işletme koşulları oluşturulabilmektedir. Ticari anlamda gelişmiş sıvı emici, şişme kapasitesine sahip olan Nevşehir bentonitleri ve Türkiye genelinde yer alan diğer bentonit ocaklarından tüvenan halde çıkarılan bentonit killerin uç ürün haline getirilerek pazara sunulması sayesinde sürdürülebilir ekonomik kalkınma koşullarına bu alanda olumlu etki sağlamaktadır. Bu çalışmada Nevşehir bentonitlerinin hammaddeden uç ürün haline getirilmesinde kullanılan makineler ile ilgili bilgi verilmekte ve ekonomik olarak etkileri açıklanmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Bentonit, hammadde, uç ürün, Nevşehir

ABSTRACT

Clay minerals are classified as secondary minerals. The bentonite(smectite) group is considered to be of significant importance among clay minerals in terms of added value, areas of use and production volumes. Interest in bentonite production is growing day by day due to its wide range of uses and high reserve potential. Türkiye ranks among the top three countries in the world in bentonite production. The efficient use of natural resources is one of the fundamental principles of economic development. Efficient operating conditions can be created by selecting machinery and equipment designed to suit the physical, chemical and mechanical properties of raw materials in the process of converting raw materials into finished products. In commercial terms, Nevşehir bentonites, which are highly absorbent and have a high swelling capacity, and bentonite clays extracted in their raw state from other bentonite mines throughout Türkiye are processed into end products and marketed, thereby contributing positively to sustainable economic development in this field. This study provides information about the machinery used in the processing of Nevşehir bentonite from raw material to finished product and explains its economic impacts.

Keywords: Bentonite, raw material, end product, Nevşehir

GİRİŞ

Tane boyutunun 0.02 mm'den daha küçük olduğu ince taneli kimyasal birleşiminde alüminyum ve magnezyum silikat olan plastik davranış sergileyen doğal oluşumlar kil olarak adlandırılmaktadır. Bunun yanında teknik olarak plastik ve birleştirici özelliklere sahip olan kurutulduğunda küçülen, ıslatıldığında şişen ve sıkıştırıldığında içerisindeki suyu atan koloidal oluşum olarak adlandırılmaktadır (Özpamuk, 2018).

Killer grubu mineraller hiçbir zaman saf halde ve geniş alana yayılmış halde bulunamamaktadır. İhtiva ettiği alüminyum silikatlarla birlikte demir, magnezyum, kalsiyum, sodyum vb. mineraller safsızlıkları oluşturmakta ve ürün elde etmek için bir takım zenginleştirme işlemlerine tabi tutulmaktadır.

Killerin hammadde olarak değerlendirmesi için özelliklerine uygun olarak killerin mineralojik ve jeolojik özellikleri göz önünde bulundurulmaktadır. Bu bağlamda killer sahip olduğu farklı özelliklere göre sınıflandırılmaktadır (Akbulut,1996).

Literatürde montmorillonit/smektit grubu killer olarak yer alan killer, bentonit kayacını oluşturan aynı kil, kayaç ve mineral parçaları olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda bentonit esas itibarıyla bir mineral olarak düşünülmemeli, yumuşak kaolin kıvamında bir kayaç olarak doğada bulunmaktadır (Kınaş ve Özdoğan, 2021).

Ticari açıdan değerlendirildiğinde ise sıvı emici ve koloidal özelliği olan her kil bentonit ya da bentonitik kil olarak adlandırılmaktadır. Bentonitin işlenebilir hammadde olabilmesi için en az beş kat şişme özelliğine sahip olması istenilmektedir. Bunun yanında 10- 20 kat şişen bentonitler işletilebilirlik açısından en uygun bentonitler olarak değerlendirilmektedir (Özpamuk, 2018, Kınaş ve Özdoğan, 2021).

Terim olarak bentonit kelimesinin ilk kullanımı ise 1898 yılında Knight tarafından ABD'nin Wyoming eyaletinde bulunan Fort Benton yakınındaki kretase yaşlı yüksek koloidal özellikli plastik killerin olduğu Benton Şeyli için kullanılmıştır. Ayrıca yine benzer özelliklere sahip olan 1847 yılında Fransa'nın Montmorillon bölgesinde bulunmuş olan killer ise montmorillonit olarak adlandırılmıştır. Smektit terimi ise antik Helen uygarlığında sabun anlamına gelen smektos kelimesinden türetilmiştir (Çinku, 2008).

Dünya'nın en önemli bentonit yatakları; Wyoming-ABD; Ponza, Sardunya-İtalya, Milos-Yunanistan, Bavyera-Almanya ve Almeria-İspanya'da bulunmaktadır. Türkiye'nin önemli bentonit yatakları ise Çanakkale, Edirne, Ankara, Eskişehir, Kütahya, Balıkesir, Çankırı, Nevşehir, Tokat ve Ordu illerinde bulunmaktadır (Özpamuk, 2018).

Bentonitin endüstriyel anlamda kullanımı için ise muhteviyatında bulunan Kalsiyum, Sodyum ya da Sodyum-Kalsiyum oranları belirleyici olmaktadır. Bu oranlar ışığında endüstride farklı sektörlerde ara ürün olarak hammadde ihtiyacının karşılanmasında rol oynamaktadır (Kınaş ve Özdoğan, 2021).

2023 yılında Türkiye, ABD ve Hindistan'ın ardından bentonit üretiminde Dünya'da Çin Halk Cumhuriyeti'nin üstünde üçüncü sırada yer almıştır (WMD, 2025) İhracat verileri açısından incelendiğinde 2023 yılında 161,2 milyon USD olan toplam satış, 2024 yılında ise 146,9 milyon USD'ye gerilemiştir (İMİB, 2025). Yine ton başına satış 2024 yılında 145 USD iken, 2024 yılında 135,9 USD olarak gerçekleşmiştir (İMİB, 2025). Bentonit rezervleri ve üretimi açısından önemli konumda bulunan Türkiye'nin Dünya ticaretinde etkisi henüz tam anlamıyla istenilen düzeye gelmediği değerlendirilmektedir. Bunun sebebi is aktive ve modifiye edilmiş kil ürünlerinin ticari açıdan yeterli miktarda ve öznelikselliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Çinku, 2008).

Günümüzde yaygın olarak kedi kumu üretiminde hammadde olarak kullanılan bentonit bunun yanında yoğun şekilde döküm sektöründe maça kalıplarında, demir cevherinin peletlenmesinde, derin kuyu, petrol ve su sondajlarında, gıda sektöründe ayçiçeği, soya, kanola, mısırözü vb. yağların ağartılması, alkollü içeceklerin

veya meyve sularının berraklaştırılmasında, ilaç ve kozmetik endüstrisinde, kağıt sanayisinde, sabun, deterjan gibi temizlik ürünlerinde, gübre ve hayvan yemi olarak hayvancılık ve tarımda, lastik, boya sanayisinde, petrol rafinasyonunda, çimento ve seramik sektörlerinde kullanılmaktadır. Bu bağlamda önemli bir hammadde olan bentonitin yerli üretiminin teşvik edilmesi ve katma değerli şekilde zenginleştirilmiş ürün olarak piyasaya sunulması ekonomik açıdan olumlu etki sağlayacaktır.

Nevşehir ilini de içine alan Kapadokya bölgesinin bentonitik kil potansiyeli, son yıllarda yeni açılan ocaklar ile adından söz ettirmektedir. Bölgede yapılan çalışmalarda bentonitlerin Ca-Bentonit olduğu anlaşılmış olup soda ile aktive edildikten sonra kedi kumu olarak veya demir cevheri peletlemesinde ya da maça kalıp kumunda döküm endüstrisinde kullanılabilir olduğu değerlendirilmektedir.

Yapılan bu çalışma ile Türkiye kil madenciliği açısından bentonitik killerin tüvenan olarak piyasaya sunulmadan farklı makine ve ekipmanlar ile sanayi için ara ürün olabilecek niteliklere sahip yerli üretiminin ekonomik kalkınmaya olan katkısı ortaya konularak farkındalık oluşturulması hedeflenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Bu çalışma kapsamında Nevşehir ili, Ürgüp ilçesinde faaliyetlerine devam eden KB Bentonit Madencilik A.Ş. tarafından işletilmekte olan 3213 sayılı Maden Kanunu IV. Grup a bendi işletme ruhsatlı bentonit ocağından çıkartılmakta olan tüvenan halde bulunan bentonit kayaçların tesiste işlenmesi sürecinde kullanılan ekipmanlar, hammaddenin ve ürünün kimyasal özellikleri, tesis akış şeması, ekipmanların çalışma prensipleri bulgular kısmında değerlendirilecek ve zenginleştirme sürecinin ekonomik etkinliği ortaya konulmuştur.

Metot

Çalışma kapsamında yapılan çalışmalar sırası ile aşağıda belirtilmiştir.

1. Çalışma kapsamında ilk olarak Nevşehir bentonitleri ile ilgili saha çalışması yapılmış, ocak alanı, ocak alanının jeolojisi ile ilgili bilgiler derlenmiştir. Ocak alanının olduğu bölgeden daha önce alınan numunelerin ve tesise beslenen ürünün kimyasal özellikleri ve tane boyut dağılımı incelenmiştir.
2. Tesiste kullanılan ekipmanların teknik özellikleri kontrol edilmiş ve tesis proses akım şeması ile makinelerin çalışma prensiplerine dair bilgiler açıklanmıştır. Uç ürüne dair analiz sonuçları değerlendirilmiştir.
3. Elde edilen veriler ışığında tüvenan ve ara ürün olarak bentonitin ekonomik etkinliği ile ilgili değerlendirmeler ortaya konulmuştur.

BULGULAR

Bentonitin çıkarıldığı ocak Nevşehir ili, Ürgüp ilçesi, Akköy Köyü civarında bulunmaktadır. Jeolojik açıdan ocak alanı incelendiğinde, Pasquare tarafından 1968 yılında Alaşar Tüfü (Qa) olarak adlandırılmış birimin içinde kaldığı tespit edilmiştir. Ocak alanı bu birimin İncesu Üyesi (Tüi) içinde bulunmaktadır (Pasquare, 1968). Ocağın genel plan görünümü şekil 1.de verilmiştir.



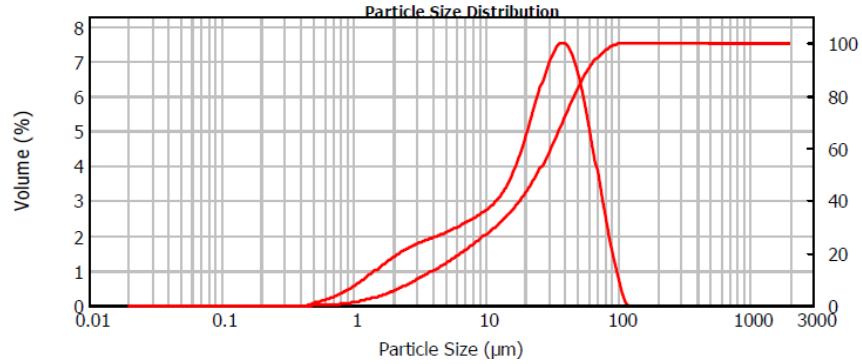
Şekil 1. Bentonit ocağı genel görünümü

Ocak alanının olduğu bölgeden daha önce alınan beyaz ve yeşil renkteki bentonit numunelerin ve tesise beslenen numunenin kimyasal analizi çizelge 1.'de ve beyaz ve yeşil bentonit numuneleri için mastersizer 2000 cihazı ile belirlenmiş olan tane boyut dağılımları şekil 2.a-b'de verilmiştir.

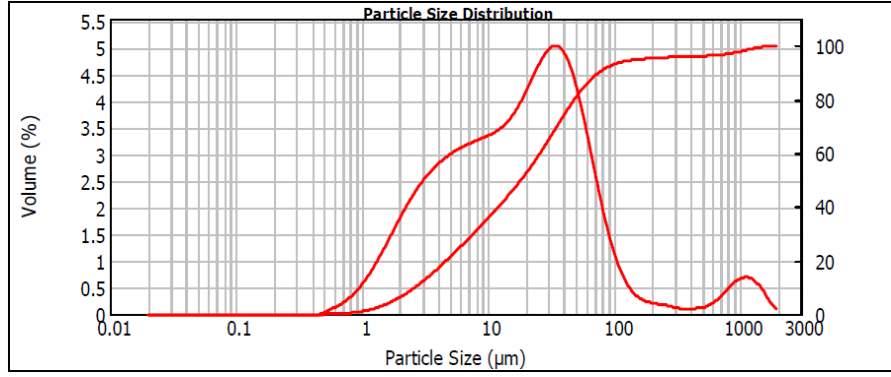
Çizelge 1. Bentonitin kimyasal özellikleri

	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
N-1 Beyaz	56,41	1,77	2,81	0,18	0,18
N-2 Yeşil	52,98	1,75	1,51	0,17	0,51
Tesise Beslenen	75,36	1,1	1,33	0,2	0,5
Hammadde					

Yapılan analiz sonuçlarına göre $Na_2O + K_2O / CaO + MgO$ oranları 1'den küçük olduğu için bentonit numunelerinin Ca-Bentonit olduğu belirlenmiştir (Özpamuk, 2018).



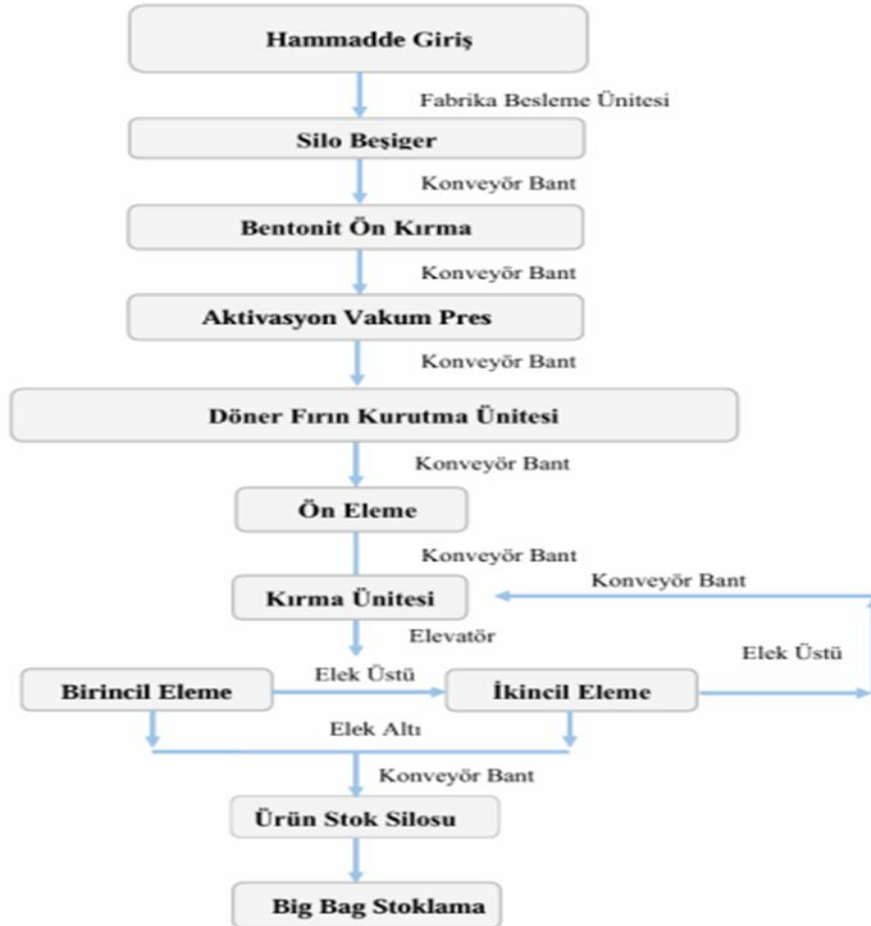
Şekil 2.a. Beyaz bentonit tane boyu dağılımı (Özpamuk,2018)



Şekil 2.b. Yeşil bentonit tane boyu dağılımı (Özpamuk,2018)

Tesise beslenen hammaddenin katyon değişim kapasitesi (KDK)'nin 73,7 meq/100g olduğu, nem miktarının %28 olduğu, metilen mavisi (MM) adsorpsiyonunun 80 g MB, beyazlığının ise %91,05 ve şişme kapasitesinin ise 11 gr/lit olduğu yapılan analizler sonucu tespit edilmiştir.

Bentonit ocağından çıkartılan hammadde tesise beslenerek nihai ürün eldesi için zenginleştirme işlemine tabi tutulmaktadır. Tesis proses akım şeması şekil 3.'te ve tesisin genel görünümü şekil 4.'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Tesis proses akım şeması



Şekil 4. Tesisin genel görünümü

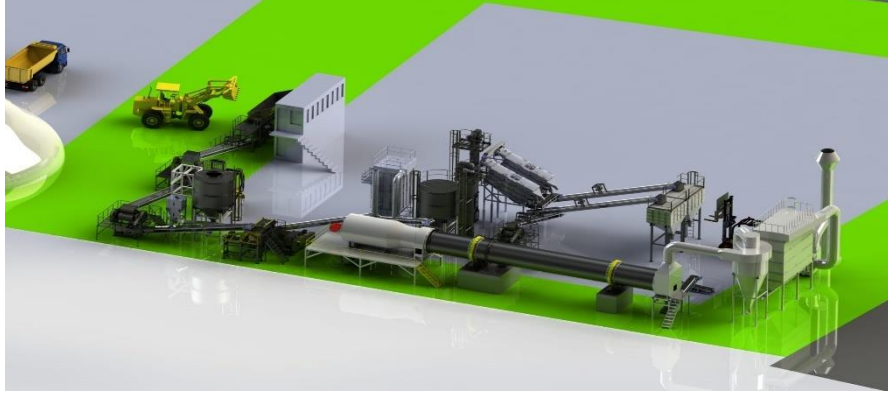
Zenginleştirme faaliyetleri kapsamında tesise hammadde olarak getirilen bentonitin kurutulularak daha saf ve kaliteli hale getirilmesi sağlanmaktadır. Nihai elde edilen ürünün ticari ismi granül bentonit olarak adlandırılmaktadır. Proses akış şemasından da anlaşılacağı üzere zenginleştirme/safsızlaştırma/uç ürün eldesi için bentonitin soda ile işlem görmesi, kurutulması ve eleklerden geçirilip paketlenerek nihai ürünün elde edilmesi işlemleri sırasıyla gerçekleştirilmektedir. Tüvenan bentonit stok alanında toz soda ile aktive edilerek Na-Bentonit formuna dönüştürülmektedir. Daha sonra ekstruder makinesinde uygun hale gelene kadar karıştırılmaktadır.

Bu aşamadan sonra bentonit kurutucu bölümüne gönderilmektedir. Kurutucu ünitesinde bentonitin su içeriği %35'ten ortalama olarak %10'a düşürülmektedir. Bentonit kurutucu fırın sonrası kırma-eleme ünitesine beslenmektedir. Kırma-eleme ünitesinde boyut küçültme ve sınıflandırma işlemine tabi tutulan bentonit elekler vasıtası ile boyut kontrolüne tabi tutulmaktadır. Burada bentonit diğer tüm eleme işlemleri ile benzer şekilde elek üstünde kalan malzemelerin tekrar kapalı sistem olarak kırma – eleme ünitesine beslenerek istenilen boyuta ulaşması sağlanmaktadır. Bu aşamadan sonra bentonitler uç ürün granül bentonit haline gelerek paketleme ünitesinde farklı ürün gruplarına yönelik olacak şekilde ambalajlanarak veya bigbaglere konularak satışa hazır hale getirilmektedir.

Zenginleştirilmiş ürünün tesis çıkışı analiz sonuçları incelendiğinde ise nem oranının %5,32 ye düştüğü, pH'ın 9,63 olduğu, yoğunluğunun 770 (G/L) olduğu, iletkenliğinin ise 359 $\mu\text{S}/\text{cm}$, su emme kapasitesinin %460 ve şişme kapasitesinin ise 32gr/lt'ye yükseldiği yapılan analizler sonucu ortaya konulmuştur.

Bentonitin Zenginleştirilmesinde Kullanılan Makineler

Tesiste kullanılmakta olan makineler 1973 yılından beri faaliyetlerini sürdüren bentonit zenginleştirme tesislerinin yanında tuğla ve kiremit üretim tesislerinin kurulumu da faaliyet alanları içinde bulunan Ar-San Makine tarafından imal edilmiştir. Örnek tesis konfigürasyonu şekil 5.'te verilmektedir.



Şekil 5. Bentonit tesis konfigürasyonu

Tesiste bentonitin zenginleştirilmesinde kullanılan makineler ise Vakumpres, Kurutucu Fırın ve Ezici Vals olarak sıralanmaktadır.

Vakumpres

Makine, karıştırıcı ve ekstrüder olmak üzere iki ana parçadan oluşur. Üst kısım (karıştırıcı), bentonit karıştırılması ve suyun eklenmesini sağlamaktadır. Karıştırıcı çift millilerle tasarımı yapılmış bir makinedir. Çapa eğimleri maksimum karıştırma özelliğine sahip olacak şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca çapaların sürtünme yüzeyleri asgari seviyede tutulmuş ve böylelikle makinenin fazla enerji tüketmesinin önüne geçilmiştir.

Bu aşamadan sonra Na-bentonit vakum odasına aktarılmaktadır. Makinenin iki parçası arasında bulunan bu sızdırmaz boş kısım malzemedeki havayı gidermeye olanak tanımakta; son ürünün kalitesini standartize etmektedir. Vakum odasından geçtikten sonra bentonit alt kısma (ekstrüder) bastırıcı çapalar vasıtasıyla indirilmektedir. Bu ünite, bentoniti sarmal şeklinde hareket ettirmesi kazandırmakta, ekstrüzyon kısmına basınç uygulamaktadır. Ekstrüder ve karıştırıcı olmak üzere bu iki makine, tesisin konfigürasyonuna bağlı olarak sıralı veya dik olarak monte edilebilmektedir. Şanzımandaki dişlilerin tamamının tasarımı yapılarak sertleştirilmesi ve diş yüzeyleri taşlanması sayesinde makine uzun ömürlü kullanıma olanak sağlamaktadır. Makine ile ilgili en önemli husus ise makinenin sıkıştırma ve aktivasyon işlemi esnasında yeterli şekilde beslenen bentonitin mevcut özelliklerine uygun seviyede suyun sağlanması gerekliliği olarak ortaya çıkmaktadır. Makinenin saatlik kapasitesi 90 ton'dur. Vakumpres makinesi Şekil 6.'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Vakumpres

Döner Kurutucu

Bu makine, bentonit fabrikalarında hammaddeyi kurutmak için kullanılmaktadır. Döner kurutucu, tahrik grubu, ısıtma sistemi, filtre ve baca dahil olmak üzere tam bir sistemdir. Kurutucuda verimlilik açısından en önemli hususlar besleme miktarı ve saatlik yakıt tüketimlerinin optimum seviye gözetilerek çalıştırılmasının sağlanması olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca bentonitin nem miktarının ısıya göre doğru ayarlanması ile gereksiz veya yetersiz kurutma koşullarının minimize edilmesi önem arz etmektedir. Şekil 7.'de döner kurutucu gösterilmektedir.



Şekil 7. Döner kurutucu

Ezici Vals

Ürünün iki merdane arasında ezilerek özleşmesini sağlamaktadır. Hammadde içerisindeki iri malzemeleri ufalayarak üretimdeki kaliteyi artırmaktadır. Silindirlerin çalışma hızındaki fark sayesinde, hammaddenin düzgün bir şekilde istenilen boyuta ulaşmasında verimliliği sağlamaktadır. Kazıyıcı bıçak sistemi pnömatiktir ve silindirlerin yüzeylerinin daha iyi temizlenmesini sağlayarak makinenin performansını artırmaktadır. 11 m/s ile 22 m/s arasında değişen hızlarda çalışan farklı modellerde ezici valsler mevcuttur. Şekil 8.'de ezici vals gösterilmektedir.



Şekil 8. Ezici vals

SONUÇLAR

Günümüzde granül bentonit üretimi Ordu, Tokat, Çankırı, Nevşehir ile ocak ve tesislerin olduğu bölgelerde yaygın olarak sağlanmaktadır. 2000'li yılların ortalarında granül bentonit tedarikinde %40 civarında olan yerlilik miktarı günümüzde %90 seviyelerine yaklaşmıştır. Ekonomik kalkınmada en önemli noktalardan biri olan katma değerli üretim göz önüne alındığında, bentonit zenginleştirme tesislerinde verimli çalışma

koşullarının bilimsel metotlara göre değerlendirilmesi Türkiye'nin bentonitik kilde rekabet gücünü daha da ileriye götürmesine imkan sağlayabilecektir. Bu anlamda bentonit zenginleştirme makinelerinin verimli çalışma şartlarının önemi artmaktadır.

Güncel veriler ışığında ham bentonitin ton bazında satış fiyatının 25 Avro civarında olduğu bilinmektedir. Ancak zenginleştirilmiş bentonitin satış fiyatı ise bu bedelin yaklaşık 5 katı daha fazladır. İşletme maliyetleri göz önünde alındığında yine katma değerli üretimin kar marjının daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Türkiye kil madenciliğinde Dünya'da rezerv potansiyeli ile önemli bir konumdadır. Killerin daha yüksek standartlarda üretimi için farklı çalışma koşullarına uygun tekniklerin geliştirilmesi ile daha verimli çalışma koşulları oluşturulmasında bentonit zenginleştirme örnek teşkil etmemiştir. Yerli makine üreticileri tarafından kurulma imkanına sahip bentonit zenginleştirme tesisleri sayesinde yüksek katma değerli bentonit ürünleri pazara sunulmakta ve milli ekonomiye fayda sağlamaktadır.

Gelecek yıllarda otomasyon sistemlerindeki gelişimler öngörüldüğünde daha yüksek verimli bentonit zenginleştirme makineleri ile daha yüksek verimli tesisler kurulabilecektir. Bu anlamda bilimsel çalışmalarda kil madenciliğinin öneminin tüm paydaşlar tarafından özümsemesi önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar olarak değerli katkılarından dolayı Ar-San Makineye ve Ar-San Makine çalışanları Gizem Özgün ve Volkan Sivacıoğlu'na teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Akbulut, A., (1996) Bentonit, MTA Yayını, Eğitim Serisi, No:32, Ankara.
- Arsan Mak., (2017) Sanal Katalog, <https://www.arsanmakina.com/portfolio/bentonit-tesisi/> (erişim tarihi:10.08.2025)
- Çinku, K., (2008) Aktivasyon Yöntemleri İle Bentonitten Su Bazlı Kıvamlaştırıcı Üretiminin Araştırılması, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul
- İMİB, (2025) 2024 Çalışma Raporu, <https://imib.org.tr/upload/2024-Faaliyet-Raporu.pdf> (erişim tarihi:10.08.2025)
- Kınaş, Y., Özdoğan A.K. (2021) Türkiye Bentonit Potansiyeli Üzerine Genel Bir Değerlendirme ve SPSS Yöntemi ile Cumhuriyetimizin 100. Yılında Milli Ekonomimize Katkısının Araştırılması, MAPEG Dergi, s.6 ,syf.22-37, Ankara.
- Özpamuk., Y.Y. (2018) Kapadokya Bölgesi Bentonit Yatakları ve Özellikleri, ESOGÜ Kütüphanesi, Eskişehir.
- Pasquare, G., (1968) Geology of the Cenozoic volcanic area of Central Anatolia. Atti. Accad. Naz. Lincei Mem., 9: 55-204.
- Reichl, C., Schatz, M. (2025) World Mining Data (Iron and Ferro-Alloy Metals Non-Ferrous Metals Precious Metals Industrial Minerals Mineral Fuels), volume:40, Vienna. <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD%202025.pdf> (erişim tarihi:10.08.2025)

**DAHA İYİ PROSES VE NİHAİ ÜRÜNLER İÇİN ÖĞÜTME İLE TANE ŞEKLİNİN
MODİFİKASYONU**
*MODIFICATION OF PARTICLE SHAPE BY GRINDING FOR BETTER PROCESSING AND FINAL
PRODUCTS*

U. Ulusoy
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, TR58140, Sivas
(ulusoy@cumhuriyet.edu.tr)

ÖZ

Birçok endüstriyel uygulama veya süreçte kullanılan tanelerin gerçek şeklinin modellemelerde ve hesaplamalarda kolaylık olsun diye "homojen küreler" olarak varsayılmıştır. Oysa tane şekli çeşitli ürün malzemelerindeki birçok özelliği etkileyebilir. Bu bağlamda günümüzde artık birçok endüstri, ürün ve süreçlerin tam olarak anlaşılması için tane boyutunun yanı sıra tane şeklinin de ölçülmesinin önemini kabul etmeye başlamıştır. Dolayısıyla, çeşitli endüstrilerde kullanılan granüler malzemelerin kontrol edilmesi veya istenen şekillerde hazırlanması, daha iyi süreçler veya nihai ürünler geliştirilmesi ve süreçlerin pratik ve ekonomik hale getirilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu sebepten, tane şekli, çeşitli proseslerde ve endüstriyel kullanımlarda taneli malzemelerin birçok özelliğini ve davranışını etkilediği için kontrol edilmeli ve değiştirilmelidir. Bu derleme makalede sonraki proseslerde daha yüksek performans ve ürün kalitesi elde edilebilmesi için birçok endüstride kullanılan tanelerin şeklinin, üretim süreçleri ve nihai ürün performansına etkileri ve uygun boyut küçültme (kırma-öğütme) ekipmanları kullanarak modifiye edilmesiyle daha iyi sonuçlar alınabileceği vurgulanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Tane, tane şekli, öğütme, şekil modifikasyonu

ABSTRACT

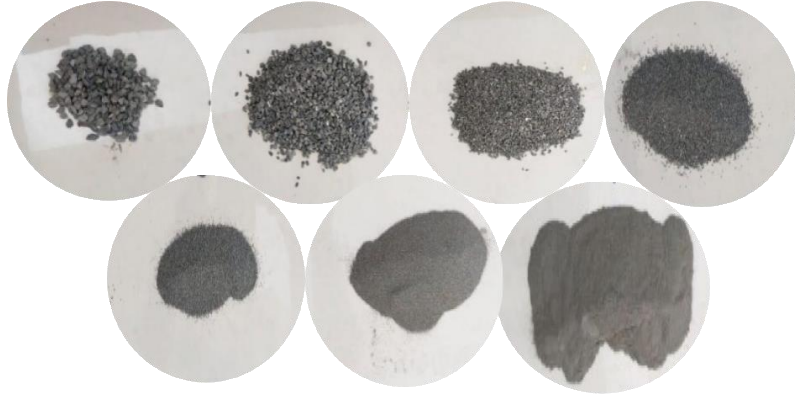
The true shape of particles used in many industrial applications or processes is assumed to be "homogeneous spheres" for ease of modeling and calculations. However, particle shape can influence many properties of various product materials. In this context, many industries have begun to recognize the importance of measuring particle shape in addition to size for a complete understanding of products and processes. Therefore, controlling or preparing granular materials used in various industries into desired shapes, developing better processes or final products, and making processes practical and economical are vital. Therefore, particle shape affects many properties and behaviors of granular materials in various processes and industrial uses, and therefore must be controlled and modified. This review article emphasizes the effects of particle shape on production processes and final product performance, and the possibility of achieving better results by modifying it using appropriate size reduction (crushing and grinding) equipment to achieve higher performance and product quality in subsequent processes.

GİRİŞ

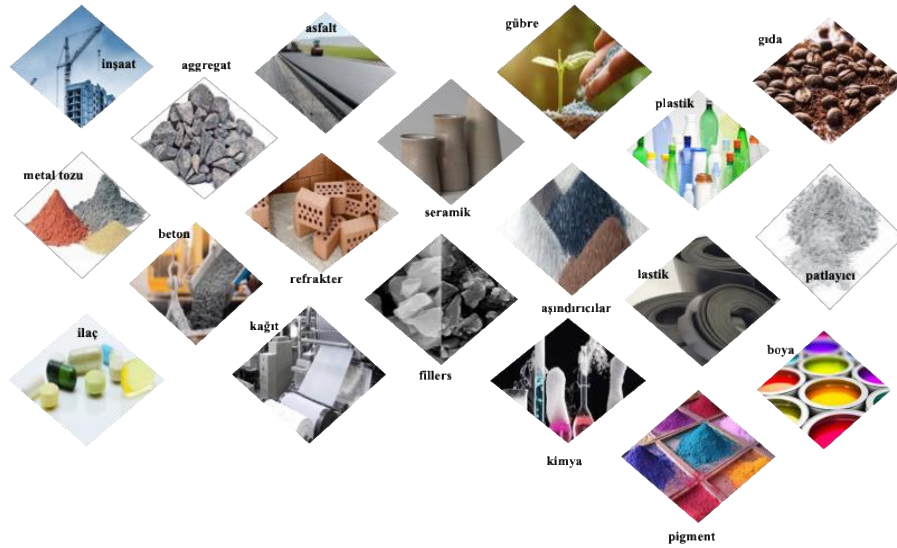
Çoğu yerde toz ve tane kavramları birbirinin yerine kullanılmaktadır. Aslında, **Toz (powder)** terimi, 1 mm'den küçük, katı ve ayrı bir malzeme olarak adlandırılır (BS 2955:1993). Bir başka ifadeyle toz, özellikle ayrı parçalar arasında maddi bağlar olamayan, kesikli haldeki bir katıdan oluşur, (Arai, 1996). Diğer taraftan, **tane (particle)** terimi ise, teknik olarak birkaç milimetre ile birkaç angström arasında bir çapa sahip, nispeten en küçük bir madde olarak tanımlanabilir (McGraw Hill's Dictionary of Scientific and Technical Terms). Bu

bağlamda, tane boyutları çıplak gözle görülebilen makroskobik tanelerden, yalnızca son derece güçlü mikroskoplarla görülebilen nano-tanelere kadar büyük ölçüde değişkenlik göstermektedir.

Her yıl, madencilik, enerji, petrol, kâğıt, boya ve plastik, seramik, gıda, inşaat, ilaç, tekstil, kimya, tarım ve atık ürünler dahil olmak üzere (Şekil 1), çoğu endüstri tarafından çok büyük miktarlarda tane işlenmektedir (Meloy, 1980). Dolayısıyla, taneler ve tane teknolojileri yaşamı derinden etkiler çünkü toprak, agregalar, çimento, otoyollar, tuğla, seramik, cam, pigmentler, boya, mineraller ve metaller gibi taneli malzemeler modern toplumun vazgeçilmez unsurlarıdır. Zira, enerji, çevre, inşaat, ilaç, kimya, petrol, tarım, gıda, plastik, kozmetik, pil, madencilik, mineraller, metalurji ve ileri malzemeler dahil olmak üzere çok çeşitli endüstriler, kömür yakma, kimyasal çözünme, kataliz, enerji, tarım, endüstriyel karbon üretimi, gıda, mineral, seramik, çimento, boya, kâğıt, sentetik elyaf, petrokimyasallar, cam, plastik, kauçuk ve ilaç üretimi gibi çok sayıda işlemden kullanılan malzemeler taneli veya toz (Şekil 2), formundadır (Rhodes, 2008). Yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nde, tane sistemlerinden etkilenen endüstriyel üretim, kimyasallar ve ilgili ürünler, tekstil, kâğıt ve ilgili ürünler, gıda ve içecekler, metaller, mineraller ve kömür (Allen, 2003) gibi başlıca önde gelen 10 endüstriden (Xu, 2000) oluşmaktadır. Bu endüstrilerin mevcut değerinin 2 trilyon ABD dolarından fazla olduğu tahmin edilmekte ve önümüzdeki 10 yılda 5-10 kat artması beklenmektedir (Gani vd., 2008).



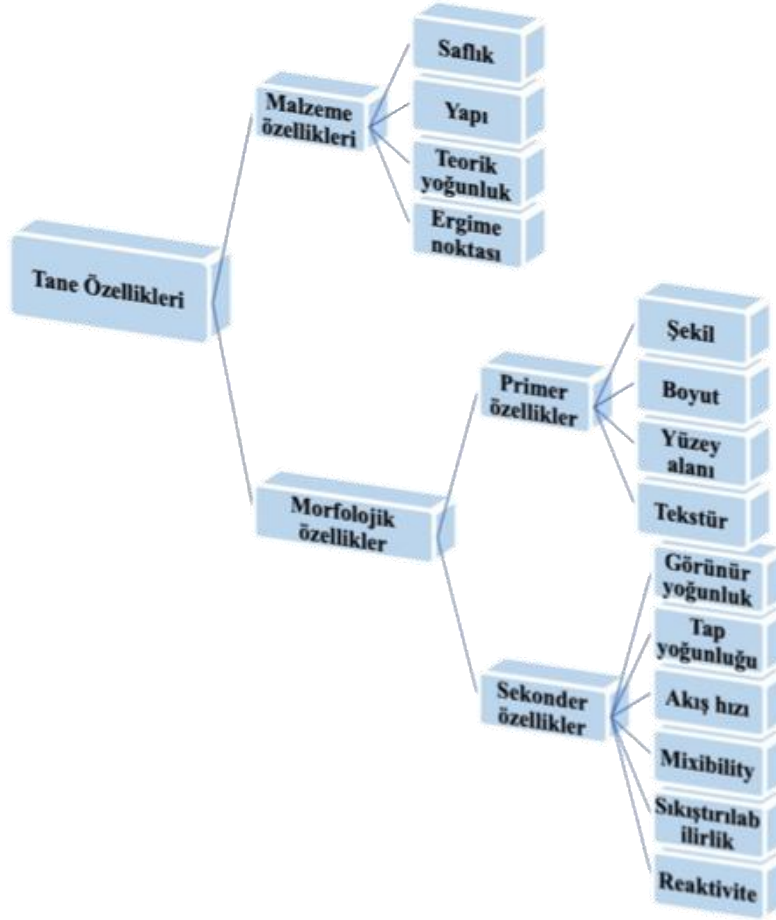
Şekil 1. Çeşitli alanlarda kullanılmak üzere mm ölçüğünden mikron ölçeğine öğütülmüş çeşitli tane boyutlarında elenmiş bir malzeme



Şekil 2. Çeşitli endüstrilerde kullanılan taneli malzemeler (Ulusoy, 2023).

Toz ve tane malzemelerin özellikleri genellikle iki sınıfa ayrılır (Şekil 3), malzemenin bileşiminden kaynaklanan **birincil özellikler** ve iç yüzeyleri genellikle hava olan bir gazla etkileşime giren bireysel tane koleksiyonları sistemleriyle ilişkili **ikincil özellikler**. Boyutları, şekilleri ve boyut dağılımları gibi bireysel tanelerin fiziksel özellikleri ve ayrıca birbirleriyle nasıl etkileşime girdikleri, mekanik, termal, elektriksel, manyetik, optik, akustik ve yüzey fizikokimyasal özellikleri (Shinahara, 1997) gibi yığın özelliklerini belirler (Richardson, 2002). Bu nedenle, ürün özellikleri için kritik öneme sahip olan bireysel tane özellikleri (Davies, 1984), yalnızca boyut, şekil, sertlik, yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü, homojenlik ve yoğunluk gibi fiziksel özellikleri değil, aynı zamanda adsorpsiyon, biyolojik, optik, termodinamik ve dinamik özellikleri de içerir (Ortega-Rivas 2012, Müller, 2001, Barbosa-Canovas, 2005). Dolayısıyla, tane şekli, tane boyutu, yüzey özellikleri, mekanik özellikler, yük özellikleri ve mikro yapı, üretim ve geliştirme açısından ölçümde rol oynayan önemli fiziksel özelliklerdir (Tablo 1). Bir başka ifadeyle aşağıdaki denklemde (Denklem 1) gösterildiği gibi, prosese giren taneler malzemenin prosedeki davranışı malzemeyi oluşturan tanelerin özelliklerinin (boyut, şekil, boyut dağılımı, yüzey alanı, yoğunluk vs.) bir fonksiyonudur (Freeman vd., 2017, Freeman, 2024, Freeman Technology, 2024).

$$\text{Tane davranışı} = \text{fn}(\text{Tane özelliği}) \quad (1)$$



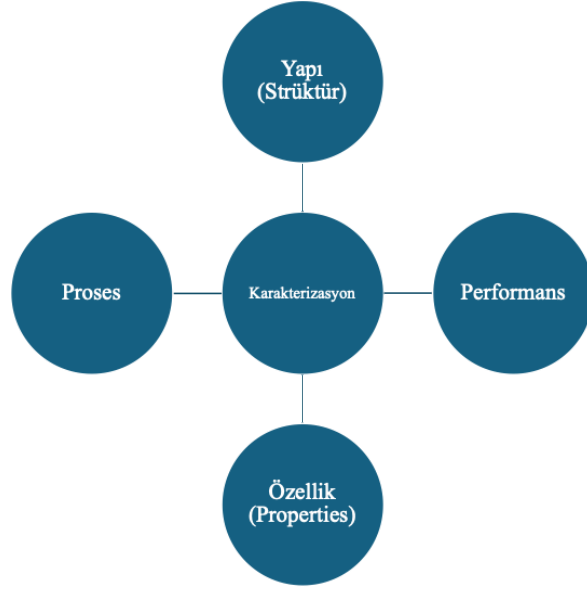
Şekil 3. Birincil ve ikincil tane özellikleri (Ulusoy, 2023).

Çizelge 1. Tane şeklinin etkilediği tane yapısal özellikler

No	Şekilden etkilenen tane özellikleri
1	Akış
2	Segregasyon
3	Sıvılarla etkileşim
4	Pigmentlerin kaplama gücü
5	İletkenlik
6	Permabilite
7	Duraylılık
8	Sinterleme
9	Liç verimi
10	Çözünme hızı
11	Kolon içinde reaksiyon hızı
12	Görünür yoğunluk
13	Sıkıştırılabilirlik

TANE KARAKTERİZASYONU

Tane sistemindeki tozların birincil özelliklerini tanımlamak anlamına gelen *tane karakterizasyonu*, birincil özelliklere dayalı ikincil özellikleri tahmin etmeyi amaçlayan tüm tane teknolojisi çalışmalarının temelini oluşturur (Barbosa-Canovas, 2005, Seville, 2016). Bu bağlamda, *toz veya tane teknolojisi*, mikrobiyoloji, kimya, kolloid ve arayüz bilimi, ısı ve kütle transferi, katı hal fiziği, aerosol ve toz bilimi ve nanoteknoloji unsurlarını birleştiren yeni bir mühendislik disiplini olarak ortaya çıkmıştır (Vehring, 2008). Başka bir deyişle ister kuru halde ister bir sıvı içinde asılı olsun, tüm taneler malzemelerin karakterizasyonu, depolanması, taşınması, karıştırılması, akışkanlaştırılması, sınıflandırılması ve aglomerasyonunu içeren birçok sürecin sistematik olarak araştırılmasıyla ilgilidir. Tane süreçleri çeşitli endüstriyel ürünlerin üretiminde önemli bir faktör olduğundan, tane karakterizasyonu ilkelerinin uygulanmasıyla tane sistemlerinin incelenmesi yoluyla kaydedilen ilerlemeler, kimyasalların, pillerin, katalizlerin, nanomalzemelerin, ilaçların, seramiklerin ve gıdaların üretimi gibi çok çeşitli endüstriyel süreçlerde faydalı olmuştur (Ortega-Rivas 2012). Ayrıca, ürün kalitesi yönetimi ve proses kontrolü için tane özelliklerinin karakterizasyonu gereklidir, çünkü birçok ürünün kalitesi tane özelliklerine bağlıdır (Seville, 2016). Bu nedenle, malzeme karakterizasyonu, malzemelerin işlenmesi, yapısı, özellikleri ve performansı arasındaki bağlantılar hakkında daha fazla bilgi sağladığı için endüstriyel araştırma ve geliştirme için kilit faktördür (Şekil 4). Ayrıca, tozların işleme sırasındaki davranışlarının değerlendirilmesi, fiziksel özellikler ile birlikte proses değişkenlerinin bilinmesiyle mümkün olur (Neikov, 2009). Bu nedenle, boyut, şekil ve yapı dağılımlarının değerlendirilmesi, her endüstriyel mineral tane şeklinin bitmiş ürüne fayda sağlaması nedeniyle proses kontrolü ve ürün spesifikasyonunda önemli bir aşamadır (Ciullo, 1996, Lobato, 2004, Vanderbilt, 2013). Dahası, tüketicilerin hassas formülasyon ihtiyaçlarını karşılamak için doğru mineralin seçilmesi ve parametrelerin (tane boyutu, şekli, mikro yapı, renk ve sertlik) optimizasyonu gereklidir (Gupta, 2003). Her şeyden önce, tane özelliklerinin karakterizasyonu, yalnızca proses performansı ile ürün kalitesi arasındaki bağlantının daha iyi anlaşılmasını sağlamakla kalmayıp aynı zamanda üretim performansının iyileştirilmesini de kolaylaştırdığı için büyük önem taşır (Seville, 2016). Bu nedenle, tane karakterizasyonu, ürün verimliliğini artırmak, üretim ve imalat sorunlarının belirlenmesi, üretim süreçlerinin performansının optimizasyonu ve üretimin iyileştirilmesi veya kapasitenin artırılması için ürünlerin, katkı maddelerinin ve uygulamaların daha iyi kalite kontrolü ve anlaşılması amacıyla birçok endüstride rutin olarak kullanılmaktadır. Fakat, tanelerin şeklinin ölçülmesindeki zorluklardan dolayı şeklin evrensel olarak kabul edilmiş bir tanımı (parametresi) yoktur. Üstelik, birçok endüstriyel uygulama veya süreçte kullanılan tanelerin gerçek şeklinin modellemelerde ve hesaplamalarda kolaylık olsun diye "homojen küreler" olarak varsayılmıştır (Şekil 5).



Şekil. 4. Karakterizasyonun malzeme biliminin dört ayağı sayılan yapı, proses, performans ve özellik üzerindeki rolü (Burkes vd., 2008).

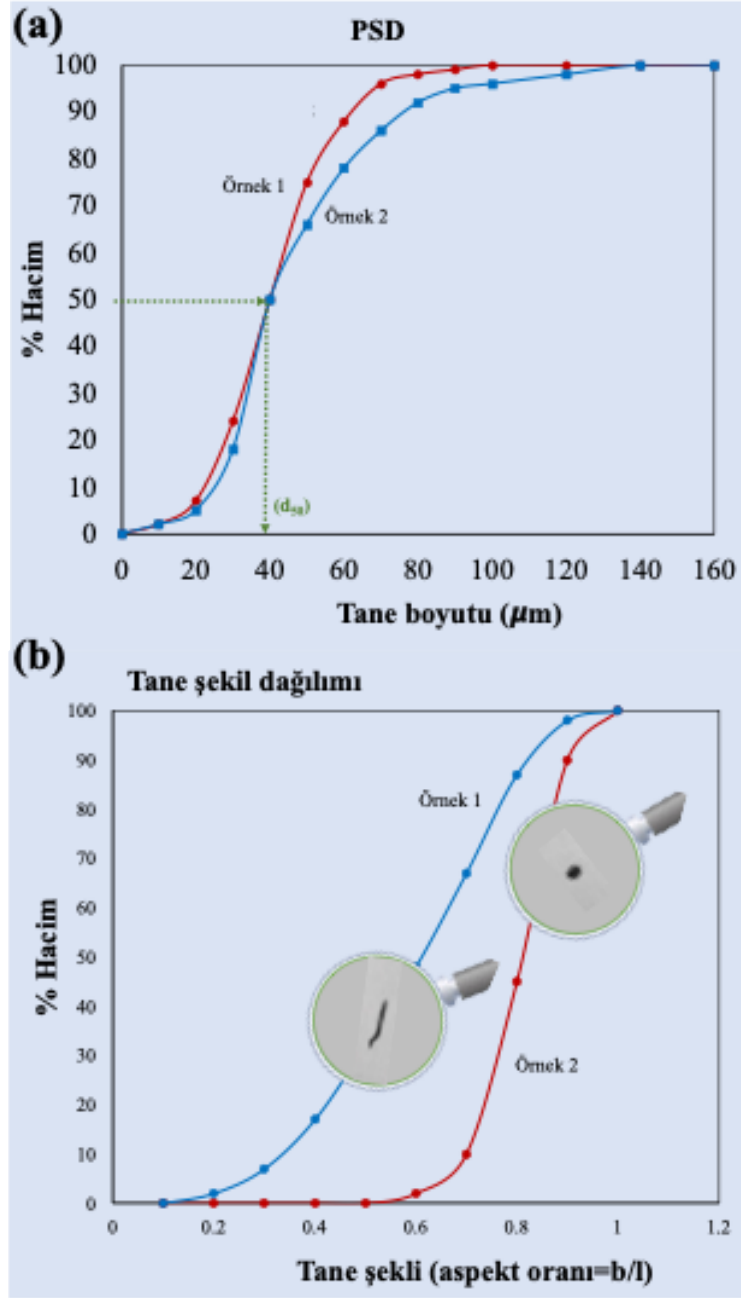


Şekil. 5. Homojen küreler konseptine dayanan çeşitli sanal tane çapları (Rawle, 2003).

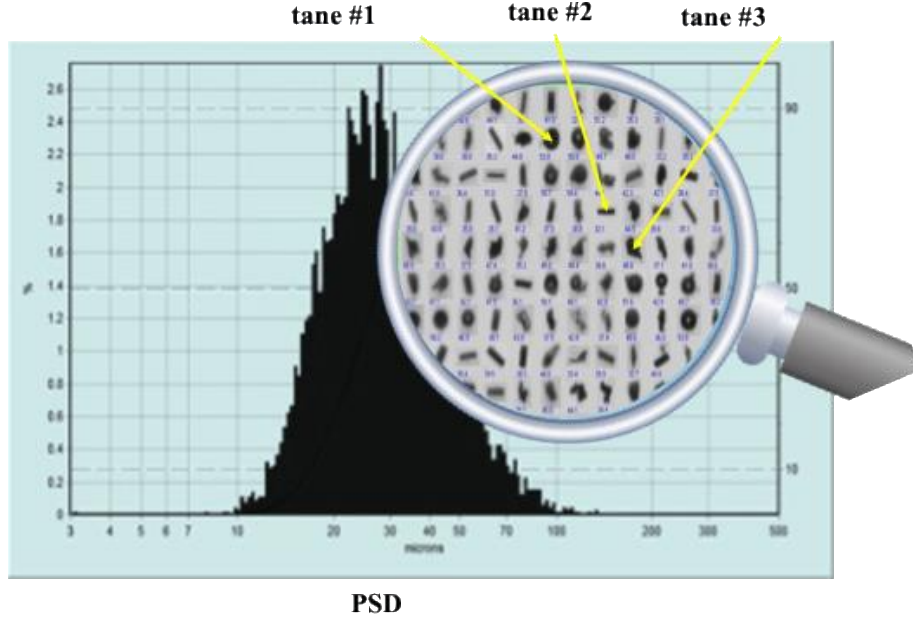
Günümüzde artık birçok endüstri, ürün ve süreçlerin tam olarak anlaşılması için **tane boyutunun** yanı sıra **tane şeklinin** de ölçülmesinin önemini kabul etmektedir, çünkü tane şekli çeşitli malzemelerin çeşitli özelliklerini etkileyebilir, örneğin farmasötik aktif bileşenlerde reaktivite ve çözünme, ilaç dağıtımında akışkanlık ve kullanım, seramik filtrelerde sinterlenebilirlik, SiC tel testerelerde aşındırıcı performans ve gıda bileşenlerinde doku ve his (Malvern Instruments Limited, 2012). Buna ilaveten, süreçlerin en iyi şekilde kullanılması, çok çeşitli tane karakterizasyonu, oluşumu, kullanımı, işlenmesi ve kullanımı için önemli bilgi sağlayan tane bilimi ve teknolojisinin eksiksiz bir şekilde anlaşılmasına dayanmaktadır (Park vd., 2007). Örneğin, bireysel tane morfolojilerinin büyük ölçüde değişmesi, malzemelerin toplu tanelerin (**bulk**) mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Chen vd., 2022). Son olarak, toplu katıların veya çok taneli sistemlerin davranışı, tane morfolojisinden önemli ölçüde etkilenir çünkü bu sistemlerin birçok fiziksel ve kimyasal özelliği tane şekline ve yüzey geometrisine bağlıdır (Bergeron vd., 1986). Bu bağlamda, tanelerin davranışı ve sürdürülebilir kullanımları, tane şekli ve **tane boyut dağılımı (PSD)** özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiğinden (Murphy vd., 2019), çok sayıda mühendislik disiplinindeki uygulamalar,

tanelerin boyutunun yanı sıra tane şeklinin de bilinmesini gerektirir. Tane şeklinin malzeme bilimi ve teknolojisinin yanı sıra agregadan farmasötik tozlara kadar birçok başka bilim ve teknoloji dalında kullanıldığı çok sayıda örnek vardır (Horiba Instruments, Inc., 2012, Lim vd., 2013).

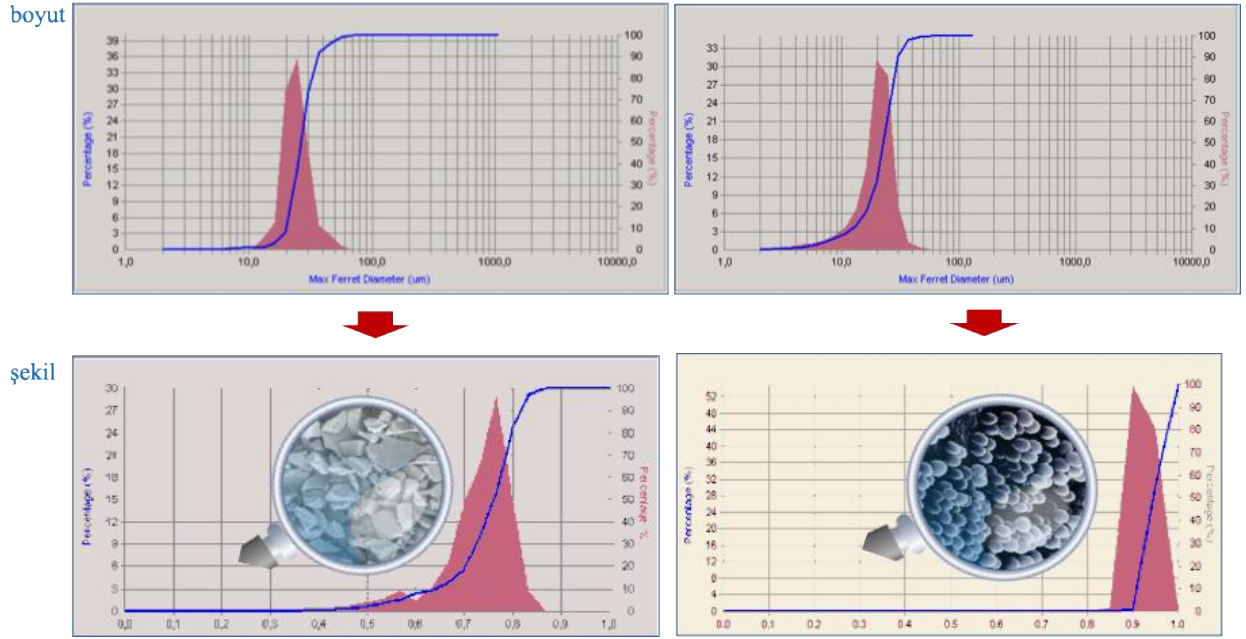
İlk şekil karakterizasyonu çalışmaları, 1900'lerde kayaç parçalarını inceleyen Wadell (1932) ile başlamış olsa da süreç üzerindeki etkilerine çok az dikkat edilmiş ve tane boyutunun etkileri birçok nedenden dolayı daha fazla araştırma ilgisini çekmiştir. Çünkü, tane şeklinin etkisini ölçmek için gerçek tanelerin karmaşık şeklini karakterize etmek zor olduğundan şekil karakterizasyonu için bir standart yoktur (Bagheri vd., 2015). Ayrıca, küresel olmayan taneler kullanıldığında, şekil değişkeninin etkisini diğer değişkenlerden ayrı olarak değerlendirmek zordur (De Vicente vd., 2010). Fakat, endüstriyel malzemeler için taneler çok nadiren küreseldir (Durney ve Meloy, 1986). Tane şekli, bir nesnenin mutlak boyutundan bağımsız olarak dış formu, konturları veya ana hatları olarak tanımlanabilse de boyut ve şekil arasındaki ayırım her zaman belirgin değildir. Ayrıca, tane şekli, çoğunlukla kırıcılardan ve değirmenlerden çıktıkça küçüldükçe değişir. Başka bir deyişle, yalnızca tane boyutu değil, aynı zamanda tane şekli de ham maddeleri en iyi şekilde karakterize etmek için kullanılır. Taneler düzensiz olduğundan veya çeşitli endüstrilerde ideal küreden saptığından, herhangi bir tane malzemesinin tane boyutu ve dağılımının tahmini, tane şeklinden etkilenir. Bu nedenle, tek bir boyut değerine dayalı istatistikler, tane malzemesinin gerçek performansını yansıtmak için yetersizdir (Crompton, 2005) ve şekil analizi olmadan tane boyutu, küresel olmayan taneler için ortalama tane boyutunun önemli ölçüde düşük tahmin edilmesine ve PSD'de yanlışlıklara yol açabilir (Vision Analytical Inc., 2022). Genellikle taneler bir boyut küçültme işleminden çıktıktan sonra şekillerinin küresel olduğu varsayılır, oysa boyut küçültme işleminde uygulanan kuvvetler etkisiyle farklı şekiller elde edilmektedir. Örneğin kâğıt yapımında ve parfüm yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılan nişasta tozuna ait 2 farklı numune için boyut dağılımı ve aspekt oranı dağılım grafiği verilen Şekil 6'dan açıkça görüldüğü gibi aynı d_{50} değerine sahip olan iki farklı numuneye ait tanelerin şekilleri tamamen birbirinden farklı olabilmektedir. Buna ilaveten, tane boyut histogramı verilen Şekil 7'ye göre, Portland çimentosuna ait bir numunenin yaklaşık 30 μm merkezli düzgün bir boyut dağılımı görülmektedir. Şekil karakterizasyonu sonucu elde edilen tanelere ait küçük resimlerden oluşan bir örneğine bakıldığında, bu örneğin birden fazla (3 farklı grup) tane şeklinden oluştuğu açıktır. "Boyut" verileri, kullanıcıyı yanıltarak tanelerin hepsinin aynı tipte olduğunu düşünmesine neden olabilir, oysa öyle değildir. Şekil 8'den görüleceği gibi tane boyutu dağılımlarında farklılığın olmadığı farklı malzemeler için görüntü analizi sayesinde tanelerin şekil faktörleri ve maksimum çapları arasında bariz farklar olduğu ortaya konulmuştur. Dolayısıyla, farklı şekillerde olan taneler sonraki bir süreçte tamamen farklı davranacaktır (Vision Analytical Inc., 2022). Örneğin, Sedwell vd., (2017), düşük küresel yüzeylere sahip peletlerin, daha yüksek küresel peletlere kıyasla daha yüksek bir ilaç çözünme gösterdiğini bildirmiştir (bkz. Şekil 9).



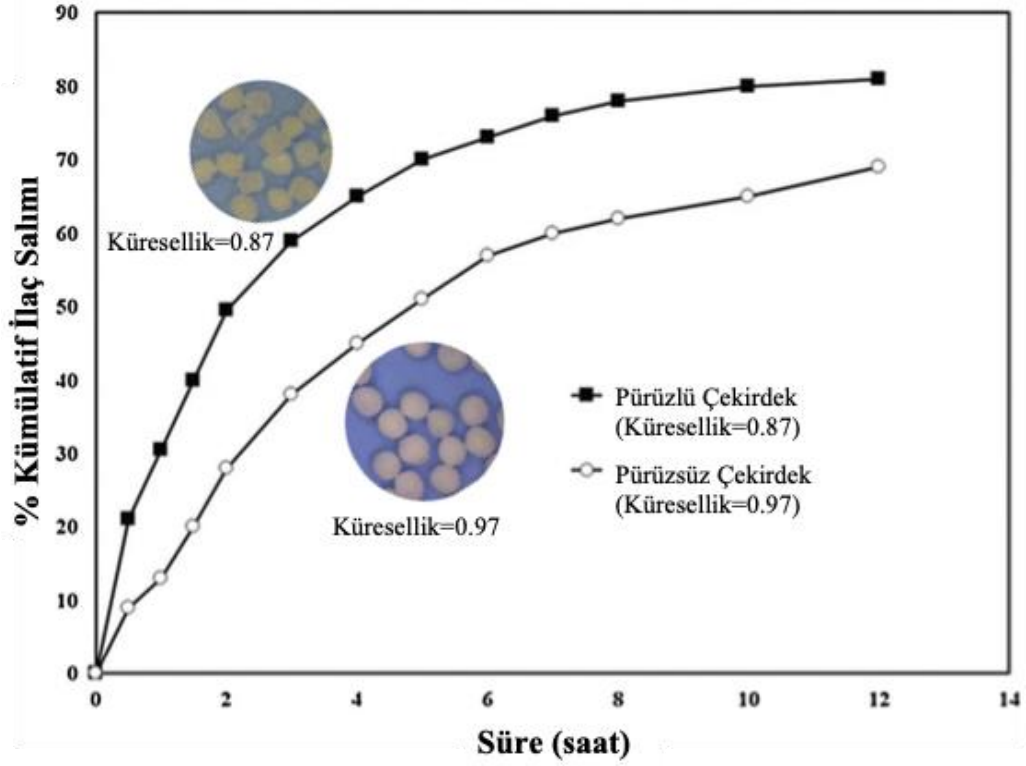
Şekil 6. Medyan (d_{50}) değerleri aynı olan iki numuneyi oluşturan tanelerin şeklinin karşılaştırılması (Microtrac Retsch GmbH, 2022, Retsch Technology, 2022, Ulusoy, 2023).



Şekil 7. Bir Portland çimentosu örneğine ait boyut histogramı ve tane şekli dağılımına (Vision Analytical Inc., 2022, Ulusoy, 2023).



Şekil 8. Tane aynı iki farklı örneğin tane şekillerinin kıyaslanması.



Şekil 9. Şeker kürelerine yüklenen klorfeniramin maleat ilacının salım profili üzerinde başlangıç şeker kürelerinin küreselliği ile ölçülen tane şeklinin etkisi (Sedwell vd., 2017).

Doğal veya tasarlanmış koloidal taneler sıklıkla düzensiz veya küresel olmayan şekillere sahip olduğundan ve teorik varsayım ideal küresel tanelere dayandığından, küresel olmayan tanelerin şeklinin, akışkan ve yüzey arasındaki etkileşimi değiştirmesi ve böylece işlemlerde veya uygulamalarda tanelerin davranışlarını veya özelliklerini değiştirmesi beklenir (Ma vd., 2020). Tane davranışının daha iyi anlaşılması, tane şeklinin sistematik değerlendirmesine bağlıdır, çünkü şekil, taneler malzemenin proseslerdeki davranışını etkileyen yaygın bir değişkendir (Cho vd., 2006). Bu nedenle, tane boyutu ve şeklinin proseslerdeki granüler malzemelerin davranışı üzerindeki etkisini araştırarak tane proseslerini anlamak ve kontrol etmek giderek artan bir çaba olmuştur. Tane şeklinin önemli olduğu açık olsa da cevher hazırlama alanında tane şekli dağılımlarının rutin analizi için hala standart bir yaklaşım yoktur (Little vd., 2016). Dahası, birçok endüstriyel malzemede tane şeklinin önemi sıklıkla göz ardı edilmekte veya hafife alınmaktadır. Bununla birlikte, tane şekli, belirli bir endüstriyel malzemeyi en iyi performans gösteren ürünlere dönüştürmede anahtar rol oynayabilir. Ayrıca, tane şeklinin nesnel olarak tanımlanamaması, tane şeklinin etkisinin birçok teknik analize dahil edilmesinin ilerlemesini engellemektedir. Tane şekli, endüstriyel malzemelerin birçok özelliğini belirlediğinden, üreticiler en iyi performans derecesine ulaşmak için tane morfolojisini de analiz etmeli ve değiştirmelidir. Bir başka ifadeyle, mühendislik alanındaki çok sayıda çalışmaya göre tane şeklinin taneli malzemelerin özelliklerini (örneğin, çimento ve betondaki agregaların teknik nitelikleri (Arasan vd., 2010, Mora vd., 2010, Santamarina vd., 2004), kataliz özellikleri, ilaç salınımı (Jindal, 2017), ilaç üretimi (Crompton, 2005, Almeida-Prieto, 2007, Yu vd., 2008), toz metalurjisinin mekanik özellikleri (Nouri ve Sola, 2018), toprak mekanik özellikleri (Cho vd., 2006, Youd, 1973, Mitchell ve Soga, 2005, Lee vd., 2017), pigment, boya, plastik, kauçuk, kağıt ve kaplama için endüstriyel minerallerin dolgu özellikleri (Ciullo, 1996, Lobato, 2004, Vanderbilt, 2013, Gantenbein, 2011) ve nanomalzemeler (Edelstein ve Cammarata, 1998, Rao ve Cheetham, 2001, Sanyal vd., 2002) etkilediği bildirilmiştir. Kullanılan malzeme için ürünlerin fiziksel özelliklerini garanti altına almak için ince malzeme niteliklerini ölçmek çok önemli olduğundan, tane şekli, mineral karakterizasyonunun bir parçası olarak doğru bir şekilde tanımlanması ve raporlanması gereken hayati bir faktör olarak işlev görür. Ancak,

yukarıdaki örneklerde vurgulanan tane şekli özelliklerini değiştirmenin etkisini ele alan çalışmalar yetersiz görünmektedir. Ayrıca, düzensiz tane davranışlarının süreçlerdeki özellikleri üzerindeki etkisi henüz tam olarak anlaşılmamış olmasına rağmen, tane davranışının net bir şekilde anlaşılması, tanelerin potansiyel uygulamalarını etkili bir şekilde keşfetmek için birincil öneme sahiptir.

ÇEŞİTLİ MALZEMELERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI ÜZERİNDEKİ TANE ŞEKLİNİN ETKİSİ

Mühendislik uygulamaları ve endüstrileri, milimetreden nanometreye kadar değişen boyutlarda çeşitli tane malzemelerle ilgilenir, çünkü taneler, nasıl üretildiklerine ve mekanik özelliklerine bağlı olarak çeşitli şekillerde olabilir (Endoh, 2007). Agregalar, metaller, kömür, seramikler, pigmentler, toner, toprak, mineraller, destek maddeleri, kâğıt hamuru, kâğıt, sentetik lifler, petrokimyasallar, cam, plastikler, kauçuk ve ilaçlar ve eczacılık ürünleri, madencilik, mineral işleme, toz metalurjisi, kimya, petrokimya, enerji, ilaç, nanoteknoloji ve ileri malzemeler dahil olmak üzere çok çeşitli endüstrilerin temel bileşenleri olan granüler sistemleri içeren örneklerden sadece birkaçıdır (Park vd., 2007). Tane işlemede, tane malzemenin davranışının yalnızca ekipman özelliklerine değil, aynı zamanda fiziksel özelliklerine de bağlı olduğu genel olarak bilinmektedir (Miwa vd., 1972). Organik/mineral taneler birçok mühendislik uygulamasında kullanıldığından, tanelerin boyutu ve şekli gibi fiziksel özellikleri, çeşitli endüstrilerdeki kullanılabilirliklerini etkiler. Bu nedenle, tane şekli özellikleri, agregalardan nanomalzemelere kadar geniş bir yelpazede endüstriyel uygulama alanı bulur. Granüler malzemelerin şeklini ve çeşitli özellik ve işlevlere tepkilerini anlamak, katkı üretimi ve toz metalurjisi de dahil olmak üzere ileri üretim, pil ve enerji depolama, çimento ve asfalt gibi yapı malzemeleri, madencilik ve mineraller, metalurji, nanomalzemeler, petrol ve petrokimyasallar, polimerler, plastikler, lifler, tarım bilimleri, tıp bilimleri, kimya ve uygulamalı kimya ve eczacılık bilimleri gibi birçok mühendislik uygulamasında önemlidir (Santamarina ve Cho, 2004). Bu nedenle, bu derlemede, taneler ve şekil etkilerinin, belirli uygulamalarda istenen özelliklere bağlı olarak çeşitli mühendislik alanları üzerindeki etkileri alt kategoriler olarak verilmiştir.

Mineral Dolgu (Fillers) Endüstrisi

Mineraller, aşındırıcılar, seramik hammaddeleri, kimya, inşaat malzemeleri, tüketici ürünleri, elektronik ve optik bileşenler, elektrik, gübreler, dolgu maddeleri, filtreler ve emiciler, flakslar, gıda, döküm kumu, değerli taşlar ve mücevherler, cam, tıbbi ürünler, ilaçlar, pigmentler, refrakterler ve petrol kuyusu sondaj sıvıları gibi çeşitli formlarda birçok büyük endüstride kullanılmaktadır. 2020 yılında yalnızca ABD'de yakıt dışı mineral üretiminin tahmini toplam değerinin 82,3 milyar ABD doları, endüstriyel mineral üretiminin ise 54,6 milyar ABD doları olduğu bildirilmiştir. Genel olarak, işlendikten sonra mineral ürünlerinin değerinin, çıkarılan mineral ürünlerinin değerinden 10 kat daha fazla olduğu bildirilmiştir (U.S. Geological Survey, 2021).

Çeşitli mineral taneleri, çok sayıda endüstriyel uygulamada dolgu maddesi, kaplama, adsorplayıcı ve emici olarak veya kataliz olarak kullanılmaktadır. Boya, kozmetik, asfalt ve beton gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan ince öğütülmüş mineral malzemeler olan mineral dolgular (Persson, 1998), bitmiş ürünlere akış, yangına dayanıklılık, yoğunluk, ısı iletkenliği, renk, parlaklık, opaklık, sertlik, kırılma, darbe dayanımı, deformasyon, viskozite, yumuşama ve elektriksel iletkenlik (Severinghaus, 1975) gibi belirli istenen özellikleri kazandırmak için ucuz ilavelerdir. Ayrıca, kullanıldıkları ürünlerin niteliklerini iyileştirdikleri ve genişlettikleri için mineral genişleticiler olarak da bilinirler. Bir dolgunun sağlayabileceği faydalı etkiler elbette fiziksel özelliklerine bağlı olduğundan hem işleme hem de nihai özellikleri etkileyen tane şekli, bir dolgu seçerken genellikle dikkate alınması gereken kriterlerden (sertlik, renk, yoğunluk, kırılma indisi ve kimyasal eylemsizlik) birisidir. Dolgu minerallerinin çoğunluğunun talk, mika, kaolin, atapulgit, çökelmiş kalsiyum karbonat (PCC) ve karbonil demir taneleri gibi uzunlamasına (veya iğnemsiz, pulsu, levhamsı ve bloklu gibi) şekil sınıflandırmalarına (Ciullo, 1996, Lobato, 2004, Vanderbilt, 2013, Wang vd., 2005, Wang vd., 2015, Guillet, ve Kriens, 1984, Hubbe ve Gill, 2016, Purcell ve Parker, 2002) girdiği bildirilmiştir.

Kauçuk ve Plastik Endüstrisi

Kauçuklar, düşük aşınma ve yırtılma direnci gibi nispeten zayıf polimer-dolgu yapışma potansiyelleri ve düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır ve çok yüksek yüklemelerde, bileşik yumuşaklığında, uzamasında veya esnekliğinde çok az kayıpla kullanılabilirler. Fonksiyonel dolgular, sert ve dayanıklı mineralin kauçuk matrisinden uygulanan gerilimi emmesine yardımcı olduğundan, dolgu maddesi genellikle kauçuk ürünlerinin niteliklerini değiştirmek için kullanılan bileşenler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Kauçuk dolgu maddelerinin çoğu, kauçuk ürünün kullanılabilirliğini veya uygulama kolaylığını artıran büyük bir değer sağlar. Tane boyutu, tane yüzey alanı, tane yüzey aktivitesi ve tane şeklinin, bir dolgu maddesinin kauçuk bileşiğine katacağı özellikleri etkilediği ve tane aspekt oranının düz ve iğne şeklindeki dolgu maddeleri için tane boyutu kadar yararlı olduğu bilinmektedir. Zira, aspekt oranı artması Mooney viskozitesinin, modülünün ve histerezinin artmasına, esnekliğin ve ekstrüzyon büzülmesinin azalmasına ve inklüzyon süresinin artmasına sebep olduğu bildirilmiştir (Vanderbilt Company Inc, 2022). Ek olarak, bu taneler iğnemsiz, lifli veya levhamsı bir şekle sahip olduğunda, stresin matris boyunca yayılmasını daha etkili bir şekilde engelleyeceği de bildirilmiştir. Ayrıca, düzlemsel bir şekle sahip tanelerin, eşdeğer tane çapına sahip izotropik tanelere kıyasla kauçuk matrisiyle temas için daha fazla yüzeye sahip olduğu da bildirilmiştir. Ayrıca, küresel bir dolgu maddesinin aksine, birden büyük bir aspekt oranına sahip katmanlı şekilli dolgu maddelerinin, stresi daha etkili bir şekilde aktarabildiği ve dolayısıyla, mikanın küresel olmayan şekli ve silikanın yüksek dolgu maddesi-dolgu maddesi etkileşiminin, onları en iyi dolgu özelliklerine sahip rakipsiz malzemeler haline getirmiştir (Roshanaei vd., 2020). Kauçuk için gereken öğütülmüş doğal ürünlerin özelliklerinin düşük aspekt oranı, düşük yüzey alanı ve düşük yüzey aktivitesi olduğu bilinmektedir. Örneğin, kauçuk bileşiklerinde en sık kullanılan kalsit türü, izometrik prizmatik tanelere sahip PCC'dir. Benzer şekilde, ağırlığının, eylemsizliğinin, izometrik tane şeklinin ve düşük bağlayıcı ihtiyacının avantajlı olduğu kauçukta ince öğütülmüş barit kullanılır (Lobato, 2004). Uzun tanelerin kauçuğun hizalanma yönü boyunca daha kolay yırtılmasına neden olabilecek bir tane deseni oluşturma eğiliminde olmaları yüzünden, kauçuk dolgusunda aranılan taneler granül tanelerdir (Gupta, 2003). Kalsit mineral taneleri 20 mikrondan küçük ve yuvarlak olduğunda, lastik (jant) ve plastik üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılabilirler (Geologyscience, 2018). Öte yandan, plastiklerin yüksek çekme mukavemeti yerine yüksek darbe mukavemetine ihtiyaç duymaları nedeniyle granüler şekillere göre lif gibi uzun şekilde dolgular tercih ettiği bildirilmiştir (Gupta, 2003). Ayrıca, boyut kararlılığını artırmak, kalıplanmış bileşenlerde sürünmeyi azaltmak, kalıplama döngülerini iyileştirmek ve ısıl sapma sıcaklığını yükseltmek için termoplastiklere düz, tabakalı talk eklenir (Severinghaus, 1975, Guillet, ve Kriens, 1984). Benzer şekilde, en lifli mineral dolgu maddesi olan asbestin, takviye ve viskozite kontrolü üzerindeki etkilerinden dolayı plastiklerde ve yer karolarında kullanıldığı bildirilmiştir (Severinghaus, 1975).

Pigment ve Kozmetik Endüstrisi

Doğal veya yapay, organik veya inorganik bileşikler olarak bilinen ve ışık spektrumunun bir kısmını emebilen ve ardından bu ışığın gözle görülen renge karşılık gelen bir kısmını yayan pigmentler, mürekkep ve boya gibi geniş bir ürün yelpazesinin yanı sıra tekstil, gıda ve kozmetik gibi birçok sektörde kullanılmaktadır (Cilas, 2022). Bu nedenle, pigment kalitesinin tane şekli, özellikle aspekt oranından büyük ölçüde etkilendiği bildirilmiştir, yani tane şekli, tozun temel özelliği olup, paketleme ve hacim yoğunluğunu, gözenekliliği, geçirgenliği, kohezyonu, akışkanlığı, kekleşme davranışını, aşınmayı, sıvılarla etkileşimi ve pigmentlerin örtücülüğünü etkiler (Allen, 1997). Buna ilaveten pigment tanelerinin şeklinin boyanın akışkanlık ve yüzey bozulması özelliklerini de etkilediği bildirilmiştir. Benzer tane boyutuna sahip pigmentler üzerinde çökeltme yoluyla yürütülen bir çalışmada (Holt, 1981), kil tanelerinin şekil faktörü arttıkça kaplama tabakasının düzlem içi çekme dayanımının arttığı, kopma uzamasının ise azaldığı bildirilmiştir (Husband vd., 2006).

Pulsu taneler içeren kozmetiklerin, yuvarlak taneler içerenlere göre daha iyi örtücülük ve optik özellikler sergilediği bilinmektedir (Gupta, 2003). Örneğin, talkta yalnızca çok yüksek saflık ve parlaklığa sahip yumuşak, levhamsı veya lamelli olanlar tercih edilir (Ciullo, 1996).

Dolomit dolgu maddeleri, fiberglas üretimi için hammadde seçeneklerinden biri olarak kabul edilir (Hsieh vd., 2001). Örneğin, güncel araştırmalar, düşük aspekt oranlı dolomit dolgu maddelerinin, yüksek aspekt oranlı olanlara göre modül ve dayanımı etkileme olasılığının daha düşük olduğunu, ancak darbe dayanımını artırmada daha iyi performans gösterdiğini bildirmiştir (Wypych, 2021).

Boya ve Kaplama Endüstrisi

Genel olarak, daha yüksek aspekt oranına sahip pigmentlerin örtücülük ve gelişmiş parlaklık gibi özelliklerinin daha iyi olduğu kabul edilmektedir [(Lobato, 2004, Lohmander, 2000). Ayrıca, pulsu tanelere sahip mürekkep ve boyaların, yuvarlak tanelere sahip olanlara kıyasla daha iyi örtücülük ve optik özellikler gösterdiği bildirilmiştir (Gupta, 2003). Örneğin, ince, ıslak öğütülmüş, düz, tabakalı mika mineral tanelerinin, renk tutma ve hava koşullarına dayanıklılık için özel etkili pigmentler ve dış cephe lateks boyaları için temel oluşturduğu bilinmektedir (Vanderbilt, 2013). Boya katmanına paralel katmanlar oluşturan oldukça yassı tane şekline sahip mika takviyeli polimerlerin kullanımının, özellikle otomotiv sektöründe (U.S. Geological Survey, 2021), önemli ölçüde artmasının beklendiği bildirilmiştir (Koleske, 1995). Zira yassı talk, yüksek yağ emilimi, yumuşaklığı ve parlaklığı nedeniyle parlaklık kontrolüne, TiO_2 aralığına, çökmeye karşı korumaya, katlar arası yapışmaya ve korozyon direncine yardımcı olmak için kaplamalarda kullanılmaktadır (Vanderbilt, 2013). Talkın, iç mekân dekoratif boyalarında boya reçetelerinin maliyetini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda yüzey hidrofobikliği ve lamelli tane şekli sayesinde performansı da artırdığı bildirilmiştir. Ayrıca, düşük nem geçirgenliğine sahip boyalar için vazgeçilmez bir katkı maddesi olan yassı (düzlemsel) talktır, çeşitli boyalarda saten ve mat bir görünüm sağladığı da bildirilmiştir (Wypych, 2021). Benzer şekilde, yassı (düzlemsel) kaolin kili (alüminyum silikat minerali), iç mekân astarları ve mat boyalar için tercih edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, bir levha alüminyum silikat olan pirofillitin iç mekân astarı, uygun fiyatlı düz boya, dokulu boya ve derz dolgu macunlarında mika ikamesi olarak kullanılabilmesi iyi bilinmektedir (Vanderbilt, 2013). Bir tür silika malzemesi olan levha novakülit ise çizilme, aşınma ve hava koşullarına dayanıklılık gibi ekstra özellikler sağlar. Nitekim, pirofillit, kaolin ve mika gibi düz ürün bileşenlerinin tercih edilmesinin nedenlerinden birinin, pigment çökmesini önleyerek uygun dağılımı desteklerken film kurumasına yardımcı olmaları ve film çatlamasına karşı direnç geliştirmeleri olduğu bildirilmiştir (Vanderbilt, 2013).

İğnemsî tane şekline sahip bir kalsiyum silikat minerali olan volastonitin, düşük yağ emilimi gösterdiği için boyalarda tercih edildiği iyi bilinmektedir (Vanderbilt, 2013). İğnemsî yapısının, dokulu boyalara çamur çatlağı direncinin yanı sıra yüksek ovma direnci ve film ömrü sağladığı bildirilmiştir. Özellikle korozyon direnci nedeniyle su bazlı DTM astarlarında, renk tutma özelliği nedeniyle dış cephe lateks boyalarında, ovmaya karşı direnci nedeniyle iç mekân mat boyalarında ve ince öğütülmüş toz boya ürünlerinde parlama ve erken paslanmaya karşı dirençli bir uzatıcı pigment olarak kaplamalarda da kullanıldığı bildirilmiştir (Vanderbilt, 2013). Ayrıca ince öğütülmüş ve mikronize edilmiş sınıfların epoksi toz boyalarda pürüzsüz akış, su direnci, gelişmiş ıslak yapışma ve yüksek parlaklık sağladığı iyi bilinmektedir (Vanderbilt, 2013).

Öte yandan, prizmatik şekli nedeniyle tremolitik talk (magnezyum silikat minerali), daha düşük bir yağ emme oranına sahiptir ve yassı (düzlemsel) talka göre daha kolay dağılma, daha yüksek yükleme seviyeleri, daha az düzleşme ve daha iyi kuru kaplama sağladığı bilinmektedir. Ayrıca dış cephe ve trafik boyalarını daha dayanıklı hale getirdiği de belirtilmektedir (Ciullo, 1996). Blok (tebeşir), skalenoedral (kalsit) ve kısa iğne (aragonit) gibi farklı şekillerde çeşitli kristal yapılarında oluşan GCC'nin, yüksek parlaklığı ve düşük yağ emilimi nedeniyle özellikle iç ve dış mimarilerde olmak üzere her türlü boya ve kaplamada yaygın olarak kullanıldığı bildirilmiştir (Vanderbilt, 2013).

Boya dolgu minerali olarak kullanılan bir diğer örnek ise silika içermeyen ve düzensiz bir şekle sahip olan Nefelin Siyenit'tir. Bu mineral, düz boyaya güçlü bir fırçalama ve mükemmel dış hava koşullarına dayanıklılık, renk ve parlaklık tutma ve tebeşirlenme ve buzlanmaya karşı direnç sağladığı için çeşitli boya ve kaplamalarda kullanılır (Vanderbilt, 2013).

Seramik Endüstrisi

Nefelin siyenit, alüminyum oksit, bentonit veya uçucu külün, cam veya polimer boncuklardan çok daha yüksek yoğunluklara sahip seramik küreler yapmak için kullanıldığı, ancak daha kalın duvarları sayesinde daha ucuz, daha sağlam ve mekanik olarak dayanıklı oldukları bildirilmiştir. Ayrıca, bilyalı rulman hareketi sayesinde tüm küresel malzemeler gibi yüksek paketleme yoğunluğuna ve gelişmiş akış özelliklerine sahiptirler. Dahası, beneklenme bileşiklerinin çatlama direncini artırır ve di-elektrik sabitini, eğilmeyi ve büzülmeyi azaltırlar (Wypych, 2021).

Hem doğal hem de sentetik trombosit ve kısa elyaf sistemlerinin seramik bilimi ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanıldığı iyi bilinmektedir. Çok sayıda oksit, nitrür ve karbürün (Al_2O_3 , BN, SiC), kaolinitlerin, çeşitli kil minerallerinin (montmorillonit ve hidrotalsit) ve fillosilikatların (talk) tabakalı formları trombosit sistemlerinde mevcutken, SiC, Al_2O_3 lifleri ve volastonit, seramik teknolojisinde kullanılan kısa lifli sistemlerde mevcuttur (Pabst ve Berthold 2007).

Aşındırıcı ve Patlayıcı Endüstrisi

Aşındırıcı minerallerin tane özelliklerinin, kesme ve parlatma ekipmanlarının çalışmasını da etkilediği çok iyi bilinmektedir. Örneğin, tozun aşındırıcı özelliklerini belirtmek için kullanılan aşındırıcı katsayısının (Ka) sertliğe, tane şekline, yoğunluğa ve tane boyutlarına bağlı olduğu bildirilmiştir (Neikov, 2009). Tanelerin şeklinin köşeli veya sivri olması ile aşındırıcı tane aşınma oranı arasında güçlü bir korelasyon olduğu bildirilmiştir (Mikli vd., 2001), bu nedenle, aşınma uygulamaları için sivri köşeli taneler tercih edilmektedir. Benzer şekilde, aşındırıcı özelliklerin, açılal şekilli ve nispeten yüksek aspekt oranına sahip düzensiz taneler için daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Davies, 1975, Mikli vd., 2001). Ayrıca, aşındırıcı endüstrisinde köşeli tanelerin düz tanelere göre tercih edildiği, çünkü yuvarlanmak yerine kayma eğiliminde oldukları ve bu nedenle keskin özelliklerini aşındırılacak yüzeye aktarma olasılıklarının düşük olduğu bildirilmiştir. Aksine, patlayıcı endüstrisinde düzgün küresel tanelerin tercih edildiği bildirilmiştir çünkü özellikle keskin kenarlı ve köşeli düzensiz taneler, başlatıcıların kimyasal olarak kararsız hale gelmesine neden olur (Gupta, 2003).

Kâğıt Endüstrisi

Kağıtlarda kullanılan dolgu maddelerinin, kâğıdın yapısını önemli ölçüde değiştirebildiği ve nihai uygulamada performansını etkileyebildiği bilinmektedir. Bu nedenle, dolgu maddelerinin tane şekilleri ve bu şekillerin malzemenin görünür yoğunluğunu, mukavemetini, optik niteliklerini ve diğer önemli özelliklerini nasıl etkileyebileceği önemlidir (Adams, 1993, Gill ve Scott, 1987, Gill, 1989, Weigl ve Ritter, 1995, Bown, 1996, Bown, 1998). Başka bir deyişle, mineral dolgu maddesi tanelerin farklı şekil ve boyutlarının, günümüzün modern kâğıt üreticilerine kâğıt özelliklerini değiştirmek için çeşitli seçenekler sunduğu bilinmektedir. Bu nedenle, mineral tanelerinin boyut ve şeklinin kâğıt sektöründe sertlik, çekme ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikler için bir avantaj sağlayabilmektedir (Adams, 1993). Örneğin, tabakalı tanelerin yüksek görünür yoğunluğa sahip kâğıt ürünleri için yararlı olabileceği bildirilmiştir (Hubbe ve Gill, 2016). Dahası, levhmsıa dolgu maddelerinin kağıtlara daha fazla parlaklık ve daha az gözeneklilik kazandırarak baskıya uygunluklarını artırdığı bilinmektedir (Lobato, 2004, Yang ve Luo, 2015). Örneğin, yüksek saflıkta, mikronize edilmiş düz (tabakalı) talk, zift adsorpsiyonu ve kâğıt kaplama ve dolgusu için tercih edilen bileşendir (Hubbe, 2004). Ayrıca, kâğıt yapım dolguları için öğütülmüş kalsiyum karbonatın (GCC) tipik tane şekli ve aspekt oranı (uzunluk/genişlik) değerlerinin bloklu ve 1 ila 1,5 olduğu bildirilmiştir (Hubbe ve Gill, 2016). Öte yandan, mineral dolgulu polipropilen ve dolgulu ve kaplamalı kâğıdın mekanik, optik ve reolojik özelliklerini inceleyen bir çalışmada, akışkanlık, taşıma kolaylığı, işleme, paketleme ve karıştırma süreçlerinde tanelerin küresel yakın olmalarının istendiği bildirilmiştir (Adams, 1993).

Cevher Zenginleştirme Prosesleri

Tane şeklinin sınıflandırıcı performansını ve tane boyut dağılımı ölçümlerini potansiyel olarak değiştirdiği bilinse de (Little, 2016, Kashiwaya vd., 2023, Wills ve Napier-Munn, 2012), öğütülmüş mineralleri ve cevherleri prosesler açısından ölçmek, ilişkilendirmek ve karakterize etmek için çok az çaba sarf edilmiştir. Bu nedenle, mineral işleme alanında tane şeklinin faydalı kullanımı açısından önemi tam olarak anlaşılmamıştır (Pourghahramani ve Forsberg, 2005). Çeşitli mineral işleme birim operasyonlarında tane şeklinin rolü aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Manyetik ayırma

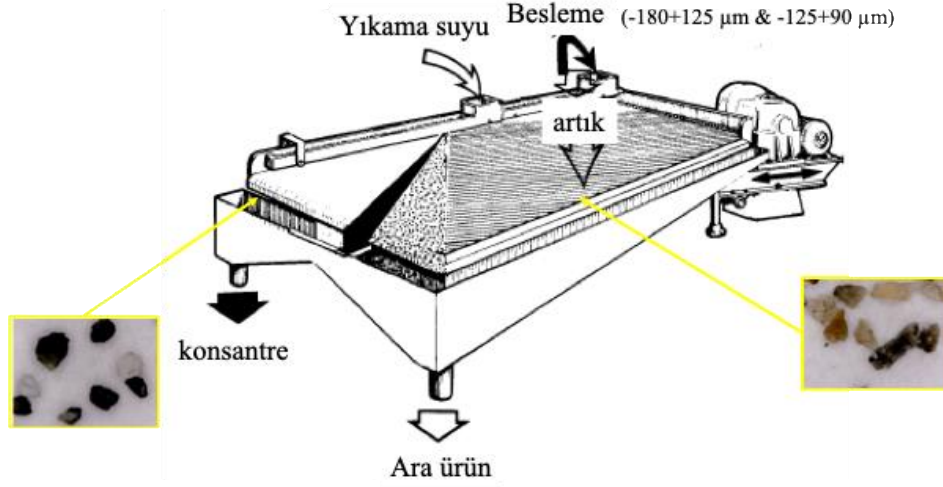
Uzun tanelerin ($w > 1$ ile) disk şeklindeki tanelerden ($w < 1$ ile) daha kolay mıknatıslandığı belirtilmiştir (Galipeau ve Castañeda, 2012).

Elektrostatik ayırma

Tane şekline dayalı teorik modeller oluşturmak için atık baskı devre kartlarından alınan üç farklı metal malzeme kullanılarak yapılan bir araştırmada ise, farklı tane şekillerinin (küre, silindir ve pulsu) **Corona-elektrostatik ayırımındaki** hareketleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, üç farklı şekilli tanenin hareket davranışının da farklı olduğunu görülmüştür. Küresel taneler en uzağa, ardından silindirik taneler ise en yakına hareket ettirilebilirken, pulsu tanelerin ise en yakına fırlatıldığı bildirilmiştir (Lu vd., 2008).

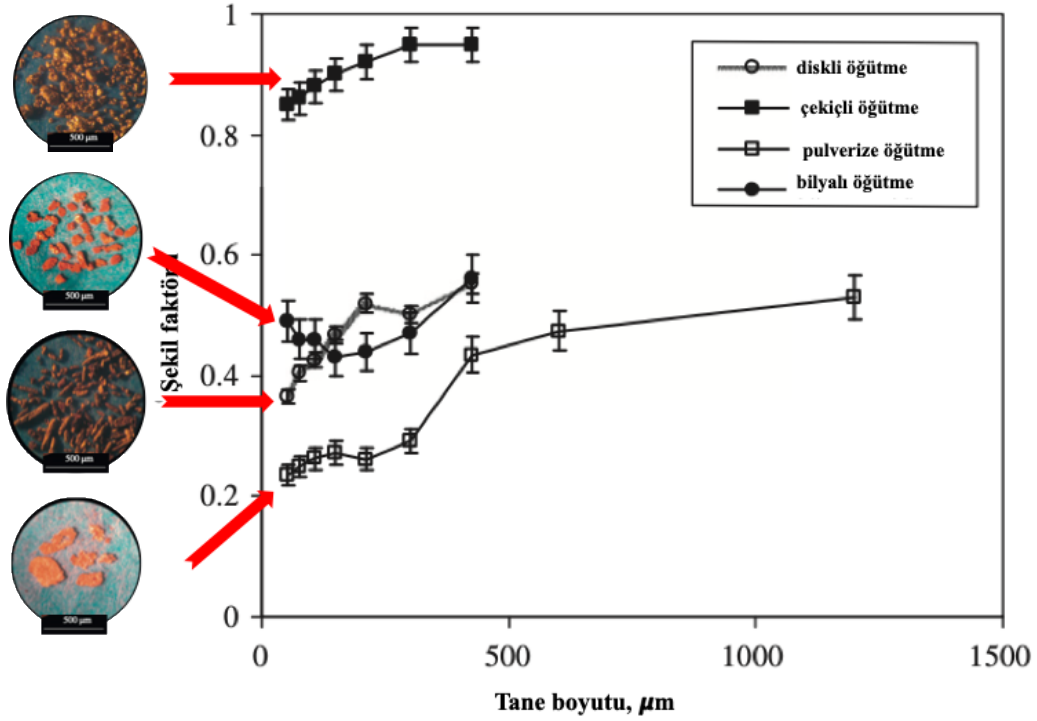
Gravite zenginleştirme

Bir sarsıntılı masada tanelerin çoğunlukla yoğunluklarına göre ayrıldığı ancak bir dereceye kadar boyut ve şekillerin de etkili olduğu bilinmektedir (Richards, ve Locke, 1940, Sivamohan, 1985, Brits, 1991, Aplan, 2003). Çünkü, separasyonun çoğunlukla tanelerin hidrolik yer değiştirmesinden kaynaklandığı ve tane şeklinin tane hareketlerini etkilediği, özellikle düz tanelerin yuvarlanma olasılığının daha düşük olması nedeniyle separasyonu daha karmaşık hale getirdiği öne sürülmüştür (Pryor, 1965). Ayrıca, suda akan tanelerin hızlarının ortamdaki direnç kuvvetlerine bağlı olarak değişeceği ve su ortamında hareket eden farklı şekillerdeki tanelerin farklı direnç kuvvetlerine maruz kalacağı da düşünülmektedir (Ofori-Sarpong ve Amankwah, 2011). Örneğin, $(-0,212 + 0,074 \text{ mm})$ mika mineralinin, sarsıntılı masasındaki lamine şekli nedeniyle feldspattan kolayca ayrılabilceği bildirilmiştir (Kademli ve Gulsoy, 2012). Dahası, sarsıntılı masasının ve masa yapısının çalışma parametrelerinin optimizasyonunun, öğütme işlemiyle vanadyum tanelerinin lamel şekli üretildikten sonra ayrımı iyileştireceği öne sürülmüştür (Zhao vd., 2013). Dinamik görüntü analizi (DIA) ve görsel teknikler, yani taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve stereo mikroskop kullanılarak bir Türk kromit zenginleştirme tesisinin sarsıntılı masası devrelerindeki tüm ürünlerin tane şeklini nicelleştiren (Şekil 10) başka bir yakın tarihli çalışmada, artık ürün tane şekillerinin, daha yuvarlak olan konsantre ürün tane şekillerinden daha uzun olduğu ortaya çıkmıştır (%95 güven düzeyinde). Ürünlerin tane şekillerindeki farklılığın, yuvarlak ve uzun tanelerin masa yüzeyinde yuvarlanma ve kayma hareketiyle ilgili olduğu, tane şeklinin yer çekimiyle ayrılmayı etkileyen parametrelerden biri olduğu belirtilmiştir (Ulusoy ve Atagün, 2023).



Şekil 10. Kromit cevherinin sarsıntı masası zenginleştirme devresi için DIA tarafından belirlenen ortalama aspekt oranı değerleri (Ulusoy ve Atagun, 2023'ten modifiye edilmiştir).

Birçok cevher zenginleştirme tesisinde, altın cevherlerini gravite zenginleştirmeye hazırlamak için farklı öğütme ekipmanları kullanılmaktadır. Çünkü, Altın gibi dövülebilir metallerde, öğütme sırasında uygulanan kuvvetlere tepki olarak tane şekli değişebilmekte ve bu şekiller yerçekimi konsantrasyonunu etkileyebilmektedir. Ofori-Sarpong, (2011) bu kapsamda yaptıkları çalışmada, küresel tanelerin çekiçli değirmenle, puro biçimli tanelerin disk değirmenle ve pulsu tanelerin de bilyalı değirmen ve titreşimli pulverizatör kullanılarak öğütülerek hazırlanabileceği bildirmiştir (Şekil 11). Yukarıda belirtilen değirmenlerle üretilen bu malzemeler Knelson konsantratörü (yerçekimi konsantrasyonu) ile ayrıştırma işlemine tabi tutulduğunda sırasıyla 28.3, 24.0, 23.6 ve 21.7 zenginleştirme oranları elde edildiği bildirilmiştir. Bu nedenle, bu numuneler bir Knelson konsantratörü ile zenginleştirilmek üzere hazırlanırken, puro biçimli ve pulsu taneler üretenlere kıyasla yuvarlak taneleri üretebilen bir değirmen kullanmanın daha avantajlı olacağı bildirilmiştir.

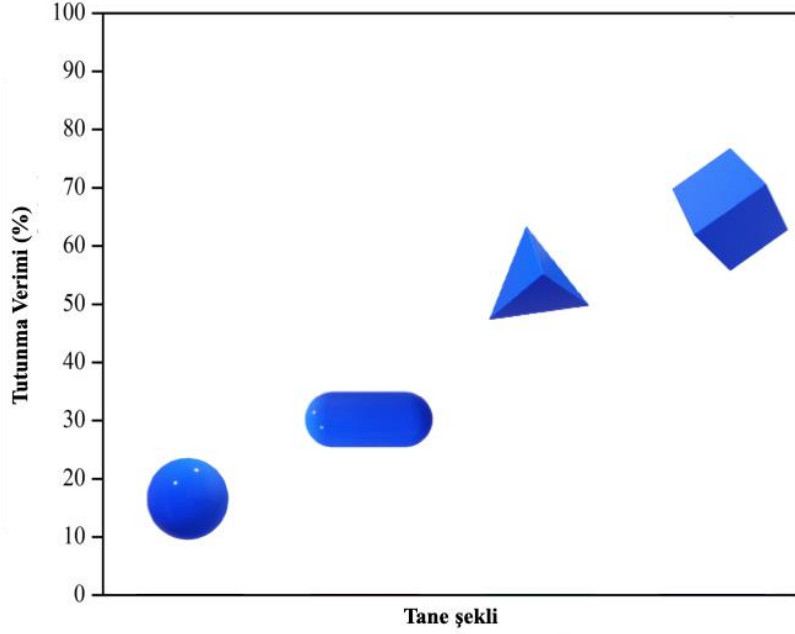


Şekil 11. Çeşitli öğütme sistemleriyle elde edilen altın tanelerinin şekillerinin karşılaştırılması (a) çekiçli öğütme (b) diskli öğütme, (c) pulverize öğütme (d) bilyalı öğütme (Ofori-Sarpong vd., 2011).

Başka bir çalışmada, farklı öğütülmüş şelit tanelerinin farklı dilinimlenme (*klevaj*) yüzeyleri ortaya çıkardığı ve bunun toz modifikasyon teknolojisinde birincil öneme sahip ürün şekillerinde farklılıkla sonuçlandığı bildirilmiştir. Bunun da toplayıcılara karşı farklı yüzey reaktivitelerine neden olduğu ve flotasyon sürecini optimize etmeye yardımcı olabileceği bildirilmiştir (Gao ve Li, 2018). Düzensiz tanelerin, birçok çalışmada daha yüksek flotasyon hızı ve flotasyon kazanımı açısından küresel tanelere göre daha avantajlı olduğu düşünüldüğünden (Ulusoy vd., 2003, Koh vd., 2009, Ma vd., 2018, Guven vd., 2016), uygun öğütme süresiyle doğru öğütme yönteminin seçilmesinin flotasyon ayırma performansını iyileştirebileceği bildirilmiştir (Ulusoy ve Bayar, 2022).

Flotasyon

İnce tanelerin zenginleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan kompleks bir proses olan flotasyon işleminde de mineral tanelerinin hava kabarcıklarına tutunma kavramı, prosesin verimliliğini ve etkinliğini belirlemede önemli bir rol oynar. Flotasyona beslenen taneler bir değirmende öğütüldüğünden, genellikle küresel olmayan, köşeli veya keskin kenarlı yüzeylere sahiptir. Bu nedenle, flotasyonda üç fazlı temasın oluşumu için öğütülmüş tanelerin yüksek yoğunluklu kenar ve köşelerinin varlığı, tanelerin hava kabarcığına tutunma verimliliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Küresel, silindirik, üçgen prizmatik ve kübik tanelerin hava kabarcıklarına tutunma verimleri, çökme hızları, çarpışma verimleri ve indüksiyon süreleri temelinde bağlanmalarını inceleyen bir çalışma ise kabarcık-tane tutunma testi sonuçları, tutunma veriminin kübik>üçgen>silindirik>küresel şeklinde (Şekil 12) değiştiğini göstermiştir (Ma vd., 2023). Küp şeklindeki tanenin üç fazlı temas hattının küresel taneninkinden daha büyük olduğu ve bu durumun bağlanma kararlılığını iyileştirip ayrılma verimliliğini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, flotasyona beslenen tanelerin şeklinin uygun bir değirmen kullanılarak oluşturulabileceği ve böylece daha düşük toplayıcı konsantrasyonuyla daha yüksek flotasyon veriminin elde edilebileceği gerçeğine ışık tutmaktadır.



Şekil 12. Farklı şekillerdeki tanelerin flotasyon tutunma verimlerinin karşılaştırılması (Ma vd., 2023).

ÖĞÜTME İLE TANE ŞEKLİNİN MODİFİKASYONU

Dünya genelinde ülkelerin net sıfır hedefine erişmeleri sadece daha temiz bir enerji üretmeyle ilgili değildir aynı zamanda enerjiyi daha verimli kullanmada masif bir iyileştirme de gerektirmektedir. Bu bağlamda endüstriyel enerji kullanımı performansının iyileştirilmesi özellikle verimli öğütme, iklim değişiklikleri ve küresel ısınmanın azalması hedeflerine ulaşılabilmesi için çok önemli bir role sahip olmaktadır.

Cevher hazırlama işlemleri arasında en çok enerji tüketen birim işlemi olan öğütmenin doğru bir şekilde yapılabilmesi malzemeyi öğütecek değirmenlerin uygun niteliklerde olup olmamaları ve doğru seçilip seçilmediklerine bağlıdır. Sadece harcadığı enerjinin ancak %1-5'inin boyut küçültmeye harcayan, toplam yatırım maliyetinin %50'sini, toplam işletme maliyetinin %60'ını karşılayan ve enerji yoğun bir süreç olan boyut küçültmedeki % birkaç tasarruf tüm madencilik işlemlerinde büyük miktarlarda maddi tasarruf anlamını taşımaktadır.

Pek çok alanda (aşındırıcı, metal tozu, kimya, boya, kâğıt, pigment, cam, seramik, gıda, enerji ve yakıt, kireçtaşı, çimento, plastik, lastik, refrakter malzeme, ilaç, tuz gibi) uygulanan öğütme, sonraki prosesler için uygun bileşenler elde etmek amacıyla tane boyutunu küçültmek için kullanılan standart bir işlemdir. Öğütme yöntemlerinin prensibi, bileşene kuvvet uygulayarak ham malzemelerindeki çeşitli fiziksel yapılar arasındaki bağların koparılmasıdır. İçerik bileşenleri için enerji girdisi ve tane boyutunun küçültülme derecesi, üretim uygulamalarında önemli faktörlerdir. Bileşenlerin tane boyutunun küçültülmesi, malzeme işleme için birçok fayda sağlayabilir. Hammaddelerin tane boyutunun küçültülmesi, cevher içindeki gangla birlikte bulunan değerli minerallerin serbestleşmesini sağlayarak değerli mineralin zenginleştirilmesini iyileştirebilir ve peletleme kapasitesinin yanı sıra pelet kalitesini de artırabilir (Goodband vd., 2002). Ayrıca öğütme, liç reaktiflerinin etkileşime girebileceği mevcut yüzey alanını artırır (Mavromichalis vd., 2000, Lyu vd., 2019).

İşlenmiş malzemelerde boyut ve şekil dağılımları, yüzey alanı, kimyasal ayrışma, kafes bozulması, polimorfik dönüşüm, yüzey serbest enerjisi ve iletkenlik gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerde genel olarak değişikliklere neden olduğu bilinen öğütme ile elde edilen değişikliklerin boyutu büyük ölçüde malzeme ve

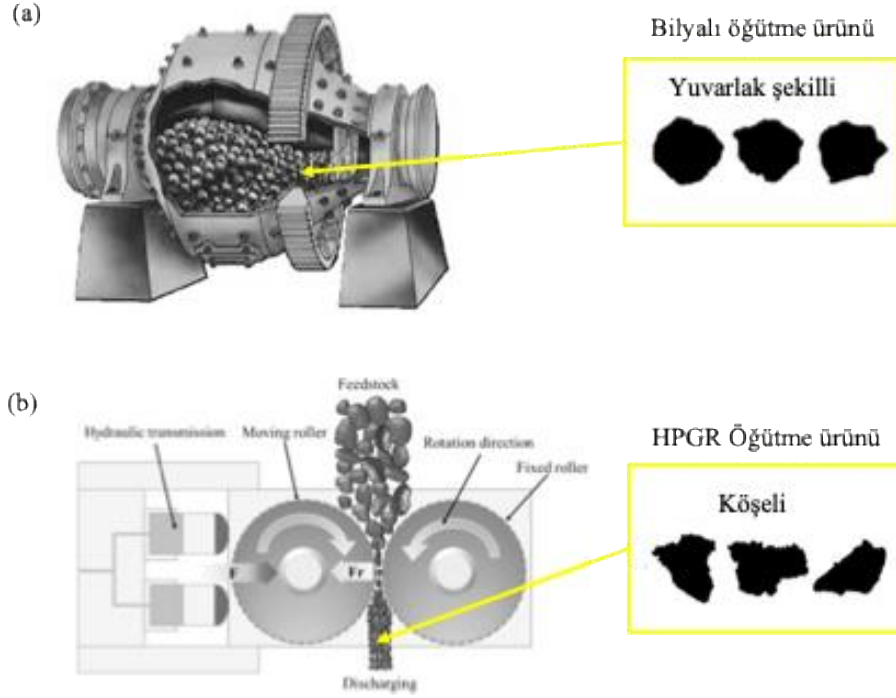
değirmen özellikleri, öğütme yöntemi, enerji girişi, ortam sıcaklığı ve basıncından etkilenmektedir (Orumwense ve Forsberg, 1991).

Belirli bir kırılma tipinin değirmen ürünlerinin tane şeklini etkilediği iyi bilinmektedir. Örneğin, darbeyle kırılma genellikle, ilerleyen çatlakların kesişme noktasında keskin kenarları ortaya çıkan küresel olmayan bir taneye yol açarken, aşınma modu, kenarların ve köşelerin kırılması veya yüzeyin aşınması yoluyla taneleri yuvarlaklaştırır (Metso Corporation, 2024). Tane boyutları ve uygulanan gerilmeler genellikle normal dağılımları izlediğinden, ürün şekillerinde bir dağılım elde etmek çok doğaldır. Bu nedenle, uygun bir kırılma modu kullanan öğütme koşulları, nihai ürünün morfolojisini kontrol etmede önemli bir rol oynar.

Nitekim Holt (1981), bilyalı değirmenler gibi aktarılan ortam öğütme sistemlerinin daha yuvarlak taneler oluştururken, merdaneli kırıcılar gibi tek geçişli cihazların genellikle köşeli taneler ürettiğini öne sürmüştür. Bu örnekler çoğaltılabilir:

- bilyalı, halkalı merdaneli ve çekiçli değirmenlerin, azalan tane yuvarlaklığına sahip ürünler ürettiği (Pourghahramani ve Forsberg, 2005, Rose, 1961).
- darbeli değirmenin (tek geçişli) kübik şekilli ürünler ürettiği (Durney ve Meloy, 1986),
- silindirik kırıcının kübik şekilli ürünler ürettiği (BS 2955:1993),
- döner kırıcının keskin (angular) şekilli ürünler ürettiği (Durney ve Meloy, 1986),
- otojen öğütmenin yuvarlak şekilli ürünler ürettiği (Forsberg ve Zhai, 1985),
- çubuk değirmenin, bilyalı ve otojen değirmene kıyasla en yüksek uzun şekilli kuvars taneleri ürettiği (Ulusoy vd., 2003),
- bilyalı değirmeni, çubuk değirmene kıyasla daha yüksek uzun şekilli manyetit taneleri ürettiği (Denghani vd., 2012),
- bilyalı değirmenin, karıştırmalı değirmene kıyasla daha yüksek uzun şekilli platin grubu mineral taneler ürettiği (Little vd., 2017),
- dikey shaftlı darbeli değirmenin (VSI) çoklu darbeli kırma sayesinde daha kübik ve daha az pulsu veya uzunlamasına taneler ürettiği (Grunditz, 2015).
- öğütme mekanizması, taneler arası çarpışmalara dayanan jet değirmenlerin ise genellikle küresel taneler ürettiği (özellikle, akışkan yataklı jet değirmenler) (Fukunaka ve ark., 2005),
- bilyalı değirmenin, yüksek daireselliğe ve düşük aspekt oranı değerlerine sahip demir cevheri taneleri ürettiği (Şekil 13a),
- Yüksek basınçlı merdaneli değirmenin (HPGR) düşük daireselliğe ve yüksek aspekt oranı değerlerine sahip taneler ürettiği bildirilmiştir (Şekil 13b) (Abazarpoor vd., 2020).

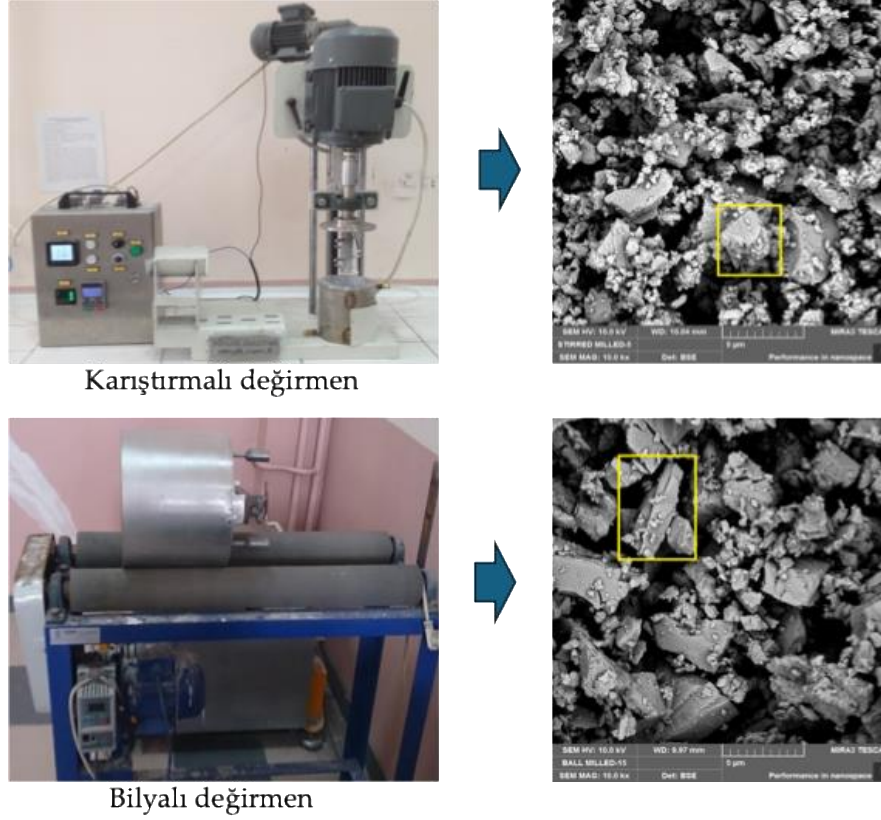
Yukarıdaki örneklerden de anlaşılacağı üzere aynı malzeme ile öğütülen farklı değirmenlerin farklı şekilde ürünler vermesine ilaveten aynı değirmen ile öğütülen farklı yapıda malzemelerin tane şekilleri de farklı olabilmektedir. Diğer bir ifadeyle, her malzeme öğütme sürecinde farklı performans gösterir ve farklı öğütme özellikleri sergiler (Vogel ve Peukert, 2003). Malzemenin içsel özelliklerinin ve üretim sürecinin tane şeklini belirlemede önemli bir rol oynadığı bilinse de herhangi bir boyut küçültme sistemi için uygulanan ayarların genellikle ekipman türüne, özelliklerine ve parçalanmış tanelerin boyutuna bağlı olacağı belirtilmiştir. Başka bir deyişle, değirmen tipinin tane şekli üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu, ancak malzemenin özelliklerinin (saflık, yoğunluk, boyut, şekil, yapışkanlık, kırılabilirlik, sertlik ve sağlamlık, vs.) de bir faktör olduğu bildirilmiştir (Rose, 1961).



Şekil 13. Bilyalı değirmen ve HPGR ürünlerine ait tanelerin şeklinin karşılaştırılması (Abazarpour vd., 2020).

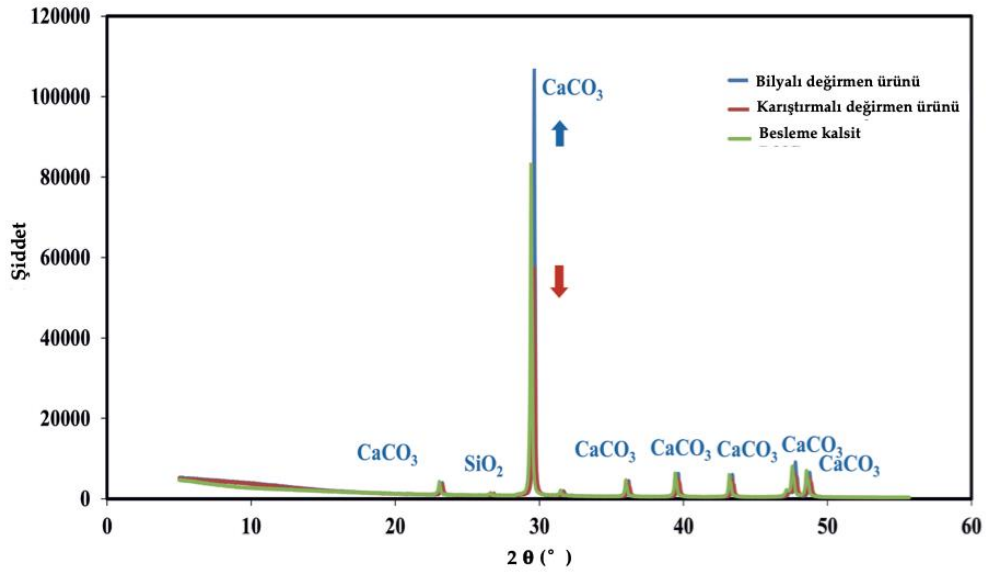
Tane şekli, tozların davranışında etkili bir faktör olduğundan, farklı değirmenlerin ürünleri arasındaki tane şekillerindeki farklılık, cevher zenginleştirme sistemleri veya tanelerin söz konusu olduğu herhangi bir endüstri için özellikle önemlidir (Durney ve Meloy, 1986). Şimdiye kadar, inşaat ve kimya mühendisliği ile madencilik, gıda ve ilaç endüstrileri gibi çok sayıda mühendislik ve endüstriyel uygulamada önemli bir rol oynayan tane şeklinin evrimi (Zhu ve Zhao, 2021) çok az ilgi görmüştür. Aslında, endüstriyel uygulamalar kendine has tane şekline sahip endüstriyel mineraller gerektirir. Örneğin, kâğıt yapımında kullanılacak GCC dolgu maddesi, 1–1,5 aspekt oranına ve 5–12 m²/g yüzey alanına sahip tanelerden oluşmalıdır ve GCC'nin kâğıda gözenekli bir yüzey özelliği kazandırması için tane şeklinin eşkenar dörtgen olması gerekir (Hubbe ve Gill, 2016, Hagemeyer, 1997, Domingo, 2006, Allen, 2007, VTT Products and Production, 2009). Buna ilaveten, plastik hurdaların öğütülmesinin neden olduğu şekil değişkenliğinin değirmen tipine bağlı olduğu ve bu nedenle, kesici değirmenlerin işlenmesi daha zor olan ince plastik teller ürettiği için Almanya'daki bir pilot tesis operasyonunda darbeli değirmenlerin kullanıldığı bildirilmiştir (Langen vd., 1997). Ayrıca Lityum iyon pillerde anot malzemesi olarak kullanılan pulsu doğal grafit bir bilyalı değirmende öğütülerek tane şekli küresel olarak modifiye edilmektedir (Yoshio, 2003). Bununla birlikte elektriksel iletkenliğin arttığı söylenen alüminyum tanelerinin sırrının aspekt oranının azalması olduğu bildirilmiştir (Pinto ve Jimenez-Martin, 2001). Bu nedenle, tane şekli, çeşitli proseslerde ve endüstriyel kullanımlarda taneli malzemelerin birçok özelliğini ve davranışını etkilediği için kontrol edilmeli ve değiştirilmelidir.

Aynı incelikte ($d_{97}=50 \mu\text{m}$) karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde üretilen GCC aspekt oranını karşılaştıran bir çalışmada (Ulusoy vd., 2023) ise, bilyalı değirmende üretilen tanelerin karıştırmalı değirmendeki tanelerden daha yüksek aspekt oranı değerlerine sahip olduğunu göstermiştir (Şekil 14). Bu durum, bilyalı değirmen ve karıştırılmış değirmen tarafından üretilen darbe ve aşınma kırılma modlarına atfedilmiştir.



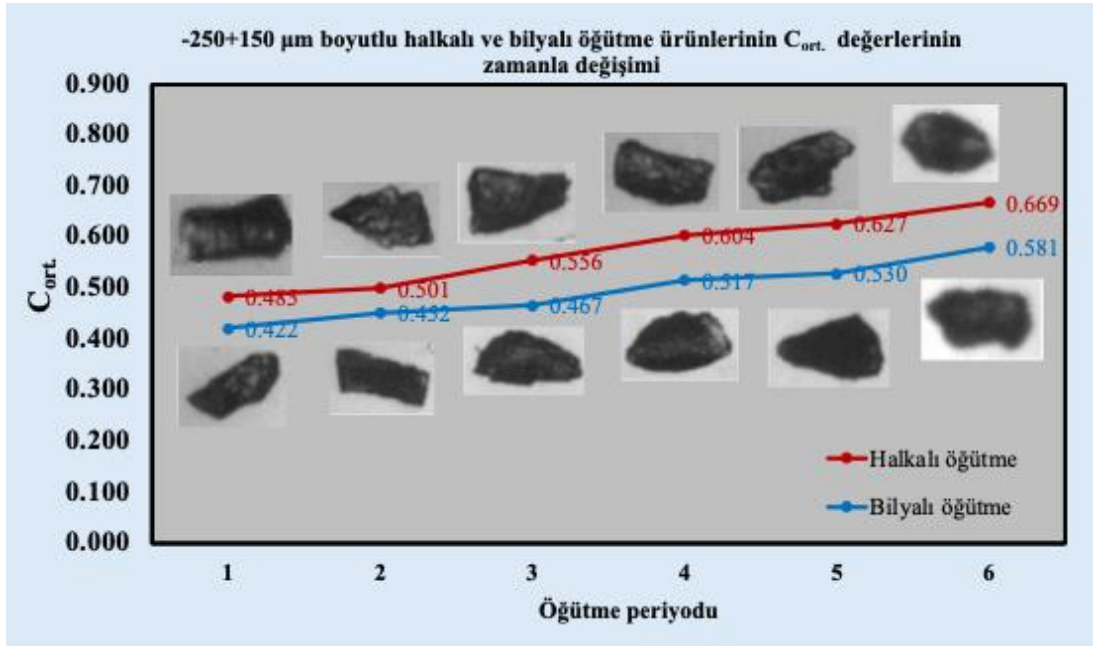
Şekil 14. Bilyalı değirmen ve HPGR ürünlerine ait tanelerin şeklinin karşılaştırılması (Ulusoy vd., 2023).

Şekil 15'teki CaCO_3 'ün en güçlü kırınım piklerine bakıldığında, pik konumlarının aynı, ancak pik şiddetlerinin farklı olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, tanelerin farklı şekillerine bağlanmıştır.



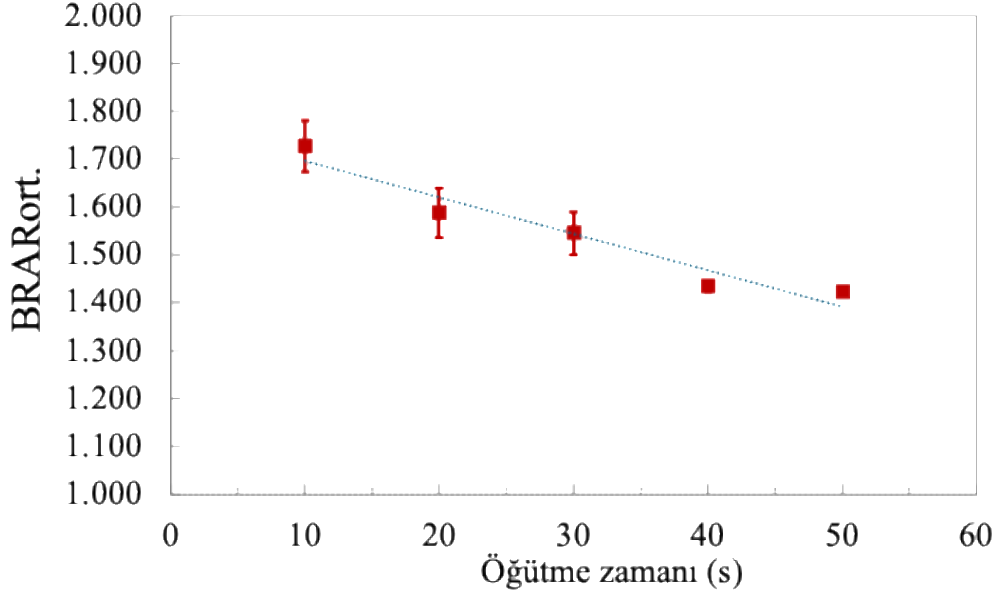
Şekil 15. Bilyalı ve karıştırırmalı değirmende öğütülmüş kalsit ürünlerine ait XRD piklerinin karşılaştırılması (Ulusoy vd., 2023).

Genellikle giderek artan sürelerde öğütme ilerledikçe tanelerin daha küresel hale geldiği bildirilmiştir (BS 2955:1993). Örneğin, Dumm ve Hogg (1990) tarafından gözlemlendiği gibi, bilyalı değirmenlerdeki yuvarlatma etkisi, öğütme sürelerinin uzamasıyla artar. Kaya vd., (2002), bu sonucu kömür ve kuvars mineralleri için doğrulamıştır. Şekil 16 ve 17’den de görüldüğü gibi, artan öğütme süresi ile daha yuvarlak taneler elde edilebilir (Ulusoy ve Bayar, 2022, Kaya vd., 2002, Ulusoy vd., 2024). Endüstriyel bir örnek olarak, günümüzde üretilen pigmentlerin çoğunda hala kullanılan alüminyum tozları ve pullarının, yağlayıcılarla yaklaşık 5-40 saat boyunca yaş bilyalı değirmende öğütülerek üretilebileceği bildirilmektedir (Wypych, 2021). Benzer bir örnek, LIB’lerde anot malzemesi olarak kullanılan grafitin, paketleme yoğunluğu açısından daha yüksek anot performansı sağladığı için, işlemin ilk aşamasında pulsu bir yapıdan küresel bir yapıya dönüştürülmesidir (Yoshio vd., 2004). Ohzeki vd., (2005) grafit malzemelerin tane şeklini değiştirmek için döner darbeli karıştırma makinesi kullanarak küresel taneler elde etmişlerdir.



Şekil 16. Farklı değirmenlerde öğütülmüş kuvars minerali tane şeklinin öğütme zamanıyla değişimi (Ulusoy ve Bayar, 2022).

-0.250+ 0.150 mm boyutlu halkalı değirmen ürünü tanelerinin DIA ile ölçülmüş BRAR ortalamaları



Şekil 17. Halkalı değirmende öğütülmüş grafit minerali tane şeklinin öğütme zamanıyla değişimi (Ulusoy vd., 2024).

Yukarıda belirtilen tüm bilgiler ışığında, uygun boyut küçültme cihazının seçilmesiyle malzemenin tane şeklinin ayarlanması, daha düşük enerji tüketimi, daha düşük maliyet, daha yüksek kaliteli endüstriyel son ürün ve daha yüksek ayırma işlemi kazanımı için önemlidir. Ayrıca, değirmen çalışma koşulları ve besleme özelliklerindeki değişiklikler farklı tane şekillerine yol açabilir. Bu karmaşıklık, tekdüze bir tane şekli elde etmenin, öğütme parametrelerinin ve besleme malzemesi özelliklerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesini gerektirebileceğini göstermektedir.

SONUÇLAR

Sonraki süreçler için boyut küçültmeye maruz bırakılan endüstriyel malzemeleri oluşturan gerçek taneler nadiren küreseldir. Makro ölçekten nano ölçeğe kadar birçok malzemenin tane boyutu ve şeklindeki farklılıklar, onların proses içinde farklı davranışlarına sebep olabilmektedir. Bu nedenle, mineral tane şeklinin uygulamalarda veya proseslerdeki rolünün anlaşılması, bunların daha verimli ve başarılı bir şekilde kullanılmasına yardımcı olur. Bir başka ifadeyle bu tanelerin şeklinin nihai ürününün üretimini ve performansını etkilediği artık çok iyi bilinmektedir. Üstelik bu davranışı tahmin etmek için tek boyut sayısı ve dağılımı yeterli değildir. Tane şekli, ürünlerin işlenmesini ve performansını önemli ölçüde etkileyen bir faktördür. Bu nedenle bu özelliğin ölçülmesi kritik öneme sahiptir. Uygulama alanına göre en iyi sonuç veren tane şekline sahip malzemeler üretmek için istenilen tane özelliklerine göre uygun kırma veya öğütme teknolojisinin seçilmesi önem arz etmektedir.

Gelecek Öneriler

Bu çalışma, birçok mühendislik alanında tane şeklinin çeşitli süreçlerdeki özellikleri ve davranışları üzerindeki etkisine dair bazı önemli sonuçlar sunsa da tane şeklinin özellikleri ve süreçleri üzerindeki rolünü deneysel olarak araştıran daha fazla çalışmanın yapılabileceği birçok alan vardır. Bu nedenle, gelecekte

endüstriyel uygulamalar alanında tane şekli etkisiyle ilgili daha nicel araştırmaların yapılması umulmaktadır. Başka bir deyişle, bu inceleme gelecekteki çalışmalar için önemli bir temel oluşturduğundan, tane şekillerinin çeşitli malzemelerin davranışları üzerindeki etkisinin altında yatan mekanizmaların deneysel ve sayısal yaklaşımlar kullanılarak incelenmesi için gelecekte araştırma çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abazarpour, A., Halali, M., Hejazi, R., Saghacian, M., Zadeh, V.S. Investigation of iron ore particle size and shape on green pellet quality. *Can. Metall. Q.* **2020**, 59, 2.
- Adams, J., Particle Size and Shape Effects in Materials Science: Examples from Polymer and Paper Systems. Clay Miner. **1993**, 28, 509–530.
- Alen, R., *Papermaking Chemistry*, 2nd ed., Finnish Paper Engineers' Association: Helsinki, Finland, **2007**.
- Allen, T., *Powder Sampling and Size Determination*, Elsevier Science: New York, NY, USA, **2003**.
- Allen, T., Particle Size Measurement, 5th ed., Chapman & Hall: Washington, DC, USA, **1997**. 417.
- Almeida-Prieto, S., Blanco-Mendez, J., Otero-Espinar, F.J., Microscopic image analysis techniques for the morphological characterization of pharmaceutical particles: Influence of the software, and the factor algorithms used in the shape factor estimation. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* **2007**, 67, 766–776.
- Aplan, F.F., Gravity concentration. In Principles of Mineral Processing, Fuerstenau, M.C., Kenneth, N.H., Eds., SME: Littleton, CO, USA, **2003**, Chapter 6, pp. 185–219.
- Arai, Y., The concept of a powder. In: Chemistry of Powder Production. Powder Technology Series, vol 6. Springer, Dordrecht, **1996**, https://doi.org/10.1007/978-94-009-1493-3_1.
- Arasan, S., Hasiloglu, A.S., Akbulut, S., Shape particle of natural and crushed aggregate using image analysis. *Int. J. Civ. Eng.* **2010**, 1, 221–233.
- Bagheri, G.H., Bonadonna, C., Manzella, I., Vonlanthen, P., On the characterization of size and shape of irregular particles. *Powder Technol.* **2015**, 270, 141–153.
- Barbosa-Canovas, G.V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., Yan, H., *Food Powders, Physical Properties, Processing, and Functionality*, Kluwer Academic/Plenum Publishers: New York, NY, USA, **2005**, pp. 19–20.
- Bergeron, M., Laurin, P., Tawashi, R., Effect of particle morphology in selecting pharmaceutical excipients. *Drug Dev. Ind. Pharm.* **1986**, 12, 915–926.
- Bown, R., Particle Size, Shape, and Structure of Paper Fillers and Their Effect on Paper Properties. *Pap. Technol.* **1998**, 39, 44–48.
- Bown, R., Physical and Chemical Aspects of the Use of Fillers in Paper. In Paper Chemistry, 2nd ed., Roberts, J.C., Ed., Springer: Dordrecht, The Netherlands, **1996**, Chapter 11, pp. 194–230.
- Brits, B.R., Effect of particle size in gravity separation processes at Palabora, South Africa. In Proceedings of African Mining '91, Springer: Dordrecht, The Netherlands, **1991**, pp. 159–167.
- BS 2955:1993, *British Standards 2955*, Glossary of Terms Relating to Powders. British Standards Institution: London, UK, **1993**.
- Burkes, D., Wachs, D., Keiser, D.D., Jue, J.F., Gan, J., Rice, F.J., Prabhakaran, R., Miller, B., Okuniewski, M., Fresh Fuel Characterization of U-Mo Alloys, International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, October 5-9, **2008**, Washington, USA.
- Chen, J., Li, R., Mo, P.-Q., Zhou, G., Cai, S., Chen, D., A modified method for morphology quantification and generation of 2D granular particles. *Granul. Matter* **2022**, 24, 16.
- Cho, G.C., Dodds, J., Santamarina, J.C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. *J. Geotech. Geoenviron.* **2006**, 132, 591–602.
- Cilas., Particle Size and Shape Analysis in Paint, Ink and Pigment Industry. 2022. Available online: <http://www.bruben.com.ar/pdf/Aplicaciones/020-pigmentos%20paint%20industry.pdf> (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Ciullo, P.A. The Industrial Minerals. In *Industrial Minerals and Their Uses: A Handbook and Formulary*, Noyes Publications: Westwood, MA, USA, **1996**, Chapter 2, pp. 17–82.

- Crompton, C. Particle Shape: An Important Parameter in Pharmaceutical Manufacturing. **2005**. Available online: <http://www.samedanltd.com/index.php?mod=magazine&page=pdfsignup&id=456&pid=456&issid=55> (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Davies, R. Particle size measurement: Experimental techniques. In *Handbook of Powder Science and Technology*, Fayen, M.E., Otten, L., Eds., Van Nostrand Reinhold: New York, NY, USA, **1984**.
- Davies, R., A Simple Feature Based Representation of Particle Shape. *Powder Technol.* 1975, 12, 111–124.
- De Vicente, J., Vereda, F., Segovia-Gutiérrez, J.P., Morales, M.d.-P., Hidalgo-Álvarez, R. Effect of particle shape in magnetorheology. *J. Rheol.* **2010**, 54, 1337.
- Dehghani, F., Rahimi, M., Rezai, B. Influence of particle shape on the flotation of magnetite, alone and in the presence of quartz particles. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* **2012**, 113, 905–911.
- Domingo, C., Loste, E., Gómez-Morales, J., García-Carmona, J., Fraile, J. Calcite Precipitation by a High-Pressure CO₂ Carbonation Route. *J. Supercrit. Fluids* **2006**, 36, 202–215.
- Dumm, T.F., Hogg, R. Characterization of particle shape. In *Proceedings of International Symposium Respirable Dust in the Mineral Industries*, SME: Littleton, CO, USA, **1990**, pp. 283–288.
- Durney, T.E., Meloy, T.P., Particle shape effects due to crushing method and size. *Int. J. Min. Process.* **1986**, 16, 109–123.
- Edelstein, A.S., Cammarata, R.C., *Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications*, IOP: Bristol, UK, **1998**.
- Endoh, S., Particle Shape Characterization. In *Powder Technology. Fundamentals of Particles, Powder Beds, and Particle Generation*, Masuda, H., Higashitani, K., Yoshida, H., Eds., CRC Press: Boca Raton, FL, USA, **2007**, Chapter 1.3, pp. 33–47.
- Fornasiero, D., Filippov, L.O., **2017**, *J. Phys.: Conf. Ser.* 879 012002, <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/879/1/012002>.
- Forssberg, E., Zhai, H., Shape and surface properties of particles liberated by autogenous grinding. *Scand. J. Metall.* **1985**, 14, 25–32.
- Freeman Technology, The Influence of Particle Size and Shape on Powder Flow Behaviour, Micromeritics Company, Application Note 213, **2024**, Available online: https://www.freemantech.co.uk/uploads/particle_size_and_shape_on_powder_flow_behaviour_website_upload.pdf, (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Freeman, T., An Introduction to Powders, Freeman Technology, Tewkesbury, Gloucestershire, UK, **2024**, Available online: <https://www.processindustryinformer.com/zh-CN/wp-content/uploads/2018/02/An-Introduction-to-Powders-Whitepaper.pdf>, https://www.freemantech.co.uk/ebooks/pflip-introduction_to_powders_en/, (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Freeman, T., Brockbank, K., Sabathier, J., Characterising powder flow properties –the need for a multivariate approach, EPJ Web of Conferences, Powders and Grains **2017** – In 8th International Conference on Micromechanics on Granular Media, 140, 03008, January 2017, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714003008>.
- Fukunaka, T., Golman, B., Shinohara, K., Batch grinding kinetics and particle shape of active pharmaceutical ingredients by fluidized-bed jet-milling. AICHE Annual Meeting, Conference Proceedings, **2005**, <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33645640228&partnerID=MN8TOARS>.
- Galipeau, E., Castañeda, P.P., The effect of particle shape and distribution on the macroscopic behavior of magnetoelastic composites. *Int. J. Solids Struct.* **2012**, 49, 1–17.
- Gani, A., Mhaskar, P., Christofides, P.D., Handling sensor malfunctions in control of particulate processes. *Chem. Eng. Sci.* **2008**, 63, 1217–1229.
- Gao, Z., Li, C., Tuning the Morphology and Surface Property of Mineral Particles by Grinding Media. In *Abrasive Technology: Characteristics and Applications*, Rudawska, A., Ed., IntechOpen: London, UK, **2018**.
- Geologyscience. **2018**. Available online: <https://geologyscience.com/minerals/calcite> (en son erişim 13 Ağustos 2025).

- Gill, R., Scott, W., The Relative Effects of Different Calcium Carbonate Filler Pigments on Optical Properties. *Tappi J.* **1987**, 70, 93–99.
- Gill, R., The Behavior of On-Site Synthesized Precipitated Calcium Carbonates and Other Calcium Carbonate Fillers on Paper Properties. *Nordic Pulp Pap. Res. J.* **1989**, 4, 120–127.
- Goodband, R.D. Tokach, M.D. Nelssen, J.L., The effects of diet particle size on animal performance, MF-2050 Feed Manufacturing, Department of Grain Science and Industry, Kansas State University (**2002**), pp. 1-6.
- Grunditz, S., **2015**, Modeling and Optimization of a Vertical Shaft Impactor for Production of Artificial Sand, Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/227717/227717.pdf>.
- Guillet, G.R., Kriens, J., Ontario and the Mineral Filler Industry, Industrial Mineral Background Paper 5 (IMBP 5), Ontario Ministry of Natural Resources, Mineral Resources Branch: Toronto, ON, Canada, **1984**, pp. 1–175. <http://www.geologyontario.mndmf.gov.on.ca/mndmfiles/pub/data/imaging/IMBP005/IMBP005.pdf> (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Gupta, C.K., *Chemical Metallurgy: Principles and Practice*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.: Weinheim, Germany, **2003**, Chapter 2, pp. 119–121.
- Güven, O., Karakas, F., Kodrazi, N., Celik, M.S. Dependence of morphology on anionic flotation of alumina. *Int. J. Miner. Process.* **2016**, 156, 69–74.
- Hagemeyer, R.W., *Pigments for Paper: A Project of the Coating Pigments Committee of Tappi's Coating & Graphic Arts Division*, TAPPI Press: Atlanta, GA, USA, **1997**.
- Holt, C.B., The shape of particles produced by comminution. A review. *Powder Technol.* **1981**, 28, 59–63.
- Horiba Instruments, Inc. A Guidebook to Particle Size Analysis. 2012. Available online: https://ats-scientific.com/uploads/PSA_Guidebook.pdf (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Hsieh, M.Y., Guo, Y.L., Shiao, J.S.C., Sheu, H.M., Morphology of glass fibers in electronics workers with fiberglass dermatitis—A scanning electron microscopy study. *Int. J. Dermatol.* **2001**, 40, 258–261.
- Hubbe, M., Gill, R.A. Fillers for Papermaking: A Review of their Properties, Usage Practices, and their Mechanistic Role. *Bioresources*, **2016**, 11, 2886–2963. Online: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_11/BioRes_11_1_2886_Review_Hubbe_Gill_Fillers_Papermaking_Props_Usage_Prac_Mechanistic_Role_8676.pdf (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Hubbe, M.A., Filler Particle Shape vs. Paper Properties—A Review. In Proceedings of the TAPPI 2004 Spring Tech. Conf., Atlanta, GA, USA, 2–5 May **2004**, pp. 3–7.
- Husband, J.C., Preston, J.S., Gate, L.F., Storert, A., Creaton, P., The influence of pigment particle shape on the in-plane tensile strength properties of kaolin-based coating layers. *Tappi J.* **2006**, 5, 3–8. Available online: <https://imisrise.tappi.org/download.aspx?key=06DEC03> (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Jindal, A.B., The effect of particle shape on cellular interaction and drug delivery applications of micro- and nanoparticles. *Int. J. Pharm.* **2017**, 532, 450–465.
- Kademli, M., Gulsoy, O.Y., The role of particle size and solid contents of feed on mica-feldspar separation in gravity concentration. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* **2012**, 48, 645–654.
- Kashiwaya, K., Noumachi, T., Hiroyoshi, N., Ito, M., Tsunekawa, M. Effect of particle shape on hydrocyclone classification. *Powder Technol.* **2012**, 226, 147–156.
- Kaya, E., Hogg, R., Kumar, S. Particle Shape Modification in Comminution. *KONA Powder Part. J.* **2002**, 20, 188–195.
- Koh, P.T.L., Hao, F.P., Smith, L.K., Chau, T.T., Bruckard, W.J. The effect of particle shape and hydrophobicity in flotation. *Int. J. Miner. Process.* **2009**, 93, 128–134.
- Koleske, J.V., Extender pigments. In *Paint and Coating Testing Manual*, 14th ed., Of the Gardner-Sward Handbook, Chapter 24, ASTM Manual Series: MNL 17, American Society for Testing and Materials: Philadelphia, PA, USA, **1995**, p. 219.
- Langen, M., Bender, M., Christiani, J., Hoberg, H., Eickhoff, A., Gödecker, D., Koch, U., Zimmermann, M. KAKTUS: A new plant design for processing of plastic packaging waste—Experiences of pilot scale operation. In Proceedings of the XX International Mineral Processing Congress, Aachen, Germany, 21–26 September **1997**.

- Lee, C., Suh, H.S., Yoon, B., Yun, T.S. Particle shape effect on thermal conductivity and shear wave velocity in sands. *Acta Geotech.* **2017**, *12*, 615–625.
- Lim, M.S., Wijeyesekera, D.C., Zainorabidin, A., Bakar, I., The Effects of Particle Morphology (Shape and Sizes) Characteristics on its Engineering Behaviour and Sustainable Engineering Performance of Sand. *Int. J. Integr. Eng.* **2013**, *4*, 4. Available online: <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/582> (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Little, L., The Development and Demonstration of a Practical Methodology for Fine Particle Shape Characterisation in Minerals Processing. Ph.D. Thesis, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, **2016**.
- Little, L., Mainza, A.N., Becker, M., Wiese, J. Fine grinding: How mill type affects particle shape characteristics and mineral liberation. *Miner. Eng.* **2017**, *111*, 148–157.
- Lobato, E.M.C., Determination of Surface Free Energies and Aspect Ratio of Talc. Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA, **2004**.
- Lohmander, S., Aspect ratios of pigment particles determined by different methods. *Nordic Pulp Pap. Res. J.* **2000**, *15*, 221–230.
- Lu, H., Jia, L., Jie, G., Zhenming, X., Movement behavior in electrostatic separation: Recycling of metal materials from waste printed circuit board. *J. Mater. Process. Technol.* **2008**, *197*, 101–108
- Lyu, F., Thomas, M., Hendriks, W.H., van der Poel, A.F.B., Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing and predicting particle size: A review, *Animal Feed Science and Technology*, **2020**, 114347, <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114347>.
- Ma, G., Bu, X., Ulusoy, U., Xie, G., Effect of particle shape on bubble-particle attachment behavior: roles of surfaces, edges and vertexes, *Journal of Cleaner Production* **429**, **2023**, 139606. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139606>.
- Ma, G., Xia, W., Xie, G., Effect of particle shape on the flotation kinetics of fine coking coal. *J. Clean. Prod.* **2018**, *195*, 470–475.
- Ma, H., Bolster, C., Johnson, W.P., Li, K., Pazmino, E., Camacho, K.M., Anselmo, A.C., Mitragotri, S. Coupled influences of particle shape, surface property and flow hydrodynamics on rod-shaped colloid transport in porous media. *J. Colloid Interface Sci.* **2020**, *577*, 471–480.
- Malvern Instruments Limited. *A Basic Guide to Particle Characterization, Inform White Paper*, Malvern Instruments Limited: Worcestershire, UK, **2012**, pp. 1–26. Available online: <https://www.atascientific.com.au/wp-content/uploads/2017/02/MRK1806-01-basic-guide-to-particle-characterisation-1.pdf>, (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Mavromichalis, I., Hancock, J.D., Senne, B.W., Gule, T.L., Kennedy, G.A., Hines, R.H., Wyatt, C.L., Enzyme supplementation and particle size of wheat in diets for nursery and finishing pigs, *J. Anim. Sci.*, **2000**, pp. 3086-3095, <https://doi.org/10.2527/2000.78123086x>.
- McGraw Hill's Dictionary of Scientific and Technical Terms*, 6th ed., McGraw-Hill: New York, NY, USA, **2003**.
- Meloy, T.P., Particle Shape Characterization: Recent Developments (Review). In *Testing and Characterization of Powders and Fine Particles*, Beddow, J.K., Meloy, T.P., Eds., Heyden and Son: London, UK, **1980**, Chapter 1.
- Metso Corporation, 2024, Manufactured sand application guide, <https://www.metso.com/globalassets/aggregates/brochure-manufactured-sand-application-guide-en-4920.pdf>.
- Mikli, V., Kaerdi, H., Kulu, P., Besterci, M., Characterization of powder particle morphology. *Proc. Est. Acad. Sci. Eng.* **2001**, *7*, 22–34.
- Mitchell, J.K., Soga, K., *Fundamentals of Soil Behaviour*, 3rd ed., John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, **2005**.
- Miwa, S. Kogaku, F., Shoten, A., Tokyo, Japan, **1972**, p. 65. (In Japanese).
- Mora, C.F., Kwan, A.K.H., Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing. *Cem. Concr. Res.* **2000**, *30*, 351–358.

- Müller, F., Polke, R., Schafer, M., Scholz, N., Particle system characterization and modelling. *Part. Part. Syst. Charact.* **2001**, *18*, 248–253.
- Murphy, K.A., Dahmen, K.A., Jaeger, H.M., Transforming Mesoscale Granular Plasticity Through Particle Shape. *Phys. Rev. X* **2019**, *9*, 011014. Available online: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.9.011014> (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Neikov, O.D., Lotsko, D.V., Gopienko, V.G., Powder Characterization and Testing. In *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders: Technologies and Applications*, 1st ed., Neikov, O.D., Naboychenko, S.S., Dowson, G., Eds., Elsevier: Oxford, UK, **2009**, Chapter 1, pp. 7–44.
- Nouri, A., Sola, A., Metal particle shape: A practical perspective. *Met. Powder Rep.* **2018**, *73*, 276–282.
- Ofori-Sarpong, G., Amankwah, R.K., Comminution environment and gold particle morphology: Effects on gravity concentration. *Miner. Eng.* **2011**, *24*, 590–592.
- Ohzeki, K., Saito, Y., Golman, B., Shinohara, K., Shape modification of graphite particles by rotational impact blending, *Carbon*, **2005**, *43*, 1673-1679, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.02.007>.
- Ortega-Rivas, E. *Unit Operations of Particulate Solids: Theory and Practice*, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, **2012**, pp. 3–13.
- Orumwense, O. A., Forssberg, E., Surface and structural changes in wet ground minerals, *Powder Technology*, **1991**, *68*, 23-29.
- Pabst, W., Berthold, C., Gregorova, E., Size and shape characterization of oblate and prolate particles. *J. Eur. Ceram. Soc.* **2007**, *27*, 1759–1762.
- Park, A.-H.A., Zhu, C., Fan, L.-S., Particle Technology. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 5th ed., Ley, C., Ed., John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, **2007**, pp. 1–41.
- Persson, A.L., Image analysis of shape and size of fine aggregates. *Eng. Geol.* **1998**, *50*, 177–186.
- Pinto, G., Jimenez-Martin, A., Conducting aluminum-filled nylon 6 composites. *Polym. Compos.* **2001**, *22*, 65–70.
- Pourghahramani, P., Forssberg, F., Review of Applied Particle Shape Descriptors and Produced Particle Shapes in Grinding Environments. Part II: The Influence of comminution on the Particle Shape. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* **2005**, *26*, 167–186.
- Pourghahramani, P., Forssberg, F., Review of Applied Particle Shape Descriptors and Produced Particle Shapes in Grinding Environments. Part II: The Influence of comminution on the Particle Shape. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* **2005**, *26*, 167–186.
- Pryor, E.J., Mineral Processing, 3rd ed., Elsevier: London, UK, **1965**.
- Purcell, R.J., Parker, D.C. Purified Attapulgite Clay. U.S. Patent 6,444,601, 3 September **2002**. 245.
- Rao, C.N.R., Cheetham, A.K. Science and technology of nanomaterials: Current status and future prospects. *J. Mater. Chem.* **2001**, *11*, 2887–2894.
- Rawle, A., The basic principles of particle size analysis. *Surf. Coat. Int. Part A Coat. J.* **2003**. *86*, 58–65.
- Rhodes, M. *Introduction to Particle Technology*, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, UK, **2008**.
- Richards, R.L., Locke, S.B., Textbook of Ore Dressing, 3rd ed., McGraw-Hill: New York, NY, USA, **1940**.
- Richardson, J.F., Harker, J.H., Backhurst, J.R. *Coulson and Richardson's Chemical Engineering: Particle Technology and Separation Processes*, 5th ed., Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, **2002**, Volume 2.
- Rose, H.E., Particle shape and surface area. In *Powders in Industry*, Society of Chemical Industry: London, UK, **1961**, pp. 130–149.
- Roshanaei, H., Khodkar, F., Alimardani, M., Contribution of filler–filler interaction and filler aspect ratio in rubber reinforcement by silica and mica. *Iran. Polym. J.* **2020**, *29*, 901–909.
- Santamarina, J.C., Cho, G.C., Soil behaviour: The role of particle shape. Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference. In Proceedings of the Three Day Conference on Advances in Geotechnical Engineering, Organised by the Institution of Civil Engineers and Held at the Royal Geographical Society, London, UK, 29–31 March **2004**, pp. 604–617.
- Sanyal, M.K., Mukhopadhyay, M.K., Mukherjee, M., Datta, A., Basu, J.K., Penfold, J., Role of molecular self-assembling in Langmuir-Blodgett film growth. *Phys. Rev. B* **2002**, *65*, 033409.
- Sedwell, R., Hansell, J., Rane, M., Rajabi-Siahboomi A.R., Characterization of Inert Cores for Multiparticulate Dosage Forms, Springer, New York, USA, **2017**, pp. 5-35.

- Severinghaus, N., Jr. Fillers, filters, and absorbents. In *Industrial Minerals and Rocks*, 4th ed., Stanley, J., Ed., AIME: New York, NY, USA, **1975**, pp. 235–249.
- Seville, J.P.K., Wu, C.-Y., *Particle Technology and Engineering: An Engineer's Guide to Particles and Powders: Fundamentals and Computational Approaches*, 1st ed., Butterworth-Heinemann: Amsterdam, The Netherlands, **2016**, pp. 1–294.
- Shinahara, K., Fundamental and Rheological Properties of Powders. In *Handbook of Powder Science and Technology*, 2nd ed., Fayed, M.E., Otten, L., Eds., Chapman and Hall: New York, NY, USA, **1997**, Chapter 4, p. 96.
- Sivamohan, R., A study of gravity concentration with emphasis on surface phenomena. Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, **1985**.
- U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, **2021**.
- Ulusoy, U., A review of particle shape effects on material properties for various engineering applications: From macro to nanoscale, *Minerals*, **2023**, 13, 91, <https://doi.org/10.3390/min13010091>.
- Ulusoy, U., Atagun, O.N., Particle shape characterization of shaking table streams in a Turkish chromite concentration plant by using dynamic imaging and microscopical techniques, *Particulate Science and Technology*, **2023** (41) 2, 2023, 141-150, <https://doi.org/10.1080/02726351.2022.2046666>.
- Ulusoy, U., Bayar, G., Prediction of average shape values of Quartz particles by vibrating disc and ball milling using dynamic image analysis based on established time-dependent shape models. *Part. Sci. Technol.* **2022**, 40, 870–886.
- Ulusoy, U., Burat, F., Bayar, G., Mojtahedi, B., Güven, G., Modeling the change of the sphericity feature of graphite particles ground in a ball and vibrating disc mill with grinding time, *Journal of Energy Storage*, **2024**, 97PA, 112814, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112814>.
- Ulusoy, U., Cayırlı, S., Bayar, G., Gokcen, H.S., Comparison of aspect ratios of calcite particles ground in the ball and stirred mill by Dynamic Image analysis and evaluation of the suitability of products as filler material in various industries. *Minerals* **2023**, 13, 1, 99, <http://dx.doi.org/10.3390/min13010099>.
- Ulusoy, U., Yekeler, M., Hiçyılmaz, C., Determination of the shape, morphological and wettability properties of Quartz and their correlations. *Miner. Eng.* **2003**, 16, 951–964.
- Vanderbilt Company Inc. Non-Black Fillers for Rubber. **2022**. https://www.vanderbiltworldwide.com/public/assets/uploads/documents/technical/Non-Black_Fillers_Web.pdf (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Vanderbilt, R.T. Paints and Coatings, A Guide to Filler Properties and Uses, Technical Data, No. 703. Vanderbilt Minerals.2013, https://www.vanderbiltminerals.com/resources/VR_703_Paint_Filler_Minerals_Reference_Web.pdf (son erişim 13 Ağustos 2025).
- Vehring, R., Pharmaceutical Particle Engineering via Spray Drying. *Pharm. Res.* **2008**, 25, 999–1022.
- Vision Analytical Inc., Why Particle Shape Is Important. **2022**. Available online: <https://particleshape.com/why-particle-shape-is-important> (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Vogel, L., Peukert, W., Breakage behaviour of different materials-construction of a mastercurve for the breakage probability, *Powder Technology*, 129, **2003**, 101-110.
- VTT Products and Production*, Knowpap Versio 11.0, VTT Products and Production: Espoo, Finland, **2009**.
- Wadell, H., Volume, shape, and roundness of rock particles. *J. Geol.* **1932**, 40, 443–451. Available online: <https://www.jstor.org/stable/30058012> (en son erişim 13 Ağustos 2025).
- Wang, L., Peng, Y., Runge, K., Bradshaw, D., A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Miner. Eng.* **2015**, 70, 77–91.
- Weigl, J., Ritter, E., Importance of Particle Size, Shape, and Distribution of Fillers in Supercalendered Paper Manufacture. *Wochenbl. Papierfabr.* **1995**, 123, 739–747.
- Wills, B.A., Napier-Munn, T., *Wills' Mineral Processing Technology*, 7th ed., Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, **2006**.
- Wypych, G., Fillers—Origin, Chemical Composition, Properties, and Morphology. In *Handbook of Fillers*, 5th ed., ChemTec Publishing: Toronto, ON, Canada, **2021**, Chapter 2, pp. 13–302.

- Xu, R., *Particle Characterization: Light Scattering Methods*, Kluwer Academic publishers: Hingham, MA, USA, **2000**.
- Yang, J., Luo, X.D., Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials. *J. Mech. Phys. Solids*, **2015**, 84, 196–213.
- Yoshio, M., Wang, H., Fukuda, K., Umeno, T., Abe, T., Ogumi, Z., Improvement of natural graphite as a lithium-ion battery anode material, from raw flake to carbon-coated sphere. *J. Mater. Chem.* **2004**, 14, 1754–1758.
- Yoshio, M., Wang, H.Y., Fukuda, K., Spherical carbon-coated natural graphite as a lithium-ion battery anode material. *Angew. Chem.* **2003**, 42, 4203–4206.
- Youd, T.L., Factors controlling the maximum and minimum densities of sands. In *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils*, Selig, E.T., Ladd, R.S., Eds., ASTM Special Technical Publication 523, ASTM: West Conshohocken, PA, USA, **1973**, 98–112.
- Yu, W., Hancock, B.C., Evaluation of dynamic image analysis for characterizing pharmaceutical excipient particles. *Int. J. Pharm.* **2008**, 361, 150–157.
- Zhao, Y., Zhang, Y., Bao, S., Liu, T., Bian, Y., Liu, X., Jiang, M., Separation factor of shaking table for vanadium pre-concentration from stone coal. *Sep. Purif. Technol.* **2013**, 115, 92–99.
- Zhu, F., Zhao, J., Interplays between particle shape and particle breakage in confined continuous crushing of granular media. *Powder Technol.* **2021**, 378, 455–467.

CEVHER ZENGİNLEŞTİRMEDE AR-GE VE ÖNEMİ
THE ROLE AND IMPORTANCE OF R&D IN MINERAL PROCESSING

M. Tanrıverdi
Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
(m.mehmet@deu.edu.tr)

ÖZ

Bu çalışmada cevher zenginleştirmede Ar-Ge'nin rolü ve önemi özellikle madencilik yatırımları ve işletilmesi açısından irdelenmiştir. Madencilik yüksek yatırım maliyetleri gerektiren o derecede de risk taşıyan faaliyetlerdir. Ülkelerin gelişmişlikleri ve zenginliklerindeki rolü yüksektir. Dolayısıyla yer altı kaynaklarının verimli bir şekilde değerlendirilmesi oldukça önemli bir husustur. Bu çalışmada madencilik yatırımları yapılırken cevher hazırlama ve zenginleştirme açısından irdelenmesi gereken konular ele alınmıştır.

Anahtar Sözcükler: cevher hazırlama, cevher zenginleştirme, Ar-Ge madencilik yatırımı

ABSTRACT

This study explores the role and significance of research and development (R&D) in ore beneficiation, with a particular focus on its implications for mining investments and operations. Mining is a capital-intensive sector characterized by high financial risks, yet it plays a critical role in the economic development and wealth generation of nations. Accordingly, the efficient and sustainable utilization of mineral resources is of strategic importance. Within this context, the study examines key considerations related to ore preparation and beneficiation that must be addressed during the planning and execution of mining investments.

Keywords: Ore preparation, Ore beneficiation, R&D, Mining investment

GİRİŞ

Madencilik sektörü, ülkelerin ekonomik büyümesine ve kaynak güvenliğine önemli katkılar sağlayan temel endüstrilerden biridir. Ancak madencilik faaliyetleri, yüksek sermaye gereksinimi ve ciddi finansal ile operasyonel riskler içermesi nedeniyle oldukça zorlu bir alandır. Küresel ölçekte hammadde talebinin giderek arttığı günümüzde, yer altı kaynaklarının verimli ve etkin bir şekilde değerlendirilmesi her zamankinden daha kritik hale gelmiştir.

Cevher zenginleştirme, madencilik sektörünün en kritik aşamalarından biri olup düşük tenörlü ve kompleks yapılı cevherlerin ekonomik olarak değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Günümüzde artan hammadde talebi, çevresel sürdürülebilirlik kaygıları ve yüksek enerji maliyetleri, cevher zenginleştirme teknolojilerinde yenilikçi çözümlere olan ihtiyacı artırmıştır. Bu bağlamda, cevher zenginleştirme teknolojilerinin geliştirilmesinde araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri hayati bir rol oynamaktadır. Ar-Ge, sadece geri kazanım oranlarını artırmak ve çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda madencilik projelerinin ekonomik uygulanabilirliğini ve kârlılığını da önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Bu çalışmada, cevher zenginleştirmede Ar-Ge'nin rolü ve önemi, özellikle madencilik yatırımları ve proje geliştirme süreçleri açısından ele alınmaktadır. Yer altı kaynaklarının en uygun şekilde değerlendirilmesi için dikkate alınması gereken teknik ve stratejik unsurlar irdelenmekte; bu unsurların madencilik yatırımlarında karar alma süreçlerine olan etkileri değerlendirilmektedir.

MADENCİLİK SEKTÖRÜNDE YATIRIMLAR VE RİSKLER

Madencilik yatırımları, doğası gereği yüksek sermaye gerektiren, uzun vadeli ve çok boyutlu riskler içeren projeler olarak kabul edilmektedir. Bir maden yatırımının fizibilite aşamasından işletmeye alınmasına kadar geçen süreçte ekonomik, çevresel ve teknik riskler detaylı şekilde değerlendirilmelidir. Bu risklerin etkin yönetiminde Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri kritik bir rol oynamaktadır (World Bank, 2022).

Sermaye Yoğunluğu ve Yüksek Maliyetler

Madencilik yatırımları büyük ölçüde sermaye yoğun yatırımlardır. Jeolojik arama, sondaj, altyapı kurulumu ve tesis inşaatı yüksek maliyetli süreçlerdir.

Arama ve rezerv tespiti maliyetleri: Bir maden yatağının bulunması için jeolojik araştırmalar, sondajlar, jeofizik etütler gerekir. Bu aşama genellikle milyonlarca dolarlık yatırımlar gerektirir ve başarısız olma ihtimali yüksektir.

İnşaat ve altyapı yatırımları: Madenin işletmeye alınabilmesi için kırma-öğütme tesisleri, zenginleştirme üniteleri, ulaşım altyapısı (yol, liman, demiryolu), enerji hatları kurulmalıdır. Bunlar milyar dolar seviyesine çıkabilir.

Sabit ve değişken maliyetlerin yüksekliği: İşletme başladıktan sonra iş gücü, enerji, su, çevresel yönetim ve bakım giderleri sürekli mali yük oluşturur.

Yatırımın Uzun Dönemli Olması

Bir maden projesi, **arama aşamasından işletmeye geçişi** yıllarca sürebilir. Yatırım geri dönüşü uzun vadeli, yani başlangıçtaki sermaye bağlandıktan sonra nakit akışı sağlamak yıllar alır. Bu nedenle madencilik yatırımları, **kısa vadeli kazanç bekleyen yatırımcılar için uygun değildir.**

Risk Faktörleri

Jeolojik ve Teknolojik Riskler

Rezerv miktarı ve kalitesinin yanlış tahmin edilmesi, yanlış numune alınması, uygunsuz zenginleştirme yöntemlerinin seçilmesi ve teknolojik arızalar, madencilik yatırımlarının başarısızlığa uğramasına yol açabilmektedir (Laurence, 2011). Bu bağlamda Ar-Ge, jeostatistiksel modelleme, yapay zekâ tabanlı rezerv tahmini, pilot ölçekli denemeler ve sensör tabanlı izleme sistemleri ile teknik belirsizliklerin azaltılmasına olanak sağlamaktadır (Franks et al., 2014).

Jeostatistiksel modelleme ve yapay zekâ destekli rezerv tahmini, belirsizliği azaltır.

Laoratuvar çalışmaları ve sorasıda Pilot ölçekli denemeler, en uygun zenginleştirme yönteminin seçimini sağlar.

Sensör tabanlı izleme sistemleri, prosesin sürekli optimizasyonuna olanak verir.

Ekonomik ve Piyasa Riskleri

Metal fiyatlarının küresel emtia piyasalarında dalgalanması (Örneğin, bakır fiyatlarının %20 düşmesi, bir yatırımın kârlılığını tamamen ortadan kaldırabilir), finansman maliyetlerinin artması ve döviz kuru riskleri, projelerin kârlılığını doğrudan etkilemektedir (Humphreys, 2015). Bu bağlamda Ar-Ge, düşük tenörlü cevherlerin ekonomik işletilebilirliğini artırmak, enerji verimliliği sağlamak ve modelleme-simülasyon teknikleriyle yatırımın piyasa dalgalanmalarına dayanıklılığını test etmek açısından kritik bir işlev üstlenmektedir (Norgate & Jahanshahi, 2010).

Yeni zenginleştirme teknolojileri ile düşük tenörlü cevherlerin ekonomik işletilebilirliği artırılır.

Enerji verimliliği çözümleri maliyetleri azaltır.

Modelleme ve simülasyon yazılımları, fiyat senaryolarına göre yatırımın dayanıklılığını analiz eder.

Çevresel ve Sosyal Riskler

Madencilik faaliyetleri su kullanımı, atık yönetimi, karbon emisyonları ve biyolojik çeşitlilik üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Çevresel felaketler hem ekonomik hem de toplumsal açıdan büyük kayıplara neden olabilmektedir (Azapagic, 2004). Ar-Ge çalışmaları; atık geri kazanım, suyun yeniden kullanımını sağlayan kapalı devre sistemler ve düşük karbonlu üretim teknolojileri ile çevresel risklerin azaltılmasına önemli katkılar sunmaktadır (UNEP, 2019). ÇED (Çevresel Etki Değerlendirmesi) süreçlerinde onay alınmaması, projenin tamamen iptaline yol açabilir. Ayrıca, yerel halkın tepkisi, protestolar ve sosyal lisans eksikliği büyük bir risk faktörüdür.

Politik ve Hukuki Riskler

Vergi oranlarının değişmesi, devletin maden ruhsatı politikaları, uluslararası yaptırımlar veya siyasi istikrarsızlık, yatırımlar üzerinde doğrudan etkili olur.

Maden işletmelerine getirilen çevresel yaptırımlar veya kapatma kararları da yüksek risk oluşturur.

AR-GE’NİN CEVHER ZENGİNLEŞTİRMEDEKİ ROLÜ

Ar-Ge çalışmaları, cevher hazırlama teknolojilerinin optimizasyonu, enerji tasarrufu ve çevresel uyum sayesinde maliyetleri düşürür ve riskleri azaltır.

Jeolojik modelleme, yapay zekâ tabanlı rezerv tahminleri ve süreç simülasyonları, belirsizlikleri daha iyi yönetmeyi sağlar.

Risklerin çeşitlendirilmesi için şirketler genellikle farklı bölgelerde çoklu maden projelerine yatırım yapar.

Madencilik yatırımları, yüksek sermaye gerektiren ve çok boyutlu riskler içeren projelerdir. Ancak doğru risk analizi, güçlü Ar-Ge desteği, etkin finansal planlama ve sürdürülebilirlik stratejileri ile bu yatırımlar uzun vadede oldukça kârlı ve stratejik hale gelebilir.

Teknolojik Gelişmeler ve Yenilikçi Yaklaşımlar

Cevher zenginleştirmede son on yılda önemli teknolojik dönüşümler yaşanmıştır. **Yerli** uygulamalarda üniversite-sanayi iş birlikleri ve TÜBİTAK destekli projeler öne çıkarken, **uluslararası** örnekler büyük ölçekli pilot tesisler ve yapay zekâ tabanlı sistemlerle dikkat çekmektedir.

Türkiye’de Eti Bakır A.Ş. ve bazı özel maden şirketlerinde **otomatize flotasyon kontrol sistemleri** devreye alınmış, reaktif tüketiminde %10’a varan tasarruf rapor edilmiştir.

Nano-bazlı flotasyon reaktiflerle daha az reaktif kullanılarak yüksek verimlere ulaşmak için Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir.

Şili’deki Escondida Madeni’nde sensör tabanlı ayırma teknolojisi ile düşük tenörlü bakır cevherinde %20 daha yüksek verim elde edilmiştir (World Bank, 2020).

Avustralya’da Rio Tinto firması, yapay zekâ destekli kontrol sistemleri sayesinde öğütme devrelerinde enerji tüketimini %13 azaltmıştır (ICMM, 2021).

Bu gelişmeler, cevher zenginleştirme süreçlerinde **daha selektif, daha düşük maliyetli ve çevreci çözümler** sunmaktadır.

Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etkiler

Ar-Ge, madenciliğin çevresel etkilerini azaltmada kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle su kullanımı, enerji tüketimi ve atık miktarının düşürülmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Atık Azaltımı: Sensör tabanlı ayırma sistemleri sayesinde düşük kaliteli cevherler erken safhada ayrılmakta, böylece atık miktarı %15–30 oranında azaltılmaktadır.

Kimyasal Kullanımı: Nano-boyutlu flotasyon reaktifleri, daha düşük dozajlarla daha yüksek verim sağladığından, flotasyonda kullanılan kimyasal miktarı %20’ye kadar düşebilmektedir (Zhang et al., 2019).

Enerji ve Su Verimliliği: Yapay zekâ tabanlı optimizasyon sistemleri, öğütme ve flotasyon devrelerinde **su tüketimini %10-15** azaltırken, aynı zamanda karbon ayak izini düşürmektedir (Bouchard et al., 2021).

Bu yenilikler, madencilik sektörünün **Paris İklim Anlaşması** ve **AB Yeşil Mutabakatı** gibi uluslararası sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale gelmesini sağlamaktadır.

Ar-Ge Yatırımlarının Geri Dönüşü

Ar-Ge yatırımları genellikle yüksek başlangıç maliyetleri nedeniyle işletmeler açısından riskli görülse de, uzun vadede ciddi ekonomik kazanımlar sağlamaktadır.

Ekonomik Katkı

Bir flotasyon tesisinde **nano-reaktiflerin uygulanması**, yıllık 2–3 milyon USD kimyasal tasarrufu sağlamaktadır (Li et al., 2020).

Şili’de sensör tabanlı ayırma yatırımları, ilk 3 yılda kendini amorti etmiş ve sonraki yıllarda işletmeye %15 ek kârlılık kazandırmıştır.

Amortisman Süresi

Küçük ölçekli Ar-Ge projelerinde (pilot tesisler) geri dönüş süresi **2–3 yıl** arasında değişirken, büyük ölçekli yatırımlarda bu süre **5–7 yıl** olabilmektedir.

Ancak orta-uzun vadede enerji ve reaktif tasarrufları, üretim kayıplarının önlenmesi ve çevresel uyum maliyetlerinin azalması sayesinde Ar-Ge yatırımları **yüksek kârlılık** sağlamaktadır.

Genel olarak, Ar-Ge yatırımları sadece ekonomik açıdan değil, aynı zamanda **çevresel uyumluluk** ve **kurumsal itibar** açısından da madencilik şirketlerine stratejik avantaj sağlamaktadır.

AR-GE ODAKLI YAKLAŞIMLARLA MADENCİLİK YATIRIMLARININ OPTİMİZASYONU

Madencilik yatırımları yüksek maliyetli ve riskli projelerdir. Bu nedenle, yatırım kararlarının alınması ve uygulanması sürecinde Ar-Ge odaklı yöntemlerin devreye alınması kritik önem taşır. Özellikle **pilot tesis**

kurulumu, dijital simülasyonlar, yapay zekâ tabanlı süreç izleme sistemleri ve veri odaklı karar destek sistemleri, riskleri azaltmak ve yatırımın kârlılığını artırmak için kullanılan temel araçlardır.

Karar Destek Sistemleri

Karar destek sistemleri, yatırımcı ve mühendislerin daha güvenilir tahminler yapmasına olanak sağlar.

Veri Analitiği: Büyük veri setleri kullanılarak cevher tenörü dağılımları, üretim kapasitesi, enerji tüketimi ve su kullanımı gibi parametreler analiz edilir.

Modelleme: Jeolojik ve metalurjik modelleme teknikleri ile rezervin ekonomik potansiyeli belirlenir.

Simülasyon: Proses akım şemaları üzerinde yapılan dijital simülasyonlar, tesis tasarımı öncesinde farklı senaryoları test etmeyi mümkün kılar.

Finlandiya'daki *Kevitsa Nikel Madeninde* kullanılan süreç modelleme yazılımları sayesinde, flotasyon devresinde metal geri kazanım oranı %8 artırılmış ve enerji tüketimi %12 azaltılmıştır (ICMM, 2021).

Pilot Tesis ve Ölçekleme Çalışmaları

Laboratuvar ölçeğinde elde edilen sonuçlar, doğrudan endüstriyel ölçeğe aktarılamaz. Bu nedenle, **pilot tesisler** ara aşama görevi görür.

Dolaysıyla önce Laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin doğrulanması, ölçeklenebilirliğinin test edilmesi ve ekonomik uygulanabilirliğin belirlenmesi gerekir.

Ölçekleme Süreci

Laboratuvar testleri (bench-scale) → Pilot tesis → Endüstriyel tesis

Bu süreçte mineralojik farklılıklar, reaktif tüketimleri ve su devri test edilir.

Türkiye'de Çayeli Bakır İşletmeleri, yeni flotasyon devreleri öncesinde kurduğu pilot tesiste reaktif dozajlarını optimize etmiş, bu sayede tam ölçekli üretime geçildiğinde %10 daha yüksek bakır kazanımı elde edilmiştir.

Yerileştirme ve Katma Değer

Yerli teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanılması, madencilik sektörüne hem ekonomik hem de stratejik faydalar sağlar.

Ekonomik Fayda: İthal edilen ekipman ve kimyasallar yerine yerli üretim tercih edildiğinde, döviz çıkışı azalır ve maliyetler düşer.

Stratejik Fayda: Yerli teknolojilerin kullanımı, madencilik sektörünün dışa bağımlılığını azaltır ve kritik madenlerde arz güvenliği sağlar.

Katma Değer: Üniversite-sanayi iş birlikleri ile geliştirilen yöntemler, yerli kimyasallar ve otomasyon sistemleri, sadece iç pazara değil, ihracat potansiyeline de sahiptir.

Türkiye’de TÜBİTAK destekli projelerle geliştirilen yerli flotasyon kolektörleri sayesinde ithal reaktiflere kıyasla %25 daha düşük maliyetle üretim yapılmış, aynı zamanda çevreye duyarlı yeni kimyasal çözümler geliştirilmiştir.

SONUÇ

Bir maden yatırımının fizibilite aşamasından işletmeye alınmasına kadar geçen süreçte ekonomik, çevresel ve teknik riskler kaçınılmazdır. Ancak Ar-Ge’nin etkin kullanımı, bu risklerin minimize edilmesinde stratejik bir araç olarak öne çıkmaktadır. Dolayısıyla Ar-Ge yalnızca teknolojik bir gereklilik değil, aynı zamanda yatırımın başarısının güvencesi olarak görülmelidir

Fizibiliteden işletmeye kadar geçen süreçte riskler kaçınılmazdır; Ancak;
Ekonomik riskler, maliyet düşürücü Ar-Ge çözümleriyle yönetilebilir.
Çevresel riskler, sürdürülebilir teknolojiler ve kapalı devre sistemlerle minimize edilebilir.
Teknik riskler, Üniversite-Sanayi işbirliği dijitalleşme, yapay zekâ laboratuvar ve pilot denemeler sayesinde daha iyi kontrol altına alınabilir.

Türkiye, zengin mineral kaynaklarına sahip olmasına rağmen, Ar-Ge yatırımlarının sınırlı olması nedeniyle uluslararası rekabet gücünü tam olarak ortaya koyamamaktadır. Üniversite-sanayi iş birliklerinin artırılması ve kamu destekli Ar-Ge projelerinin teşvik edilmesi, sektörün gelişimi için kritik önemdedir

Dolayısıyla, Ar-Ge yalnızca **teknolojik bir ihtiyaç değil**, aynı zamanda **yatırımın ve işletmenin başarısının güvencesidir**.

KAYNAKLAR

- Azapagic, A. (2004). Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 12(6), 639-662.
- Franks, D. M., Cohen, T., & Bebbington, A. (2014). Social dimensions of mining: Research, policy and practice challenges. *Resources Policy*, 41, 1-4.
- Humphreys, D. (2015). *The remaking of the mining industry*. Palgrave Macmillan.
- Laurence, D. (2011). Establishing a sustainable mining operation: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 19(2-3), 278-284.
- Norgate, T., & Jahanshahi, S. (2010). Low grade ores – Smelt, leach or concentrate? *Minerals Engineering*, 23(2), 65-73.
- UNEP. (2019). *Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing Extractive Industries Towards Sustainable Development*. United Nations Environment Programme.
- World Bank. (2022). *The World Bank in Mining*. Retrieved from <https://www.worldbank.org/>
- ICMM (2021). *Mining Principles and Sustainable Development Report*.
- USGS (2022). *Mineral Commodity Summaries*.
- World Bank (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*.
- Bouchard, J., et al. (2021). AI in Mineral Processing Optimization. *Minerals Engineering*
- Zhang, Y., et al. (2019). Nano-silica enhanced flotation of coal. *Fuel*
- Li, X., et al. (2020). Application of nano-collector in feldspar flotation. *Minerals*

FLOTASYON YÖNTEMİNDE ESKİ VE YENİ TEKNOLOJİLER OLD AND NEW TECHNOLOGIES IN THE FLOTATION METHOD

H. Hacıfazlıoğlu ^{1,*}, İ. Kurşun ², S.N. Turan ³

¹ *İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü*
(*Sorumlu Yazar: H. Hacıfazlıoğlu: hasanh@iuc.edu.tr)

ÖZ

Flotasyon, yaklaşık son 100 yıldır toz kömür, endüstriyel hammaddeler ve metalik cevherlerin zenginleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan fizikokimyasal ayırma yöntemidir. Flotasyon prosesi temelde pülp içerisinde hava kabarcıklarının oluşturulması ve bu hava kabarcıkları ile hidrofob tanelerin yüzdürülmesi esasına dayanır. Günümüzde, flotasyon teknolojisi yalnızca cevher hazırlama alanında kullanılmamakta keza suların arıtılması, geri dönüşümlü kağıttan mürekkebin uzaklaştırılması, kirli toprakların iyileştirilmesi, boya, plastik ve besin gibi sektörlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden, çok çeşitli tiplerde flotasyon yöntemleri ve makineleri tasarlanmış ve uygulamaya girmiştir. Bu çalışmada, geçmişten günümüze flotasyon yöntemleri ele alınmıştır.

Anahtar Sözcükler: Flotasyon hücresi, mekanik flotasyon, kolon flotasyonu, jet flotasyon

ABSTRACT

Flotation is a physicochemical separation method widely used in the beneficiation of fine coal, industrial raw materials, and metallic ores for approximately the last 100 years. The flotation process is basically based on the creation of air bubbles in the pulp and the floating of hydrophobic particles with these air bubbles. Today, flotation technology is not only used in mineral processing but also in sectors such as water purification, deinking of recycled paper, remediation of contaminated soils, and the paint, plastics, and food industries. Consequently, a wide variety of flotation methods and machines have been designed and implemented. This study examines flotation methods from past to present.

Keywords: Flotation cell, mechanical flotation, column flotation, jet flotation

GİRİŞ

Flotasyon, gravimetrik yöntemlerle zenginleştirilmesi mümkün olmayan çok ince boyutlu cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılan bir fizikokimyasal ayırma yöntemidir. Bu yöntemde, tanelerin farklı yüzey özelliklerinden ve pülp içerisinde oluşturulan hava kabarcıklarından faydalanılır. Tanelerinin birbirinden ayrılması; hava kabarcığı ile temas tanelerin (hidrofoblar) yukarıya doğru, kuramayan tanelerin (hidrofiller) ise aşağıya doğru hareketi ile sağlanır.

Madencilikte mekanizasyonun artması ve yüksek tenörlü cevher yataklarının tükenmesi sonucunda serbestleşme tane boyutu çok ince olan cevherleri işleme zorunluluğu flotasyon teknolojisinin büyük bir ivme ile gelişmesine ön ayak olmuştur. Ayrıca, gıda, kimya ve çevre mühendisliği gibi alanlarda flotasyon teknolojisinin yaygınlaşması değişik alanlar için değişik tiplerde flotasyon aygıtlarının geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Günümüzde, atık suların arıtılması (askıdaki katıların ve yağların giderilmesi), geri dönüşümlü kağıttan mürekkeplerin uzaklaştırılması, endüstriyel artıklardan ağır metallerin temizlenmesi, et ve süt sektörlerinde kirleticilerin ve yağların giderilmesi için yaygın olarak flotasyon teknolojisinden

faýdalanılmaktadır. Cevher hazırlama alanında ise 100’den fazla mineralin flotasyon işlemi ile zenginleştirildiği bilinen bir gerçektir (Bakır, çinko, nikel, gümüş, manganez, kromit, kobalt, tungsten, bor mineralleri; kromit, silvin, fluorit, kükürt gibi).

Flotasyon işleminin gerçekleştirildiği ilk makineler olan mekanik hücreler, cevher zenginleştirmede 1920’li yıllardan beri kullanılmaktadır. Ancak, uygulama tane boyutunun incelişmesiyle (örneğin şlam flotasyonunda) bu makinelerden yüksek verimli ve yüksek tenörlü konsantreler üretmek neredeyse imkansızdır. Bu makinelerde üretilen hava kabarcıklarının sayısının az ve boyutunun büyük olması nedeniyle şlam boyutlu (<20 µm) tanelerin kabarcıklarla çarpışma ve kabarcığa yapışma olasılığı çok düşük olmaktadır. Ayrıca, çok ince cevherlerin artan yüzey alanları nedeniyle flotasyonda hem reaktif tüketimi hem de su ile konsantreye gang taşınımı artmaktadır.

Yukarıda bahsedilen sakıncaları ortadan kaldırmak ve daha düşük maliyetle daha seçimli konsantreler üretebilmek amacıyla son 40 yıl içerisinde farklı prensiplerle çalışan 100’ün üzerinde flotasyon aygıtı (hücre) geliştirilmiştir.

Yeni geliştirilen bu flotasyon aygıtlarının, “çok sayıda ve çok ince boyutta kabarcık üretebilme” gibi bir ortak özelliği bulunmaktadır. Bu yüzden, bu makinelerde yapılan flotasyona çoğu zaman “mikro kabarcık flotasyonu” da denilmektedir. Bilindiği gibi flotasyonda kabarcık sayısının artırılması ve boyutunun küçültülmesi ile hem verim artmakta hem de çok ince boyutlu taneler daha etkili bir şekilde zenginleştirilebilmektedir. Bu makinelerin bir diğer ortak özelliği ise yüksek köpük derinliklerine ve yıkama suyu sistemlerine sahip olmalarıdır. Bu sayede köpükle yükselen ince gang taneleri geri düşmekte/yıkamakta ve konsantrenin kalitesini arttırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, cevher hazırlamada ve diğer alanlarda uygulaması bulunan ya da uygulama potansiyeline sahip alternatif flotasyon yöntemlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca, yeni geliştirilen flotasyon aygıtları hakkında ayrıntılı bilgiler ve resimler sunulmuştur.

ALTERNATİF FLOTASYON YÖNTEMLERİ

Madencilik sektöründe cevher ve kömür zenginleştirmede yaygın olarak kullanılan flotasyon yöntemleri ve kabarcık oluşturma sistemleri Çizelge 1’de özetlenmiştir.

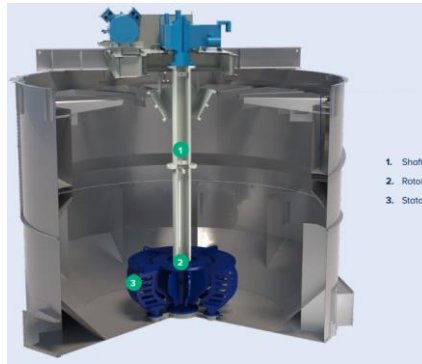
Çizelge 1. Değişik Flotasyon Yöntemleri ve Kabarcık Üretme Sistemleri

Flotasyon Yöntemi	Kabarcık Üretme Sistemi	Kabarcık Boyutu (µm)	Kaynak
Mekanik Hücre Flotasyonu	Mekanik karıştırma ile atmosferden havanın emilmesi	600-2000	Rodriguez ve Rubio, (2003); glencoretechnology.com
Kolon Flotasyonu	Havanın sparger'dan ya da poröz malzemeden geçirilmesi ile	200-1000	Yoon ve Luttrell, (1994); Finch ve Dobby, (1990); Li vd., (2003)
Jet Flotasyonu	Pülöp jeti ile atmosferden havanın emilmesi	100-600	Jameson ve Manlapig, (1991)
Pnömatik Flotasyon	Basınçlı havanın aeratör içerisinde pülöp enjeksiyonu	200-400	Imhof vd., (2002); Mohanty vd., (2003);
Santrifüj Flotasyonu	Gözenekli malzemeye (kumaş, seramik, metal, cam gibi) verilen basınçlı hava ile	400-1000	Guo, (2001); Site Technology. (2003)

Mekanik Hücre Flotasyonu

Mekanik flotasyon hücreleri, flotasyon teknolojilerinin en eski ve yaygın olarak kullanılan ekipmanları arasında yer almaktadır. Bu tür hücrelerde, pülp içerisindeki mineral tanelerinin süspansiyonda kalması, rotor ya da pervane gibi mekanik karıştırıcılar yardımıyla sağlanmaktadır. Hava kabarcıklarının üretimi ise, iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir: Bunlardan ilki, rotorun dönüşü sırasında oluşan vakum etkisiyle havanın sisteme doğal olarak emildiği kendiliğinden hava emişli sistemlerdir; diğeri ise pülp içerisine doğrudan basınçlı hava verilmesidir. Endüstriyel ölçekte, seri bağlanmış ve kendi kendine hava emebilen mekanik hücreler sıklıkla tercih edilmektedir. Bu sistemlerin en önemli dezavantajlarından biri, hücre içerisinde oluşan yoğun türbülans nedeniyle tanecik ve kabarcıklar arasında kurulan bağların zayıflayarak kopması ve bunun sonucunda konsantr ürünün safsızlık içeriğinin artmasıdır. Ayrıca, bu tür hücrelerde oluşturulan hava kabarcıklarının çaplarının oldukça büyük olması (yaklaşık 600–2000 μm aralığında) ve genel işlem kapasitelerinin düşük olması, verimlilik açısından önemli sınırlamalar yaratmaktadır. Bu sınırlamaları gidermek ve daha yüksek kapasiteli, aynı zamanda yüksek tenörlü ürünler elde edebilmek amacıyla Skim Air, High Grade, SmartCell ve TankCell gibi gelişmiş mekanik flotasyon hücreleri tasarlanmıştır. Bu yeni nesil hücreler, hem kabarcık boyutlarının daha kontrollü şekilde üretilmesine olanak tanımakta hem de daha verimli bir flotasyon süreci sunmaktadır (Hacıfazlıoğlu, 2007).

Son dönemde, mekanik sistemlerde önemli bir yenilik olarak NextSTEP™ hücre tasarımı (FLSmith & Co. A/S) öne çıkmaktadır. Şekil 1’de NextStep tasarımı gösterilmektedir. Basınçlı hava kullanan rotor-stator sistemine sahip bu hücreler, pülp içerisindeki gaz dağılımının kontrolünü sağlamaktadır. Ancak, aynı rotor tasarımına sahip hücrelerin hidrodinamik davranışları, kullanılan cevher tipi ve reaktif özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, gaz dağılımı gibi temel proses değişkenlerinin daha doğru bir şekilde izlenebilmesi için mevcut sensör teknolojilerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Pervez vd., 2024).

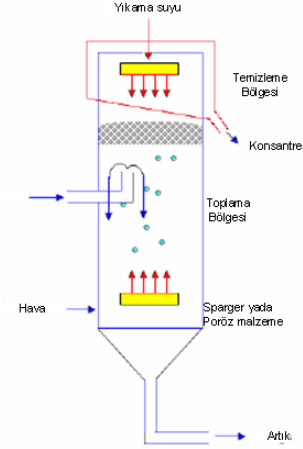


Şekil 1. NextSTEP (prod.flsmith.com)

Kolon Flotasyon Hücreleri

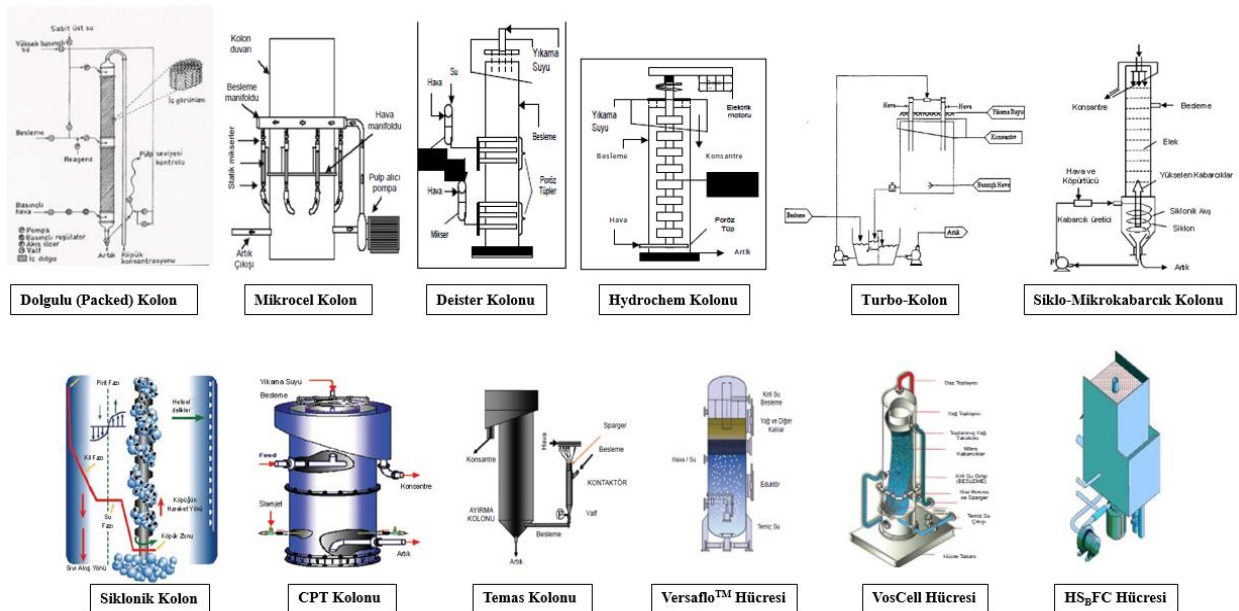
Mekanik flotasyon hücrelerinde gerçekleşen karıştırma işlemi sırasında ortaya çıkan türbülans, ince gang (değersiz) tanelerinin konsantr fazına geçmesine neden olmakta ve aynı zamanda kabarcık-tanecik bağlarının kopmasına yol açabilmektedir. Bu tür dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla, Bautin ve Tremblay tarafından 1960 yılında tasarlanan ve literatürde "Kanada kolonu" olarak bilinen ilk klasik kolon tipi flotasyon hücresi geliştirilmiştir. Bu sistemin en önemli özelliği, herhangi bir mekanik karıştırma ekipmanına ihtiyaç duyulmaksızın küçük çaplı hava kabarcıkları üretilebilmesidir. Söz konusu kolon sisteminde, hava kompresör yardımıyla gözenekli bir ortamdan geçirilerek doğrudan hücrenin alt kısmına verilmektedir. Cevher beslemesi ise köpük fazının hemen altındaki bölgeden sağlanmaktadır. Şekil 2’de gösterildiği üzere, kolon flotasyon sistemlerinde iki temel bölge tanımlanmaktadır. Hava kabarcıklarının yukarı yönlü hareketi ile tanelerin aşağı

yönlü hareketinin kesiştiği bölgeye toplama bölgesi, oluşan köpüğün yıkandığı üst kısımdaki alana ise temizleme bölgesi adı verilmektedir. Endüstriyel ölçekte kullanılan kolon hücreleri, yaklaşık 3 metreye kadar çaplara ve 15 metreye kadar yüksekliğe ulaşabilmektedir. Kolon flotasyon sistemlerinin avantajları arasında; düşük türbülanslı akış rejimi, 1–1.5 metre kalınlığındaki yoğun köpük tabakası, yıkama suyunun kullanılması ve küçük çaplı hava kabarcıklarının üretilebilmesi sayılabilir. Bu özellikler, özellikle çok ince taneli cevherlerin yüksek tenörlü ve yüksek verimli bir şekilde zenginleştirilmesini mümkün kılmaktadır (Hacıfazlıoğlu, 2007).



Şekil 2. Klasik Kolon Flotasyonu

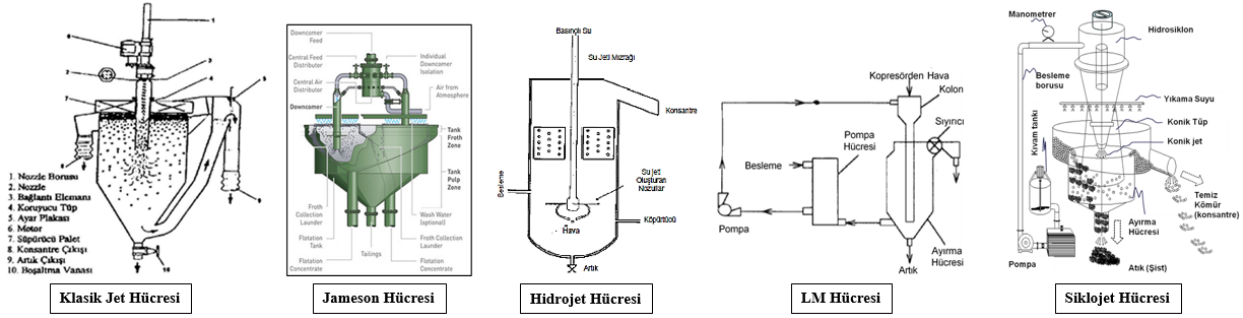
Kolon hücrelerinin bazı önemli sınırlamaları da bulunmaktadır. En belirgin sorunlar arasında, kabarcık üretiminde kullanılan sparger sistemlerinin sık tıkanması ve taneciklerin hücrede uzun süre kalmasından kaynaklanan düşük işlem kapasitesi yer almaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak, farklı tasarımlara sahip alternatif kolon türleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında Leeds, Packed (Dolgu), Flotaire, Hydrochem, Microcel, Deister, CFC (Cyclonic Flotation Column), Siklo-mikro kabarcık kolonu, CPT, Turbo kolon, Temas kolonu, Versaflo™, Monarch IGF, SelectaFlot™, VOSCell ve HSBFC gibi çeşitli sistemler yer almaktadır. Bu hücrelerin farklı tasarım ve çalışma prensiplerine sahip görünüşleri Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Farklı Tipteki Kolon Flotasyon Hücreleri (Hacıfazlıoğlu, 2007)

Jet Flotasyon Hücreleri

Suyun jet hareketinden faydalanarak kabarcık oluşturan makinelerden bazıları; klasik jet hücresi, Jameson hücresi, hidrojet ve LM flotasyon hücresidir. Yaygın olan jet flotasyon hücresi örnekleri Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Yaygın Olarak Kullanılan Jet Flotasyon Hücreleri (Hacıfazlıoğlu, 2007)

Klasik Jet Hücresi

1980’li yıllarda Berlin Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen özel bir flotasyon hücresi, özellikle 45 mikrometreden daha küçük boyutlardaki ince tanelerin ayrıştırılmasında yüksek etkinlik göstermektedir. Bu sistem, temel olarak kıvam tankı ve flotasyon hücresi olmak üzere iki ana üniteden oluşmaktadır. Sistemin ilk aşamasında, reaktiflerin ilavesiyle yoğunluğu ayarlanan pülp, kıvam tankında hazırlanır ve ardından bir pompa yardımıyla nozul sistemine yönlendirilir. Nozuldan yüksek hızla çıkan pülp akışı, çevre havasını sistem içerisine çekerek hücre içerisinde mikro boyutlu hava kabarcıklarının oluşmasına neden olur. Bu mekanizma sayesinde hem ince hava kabarcıkları elde edilmekte hem de pülp içerisindeki mineral taneleri askıda tutulmaktadır. Oluşan jet akımı, hücre içerisinde etkin bir karışım ortamı sağlayarak flotasyon koşullarını optimize eder. Bu tasarımın en dikkat çeken yönlerinden biri, diğer geleneksel sistemlere kıyasla daha küçük çaplı ve sayıca fazla hava kabarcıkları üretilebilmesidir. Bu durum, hem flotasyon süresini önemli ölçüde kısaltmakta, hem de sistemin işlem kapasitesini artırmaktadır (Önal vd., 1996; Güney vd., 2002).

Jameson Hücresi

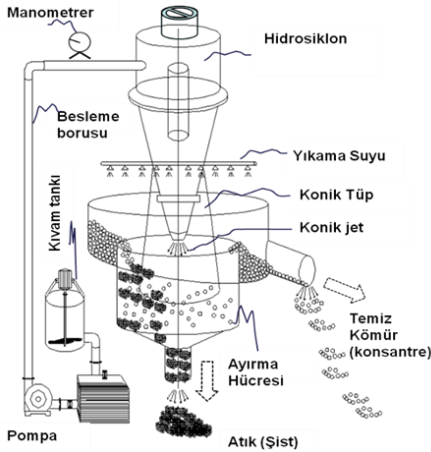
Jameson hücresi, flotasyon işlemini gerçekleştirmek amacıyla özgün bir tasarım yaklaşımı sunmaktadır. Bu sistemde, bir pompa yardımıyla basılan pülp, düşey konumlandırılmış bir borunun (downcomer) üst kısmındaki nozuldan yüksek hızla dışarı püskürtülerek hücreye beslenmektedir. Nozuldan çıkan bu akış, atmosferden vakum etkisiyle hava emilmesini sağlar ve böylece hava, pülp ile birlikte downcomer boyunca aşağı doğru hareket eder. Jameson hücresinin temel işlevini yerine getiren bileşeni olan downcomer, havanın pülp ile karıştığı ve taneciklerle kabarcıkların ilk kez temas kurduğu kritik bölgedir. Nozuldan çıkan yüksek hızlı pülp, hücre içerisindeki pülp yüzeyine çarptığında önemli düzeyde kesme kuvvetleri meydana gelir. Bu etki, içeri çekilen hava ile birleşerek hücre içinde çok sayıda ve yaklaşık 0,3 mm çapında mikro kabarcıkların oluşmasına yol açar. Elde edilen bu mikro kabarcıklar, geleneksel mekanik hücrelerde oluşan yaklaşık 1 mm çapındaki kabarcıklarla karşılaştırıldığında, hem daha küçük boyutludur hem de sayıca daha fazladır. Daha küçük çaplı kabarcıklar, toplam yüzey alanını artırmakta ve bu durum, flotasyon etkinliğini anlamlı şekilde iyileştirmektedir (Jameson, 1988; Mohanty, 1999; Mohanty, 2001; glencoretechnology.com). Endüstriyel ölçekteki Jameson flotasyon hücresi Şekil 5’de gösterilmektedir.



Şekil 5. Endüstriyel Ölçekli Jameson Flotasyon Hücresi (glencoretechnology.com)

Siklojet Hücresi

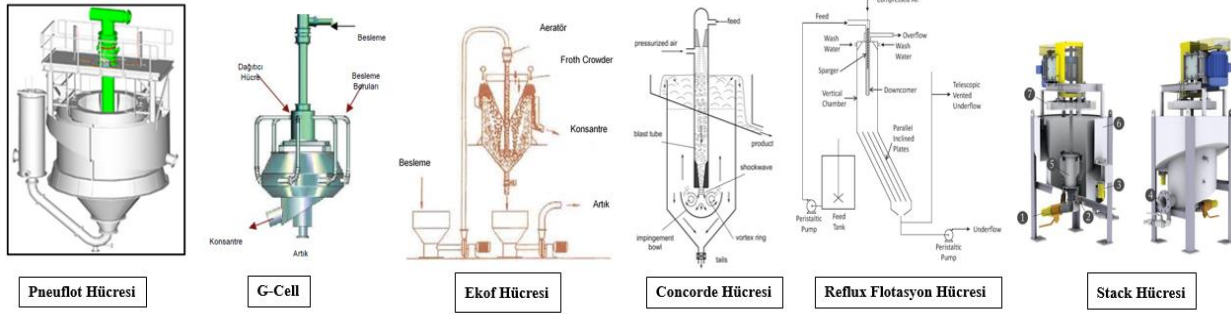
Türkiye’de geliştirilmiş olan siklojet hücresi (Şekil 6), bazı yapısal farklılıkları ile birlikte temelde jet flotasyonu prensibi ile çalışmaktadır. Bu sistemde, pülpün hem jet hareketinden hem de hidrosiklon ve hücre içerisinde oluşturulan santrifuj kuvvetlerinden faydalanılmaktadır. Klasik jet flotasyonu sistemlerinde “jet hareketi”, çok sayıda delikten oluşan bir nozul ile doğrusal olarak oluşturulmakta iken, siklojet hücresinde bir hidrosiklon apeksi ile konik şekilli olarak oluşturulmaktadır. Başka bir deyişle, siklojet hücresinde oluşturulan pülp jeti, siklonik bir hareket ile hücre içerisine dalmakta ve daha yoğun kesme kuvvetleri yaratarak daha verimli bir flotasyon sağlamaktadır. Ayrıca, gerek hidrosiklon içerisinde, gerekse hücre içerisinde meydana gelen yoğun karışma ve santrifuj kuvvetleri, taneciğin şlamla kaplanmasını minimize etmekte ve bu yolla cevherden şlamı uzaklaştırmadan daha etkili bir flotasyon işlemine olanak sağlamaktadır (Hacıfazlıoğlu ve Toroğlu, 2014).



Şekil 6. Siklojet Flotasyon Hücresi (Hacıfazlıoğlu ve Toroğlu, 2014)

Pnömatik Flotasyon Hücreleri

Bu makinelerde pervane yoktur, basınçlı hava pülpü karıştırır ve havalandırır. Gelişmiş tiplerinde yüksek pülp hızları sayesinde vakum meydana getirilir ve hava atmosferden venturi etkisi ile içeri çekilerek kabarcık oluşturulur. Pnömatik flotasyonda en bilinen hücreler; Bahr Hücresi, Ekof Hücresi, Pneuflot Hücresi, Imhoflot Hücresi ve G-Cell iken yeni sistemler olarak Concorde Hücresi, Reflux Flotasyon Hücresi, Stack Hücresi geliştirilmiştir (Hacıfazlıoğlu, 2007). Şekil 7’de Pnömatik flotasyon hücreleri örneklendirilmiştir.

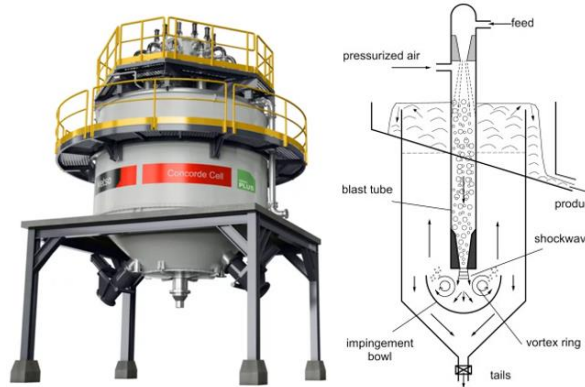


Şekil 7. Pnömatik Flotasyon Hücreleri (Hacıfazlıoğlu, 2007)

Concorde Hücresi

Concorde Hücresi, geliştirilmiş bir pnömatik yüksek yoğunluklu, yüksek taşıma kapasiteli, basınçlı hava ile ince hava kabarcıkları üreten bir teknolojidir ve bu sayede birim başına kapasiteyi artırır; daha küçük bir alan kaplar ve diğer flotasyon hücrelerinde kaybolabilecek değerli ince parçacıkların daha fazla geri kazanılmasını sağlar. Ayrıca, istenen geri kazanımları elde etmek için daha az sayıda flotasyon aşaması veya daha az geri dönüşüm gerektiğinden, elektrik, su ve reaktifler gibi işletme giderleri azaltılabilir (Yañez vd., 2024).

Profesör Graeme Jameson ve daha sonra Metso tarafından geliştirilmesi iki temel düşünceye dayanmaktadır: kabarcık boyutundaki azalma ve kesme hızı ile enerji dağılım hızındaki artış, ince parçacıkların parçacık-kabarcık çarpışma ve tutunma verimliliğini artırır. Concorde Cell (Şekil 8), özel olarak tasarlanmış iki boğaz (daralma noktası) içerir. İlk aşamada, besleme dikey jete girer ve basınç altında hava ile karışır. Hava ile zenginleştirilmiş karışım daha sonra başka bir boğazdan geçer ve burada yerel ses hızına ulaşır. Bu boğazın ilerisinde akış koşulları süpersonik (ses üstü) hale gelir ve belirli bir noktada bir şok dalgası oluşur. Süpersonik şok dalgasından geçerken kabarcıklar belirgin şekilde küçülür (Yañez vd., 2024).

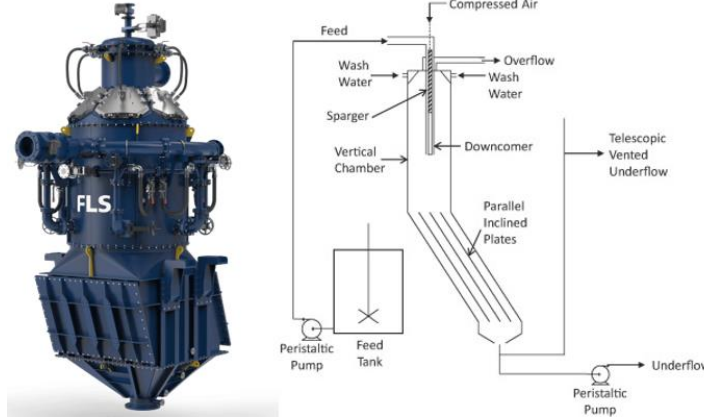


Şekil 8. Endüstriyel ve Şematik Concorde Hücresi (Jameson, 2010; metso.com)

Reflux Flotasyon Hücresi

Reflux Flotasyon Hücresi (RFC), paralel eğimli kanallardan oluşan bir sistemin üzerinde bulunan dikey bir bölmeden oluşan yeni bir flotasyon teknolojisidir (Şekil 9). RFC, partikül-kabarcık çarpışmasını ve tutunmasını desteklemek için bir aşağı akış düzenlemesi kullanır. Burada basınçlı hava, bir püskürtme borusu aracılığıyla pülpe verilir. Eğimli kanallar, sistem içindeki kabarcık-sıvı ayrımını artırır ve Boycott etkisinin bir

uygulamasıdır. Eğimli kanallar kullanılarak artırılmış ayırma oranları, bu nedenle aşırı besleme ve gaz akışları kullanılarak su basma koşullarında hidrofobik parçacıkların ayrılmasına ve yoğunlaşmasına olanak tanır. Reflux Flotasyon Hücresi'nin diğer özelliği ise flotasyon sistemine son derece yüksek bir akış hızı sağlamak için kullanılan çok kanallı bir aşağı akış kanalıdır. Kanallar, aşağı akış kanalının haznesine yerleştirilmiş eşit aralıklı püskürtme plakaları ile oluşturulur. Plakaların içine, her plakanın her iki yanında ortalanmış sinterlenmiş paslanmaz çelik saclar yerleştirilmiştir ve bu sayede ince kabarcıklar gözenekli yüzeyden geçen bulamaca aktarılabilir. Yüksek hacimsel akış hızı, kanallar içindeki dar aralıkla birleşerek, çok ince kabarcıkların oluşumu ve ince parçacıklar ile kabarcıklar arasında çarpışmaların teşvik edilmesi için ideal olan yüksek bir kesme hızı üretir (Cole vd., 2020; Dickinson vd., 2015).



Şekil 9. Reflux Flotasyon Hücresi (Cole vd., 2020; fls.com/en)

Stack Hücresi

Stack hücresi yüksek yoğunluklu flotasyon teknolojisi, ince partikül geri kazanımını artırmak ve tüm partikül boyutları aralığında flotasyon kinetiğini iyileştirmek için odaklanmış enerji girişi konseptini temel alır. StackCell teknolojisi (Şekil 10), partikül toplama sürecini köpük geri kazanım sürecinden ayırarak her bir sürecin bağımsız olarak optimize edilmesine olanak tanır (Dohm vd., 2022).

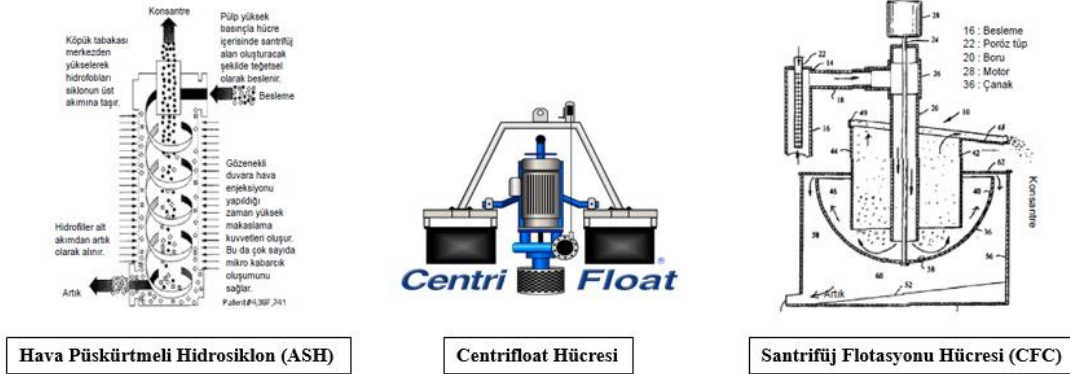
StackCell flotasyon makinesinin çalışması esnasında, pülp, yan (veya alt) bir besleme portundan bir havalandırma haznesine beslenir. Bu noktada, pülp düşük basınçlı hava eklenir. Hava ve pülp daha sonra havalandırma odasına doğru hareket eder ve burada sisteme önemli bir kesme kuvveti uygulanır. Havalandırılmış pülp uygulanan kesme kuvvetleri, küçük kabarcıklar oluşturmak ve kabarcık-partikül teması sağlamak için kullanılır. Aslında, tüm kabarcık-partikül çarpışmaları, dış tanka boşaltılmadan önce havalandırma odasında meydana gelir. Pülp dış tanka girdiğinde, köpük ve posa arasında bir faz ayrımı meydana gelir. Posa seviyesi, bir seviye sensörü ve alt akış kontrol vanası kullanılarak korunur. Köpük derinliği, ince hidrofilik gangın sürüklenmesini en aza indiren köpük yıkama işlemini kolaylaştırmak için yeterli derinlikte tutulur. Köpük, bir köpük toplama oluğuna taşar (Mankosa, 2018).



Şekil 10. Stack Hücresi (Mankosa, 2018)

Santrifüj Flotasyonu Hücreleri

Bu yöntemde yoğunluğu farklı olan tanelerin merkezkaç kuvvetlerinden ve yüzey özelliklerinden faydalanılır. Endüstriyel ölçekte kullanımı pek yaygın olmasa da 1980'li yıllardan günümüze kadar pek çok santrifüj flotasyonu hücresi geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları; ASH (Air Sparged Hydrocyclone-Hava Püskürtmeli Hidrosiklon), Centrifloat, CFC (Centrifugal Flotation Cell-Santrifüj Flotasyonu Hücresi) ve MRC (Motorless Rotorless Cell-Motorsuz Rotorsuz Hücre)'dir (Hacıfazlıoğlu, 2007). Şekil 11'de görüntüleri verilmiştir.



Şekil 11. Santrifüj Flotasyonu Hücreleri

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Flotasyon işleminin kalbi, hücre içerisinde hava kabarcığı oluşturmaktır. Ayrıştırma hava kabarcıkları ile yapılır. Bu yüzden flotasyon yönteminin ya da makinesinin adı ne olursa olsun, kabarcık üretim mekanizması önemlidir. Kabarcık üretim mekanizmasına göre flotasyon yöntemleri sınıflandırıldığında 3 ana grubun ortaya çıktığı görülmektedir. Bunlar;

Dağıtılmış Hava Flotasyonu (Dispersed Air Flotation): Hücre içerisinde hava kabarcıkları ya atmosferden emilen havanın etkisiyle ya da bir kompresörden verilen basınçlı havanın poroz bir malzemeden geçirilmesiyle elde edilmektedir. Konvansiyonel mekanik hücre flotasyonu, kolon, jet, pnömatik ve santrifüj flotasyonu hücrelerinin hepsi bu gruba örnek olarak verilebilir. Genellikle cevher hazırlama tesislerinde, mineral ve kömür flotasyonunda tercih edilen makinelerin tümü bu gruba dahildir.

Çözünmüş Hava Flotasyonu (Dissolved Air Flotation): Havanın yüksek basınç altında su içerisinde çözündürülmesi ve daha düşük basınçlı bir ortamda hava kabarcığının elde edilmesiyle yapılan bir flotasyon yöntemidir. Pahalı bir yöntem olup, genellikle suların arıtılmasında tercih edilmektedir.

Elektro-flotasyon: Suyun elektrolizi ile 30 µm'den daha küçük çaplı hidrojen ve oksijen kabarcıkları elde edilir. Maliyetli bir yöntem olduğu için uygulaması nadiren yapılır. Genellikle deneysel ölçekteki çalışmalarda kullanılmaktadır.

Tüm dünyada en yaygın kullanılan flotasyon makineleri Denver, Fagergren, Humboldt, Outokumpo, Metso ve çeşitli Çinli firmaların ürettiği mekanik hücrelerdir. Konvansiyonel flotasyon makinesi olarak bilinen bu hücreler eskiden daha küçük hacimli iken, günümüzde büyük hacimli olarak üretilmektedir. Bunun ana nedeni hücre içerisindeki türbülansı azaltma ve kabarcık-tanecik kopmasını minimize etmedir. Kolon flotasyonu son 40 yıldır hızlı bir şekilde gelişim göstermiş ve kullanımı dünyada yaygınlaşmıştır. En bilinen tipleri Kanada kolonu, Turbo kolon, Temas kolonu, Mikrocel ve CPT kolonudur. Genellikle Amerika kıtasında tercih edilmektedir. Kolon flotasyonunda ayırma ortamı daha sakin ve elde edilen kabarcık çapı da oldukça küçüktür. Bu yüzden 40 µm'ye kadar taneleri etkili bir şekilde ayrıştırabilmektedir. Jameson hücresi ise bir çeşit jet flotasyonu olup, son 30 yılda kullanımı yaygınlaşmıştır. Jameson hücresi daha çok şlam boyutlu taneleri kazanmak üzere geliştirilmiş olan, az yer kaplayan, yenilikçi ve yüksek kapasiteli bir flotasyon makinesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Jameson hücresi genellikle Avustralya'da ve Afrika'da tercih edilmektedir. Basınçlı hava ile kabarcık üretilen Pnömatik flotasyon hücreleri ise genellikle Avrupa'da ve Rusya'da tercih edilmekte olup kullanımı çok fazla yaygın değildir.

Ülkemizde flotasyon, maliyetlerinden dolayı genellikle metalik cevherlerin (bakır, kurşun, çinko vb.) zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır. Nadiren kömür yıkamada ve bazı endüstriyel minerallerin (kuvars, feldispat vb.) zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır. Kullanılan makinelerin %80'i konvansiyonel mekanik hücrelerden, kalan %20'si ise kolon ve jet flotasyonu tekniklerinden oluşmaktadır.

KAYNAKLAR

- Cole, M.J., Dickinson, J.E., Galvin, K.P. (2020). Recovery and cleaning of fine hydrophobic particles using the Reflux™ Flotation Cell. Separation and Purification Technology, Volume 240.
- Dickinson, J.E., Jiang, K., Galvin, K.P. (2015). Fast flotation of coal at low pulp density using the Reflux Flotation Cell. Chemical Engineering Research and Design. Volume 101, Pages 74-81.
- Dohm, E., Fayed, H., Wagoner, R.V. (2022). Metallurgical testing and CFD simulation of StackCell® SC-50 high-intensity flotation machine. Minerals Engineering. Volume 181.
- Finch, J.A. ve Dobby, G.S.,1990;"Column flotation", Pergamon Press, Oxford.
- Guo, J.X., 2001; "Development and Theory of Centrifugal Flotation Cell", Queen's University, Doktora Tezi, Ontorino, Kanada.
- Güney, A., Önal, G. ve Ergut, Ö. (2002). Beneficiation of fine coal by using the free jet flotation system. Fuel Processing Technology. 75, 141-150.
- Hacıfazlıoğlu, H. (2007). Alternatif Flotasyon Yöntemlerinin Tanıtılması, Madencilik, 46 (3), 23-41
- Hacıfazlıoğlu H., Toroğlu I. (2014). Pilot-scale Studies of Ash and Sulfur Removal from Fine Coal by Using the Cylojet Flotation Cell. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects. 36 (18), 1972-1981.
- https://prod.flsmidth.com/globalassets/frontify/2024/9/fls_nextstep_forcedairflotation_brochure_en.pdf
- <https://fls.com/en/equipment/flotation/reflux-flotation-cell>
- <https://www.glencoretechnology.com/en/technologies/jameson-cell>
- <https://www.metso.com/portfolio/concorde-cell/>
- Imhof, R.M., Hofmeister, S.. Brown J.V. (1994). Developments in ekof pneumatic flotation technology. 6th Australian Coal Preparation Conference. 150-162.

- Jameson G.J., (1988). A new concept in flotation column design. Sastry K.V.S. (ed.), Column Flotation'88, AIME, 281-286.
- Jameson, G.J., Manlapig, E.V. (1991). Application of the Jameson cell. Agar, G.E., Huls, B.J., Hyma, D.B., (ed.), Column'91, 2, 675-687.
- Jameson, G.J. (2010). New directions in flotation machine design. Minerals Engineering. Volume 23, Issues 11–13, October 2010, Pages 835-841.
- Li, B., Tao, D., Ou, Z. ve Liu, J. (2003). Cyclo-microbubble column flotation of fine coal. Separation Science of Technology. 38, 1125-1140.
- Mankosa, M.J., Kohmuench, J.N., Christodoulou, L., Yan, E.S. (2018). Improving fine particle flotation using the StackCell™ (raising the tail of the elephant curve). Minerals Engineering. Volume 121.
- Mohanty, M.K., Honaker, R.K. (1999). Performance optimisation of Jameson flotation technology for fine coal cleaning. Minerals Engineering. 12, 367-381.
- Mohanty, M.K. (2001). In-plant optimisation of a full-scale Jameson flotation cell. Minerals Engineering. 14, (11), 1531-1536.
- Mohanty, M.K., Wiltowski, T. (2003). On-site demonstration of an integrated fine coal cleaning and dewatering circuit. ICC Project Number: 03-1/4.1 A-3, Final Technical Report, September 1.
- Önal, G., Acarkan, N., Güney, A. (1996). Cevher Hazırlamadaki Yeni Gelişmeler. 21. Yüzyıla Girerken Türkiye Madenciliği, 20-22 Haziran, Sivas, 157-175.
- Pervez, H., Hassan, A., Sommer, A.E., Zürner, T., Pereira, L., Rudolph, M., Maaß, S., Bowden, J., Eckert, K. (2024). A multi-sensor approach to measuring hydrodynamic parameters in a pyrite-quartz flotation system. Minerals Engineering. Volume 216.
- Rodrigues, R.T., Rubio, J. (2003). New basis for measuring the size distribution of bubbles. Minerals Engineering. 16, 757-765.
- Site Technology, (2003). "Air-Sparged Hydrocyclone" Montana College of Mineral Science And Technology", 96-97
- Yáñez, A., Kupka, N., Tunç, B., Suhonen, J. ve Rinne, A., 2024, Fine and ultrafine flotation with the Concorde Cell™ – A journey, Minerals Engineering, Volume 206.
- Yoon, R.H. ve Ruttrell, G.H., 1994; "Microcel™ column flotation scale-up and plant practice", Proceeding of the 26 th Annual Meeting Canadian Mineral Processing, CIM, paper 12.

CREATING VALUE FROM WATER IN MINING

R. Salmimies^{1,*}, N. Harjula¹, E. Strand¹

¹ *Sofi Filtration Oy, Tillinmäentie 3 B FI-02330 Espoo, Finland*
 (*Corresponding Author: riina@sofifiltration.com)

ABSTRACT

Water is essential in mining operations, but we have yet been unable to truly maximize the hidden value in water. This talk emphasizes three use cases where value in water can be maximized by introducing advanced yet simple particle filtration technology: 1) recovery of (ultra)fine mineral concentrate from process waters of a flotation-based concentrator, 2) removal of unwanted fines to maximize water reuse and 3) removal of impurities to maximize product quality. Due to the physical nature of particle filtration, the solution is not limited by chemistry and is applicable to a wide range of different ores. For a mining company, the benefits include higher revenue and profit or decrease in costs of processing in addition to access to cleaner water and a boost in water stewardship. If you are responsible for operations or a mineral concentrator and are interested in increasing reliability and efficiency, do not miss out on this talk.

Keywords: Filtration, water, mineral processing

INTRODUCTION

Water is the common denominator for a number of concerns in mining operations. Firstly, mineral processing plants commonly operate at 80-99 % recovery, meaning that up to 20 % of valuable minerals are lost in the mineral processing plant alone ending up in various water streams. Secondly, most mineral processing is reliant on the use of water and various aqueous solutions ultimately resulting in discharge waters. Both recovery of minerals and water use are affected by the steady decline in particle sizes we have seen in the past decades in mineral processing. This decline is due to declining ore grades and increasing complexity of ore bodies that subsequently result in the need to grind finer to liberate valuable particles.

Clarification is used to separate particulate matter to create a clear liquid. Clarification can be achieved by a number of different means, also including the use of chemicals for flocculation and coagulation. Filtration is also used to achieve clarification. This is when we speak of clarification filtration, or sometimes polishing filtration. Commonly used polishing filters include different media filters, cartridge and bag filters and membrane filters. All these technologies come with disadvantages including the use of chemicals, large footprints, low unit capacities and the need to replace the filter medium thus leading to generation of waste. Furthermore, and often most importantly, operator hours are tied to maintaining filters, which rarely is core to a plant operator.

Self-cleaning filters, or screen filters, offer multiple benefits in polishing filtration. They are commonly fully automated, do not require replacement of the medium as the medium is commonly made of stainless steel and filtration capacity is restored through the self-cleaning action of the filter. However, not all self-cleaning filters are the same. They rely on different kinds of self-cleaning mechanisms and thus cater to different kinds of needs. Many of the self-cleaning filters in the market are effective only down to a screen rating of 10 µm.

The Sofi Filter® is a patented self-cleaning filtration solution for the separation of (ultra)fine particles from water. This paper investigates the performance of the Sofi Filter® in value creation in mining, in particular

in recovery of fine mineral concentrate in a flotation-based flowsheet, in water reuse and in removal of impurities from an aqueous product solution.

TECHNOLOGY AND METHODOLOGY

In all our experimentation we used the Sofi Filter® SF200, which is a compact self-cleaning microfiltration solution for (ultra)fine particles. The filter is made out of stainless steel with a stainless steel wire mesh as the filter medium, it is fully automated and runs on unique ultrasonically assisted self-cleaning to ensure capacity restoration after each filtration cycle.



Figure 1. Sofi Filter SF200

The Sofi Filter® SF200 filtration system, as shown in Figure 1, consists of an SF200 filter, a control unit, a feed pump and a feed tank. Pressure and flow data are recorded by a computer. The filter is equipped with an ultrasonic rod and employs patented cross-flow technology. All the functions e.g. pump speed, valve openings and back washing parameters can be managed from the control unit. The filter can be operated in either dead-end or cross-flow mode. The flow arrangements for these vary. In dead-end all feed is driven through the filter element and separates into two streams: filtrate and reject. In cross-flow, the feed flows over the filter medium tangentially. In cross-flow, the feed separates into three streams: filtrate, concentrate and reject. The selection of the filter element is key for separation. Both the pore size of the filter element as well as the micro geometry of the filter medium varies. Different geometries are good for different types of solids and the pore size (i.e. micron rating) is indicative of the size of the solids separated from the feed. Our filter elements vary from 0.3 up to 500 μ m nominal.

The solids concentration of the various waters was analyzed according to the SFS-EN 872:2005 standard, where the measurement uncertainty is 10%. Metal analyses were conducted by a third-party laboratory, where necessary.

The Sofi Filter® SF200 is not commonly used for mining applications, where volumetric flowrates can be high. The SF1000, which is our larger industrial filter, is often the tool of choice for mining applications. The filtration chamber of the SF1000 is shown in Figure 2 (Left). The technology is modular, as shown in

Figure 2 (Right), and target capacity is reached by multiplying the number of filtration units to manufacture a full turn-key skid.

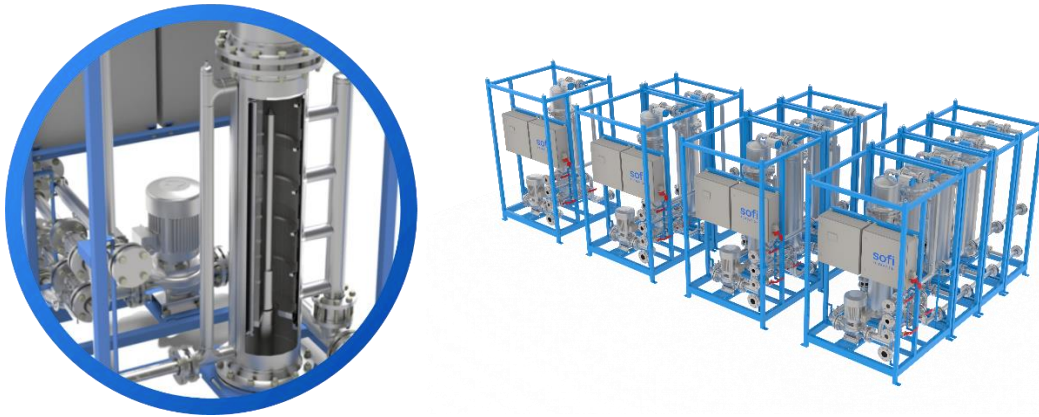


Figure 2. (Left) Sofi Filter® SF1000 and (Right) modular units of SF1000.

There are several ways to create value from water in mining using the Sofi Filter® and we will be highlighting a few ways in this paper: 1) recovery of (ultra)fine mineral concentrate from process waters of a flotation-based concentrator, 2) removal of unwanted fines to maximize water reuse and 3) removal of impurities to maximize product quality.

Our recovery solution, **Sofi Alchemist**, is a water treatment solution for recovering (ultra)fine mineral concentrate from process waters. As a result, overall recovery can be boosted and more concentrate is produced for the benefit of the process owner. The guiding principle of Sofi Alchemist is shown in Figure 3.

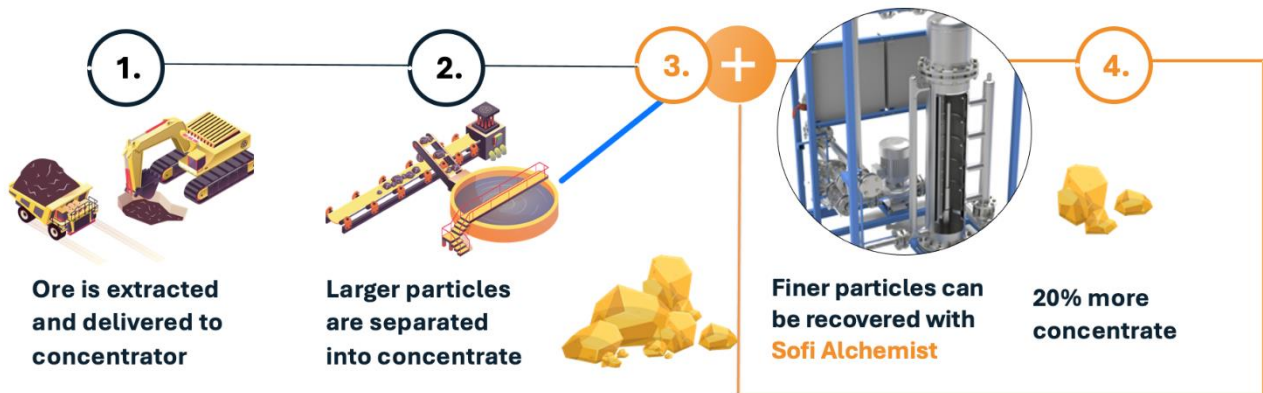


Figure 3. Recovery of fine mineral concentrate by Sofi Alchemist.

Our water treatment solution, **Sofi Prima**, is our original approach to creating value from water for process owners. Sofi Prima allows for the removal of unwanted solids from water and various aqueous streams to improve product quality or enable water reuse without concerns over fine particles causing disruptions or increasing processing costs.

RESULTS AND CONSIDERATIONS

In this section, we summarize some of the key findings of our test work in treating process waters from the mining industry. Firstly, we will address the recovery of fine mineral concentrate. Secondly, we will report on the results of treating dam water for recirculation. Thirdly, we will look into the removal of impurities from a product solution.

Recovery of fine mineral concentrate

The solid concentration of process water varies from site to site and periodically within mineral processing plants. Table 1 highlights some of the concentrations we have observed during testing our technology. As can be seen from the table, initially the solid concentrations might feel low to an engineer, an operator or a manager, who are used to operating at the solids concentrations typically present in mineral processing. This may easily lead to quick conclusions of poor economic viability.

Table 1. Solid concentration of some waters from various mineral processing plants.

Mineral	Solid concentration, mg/L	Recovery, %
Gold	3,986	99
Gold	160	100
Copper	18,850	100
Nickel	555	100

As can be seen from Table 1, close to ideal recovery of fine concentrate can be achieved with our Sofi Filter®. As our standardized analytics for solids concentration is limited down to 2 mg/L, concentration below that cannot be detected in the filtrate and thus **recoveries of fine mineral concentrate, otherwise lost in mineral processing, reach 100 %**.

Removal of unwanted solids to reuse process water

In recirculating process water from a storage dam, it is important that the water is free from fine solids. Table 2 summarizes our testing results for when we treated dam water to remove fine solids to enable the recirculation of that water into froth flotation. The customer is particularly concerned over **increased fines and the subsequent chemical consumption** in flotation.

Table 2. Performance of the Sofi Filter® against dam water for recirculation.

Pore size, µm	Filtration mode	TSS, mg/L		Flux, m ³ /h/m ²
		Feed	Filtrate	
1 (wire mesh)	Dead-end	8.8	10.8	12.4
0.5 (wire mesh)	Dead-end	10.4	1.2	12.3
0.5 (powder sintered)	Dead-end	10.2	2.6	4.8

As can be seen from Table 2, significant reduction in solids concentration can be achieved even in very low solid concentrations. The lower the solids concentration, the more important the screening effect becomes in filtration. When solid concentrations are this low, it is important to employ a very fine mesh to achieve a high degree of separation.

Removal of impurities from a product solution

Sometimes product quality suffers from fine impurities in low concentrations. We recently tested for a mining customer, who has attempted to address the problem of impurities using media filters. Those were unsuccessful. Our trials were limited by the low concentration of the impurities as we could not use our standardized analytics to determine the solids concentration of the feed or the filtrate. To overcome this problem, we used visual inspection of filter papers, as seen in Figure 4, and image analysis to calculate an approximate number of particles.

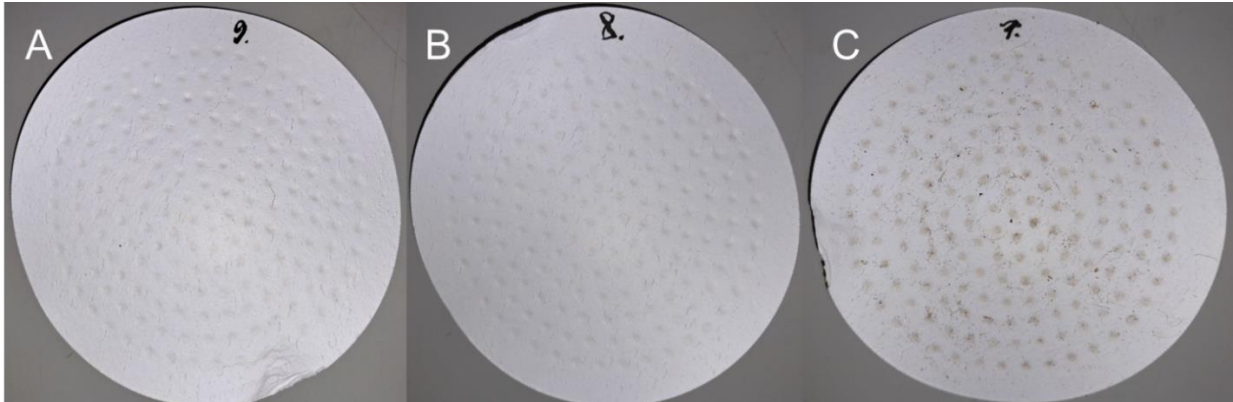


Figure 4. Filter papers of (A) feed, (B) filtrate and (C) reject. Despite it being impossible to visually differentiate between the feed and the filtrate, the reject clearly shows the accumulation of impurities.

As can be seen in Figure 4, the reject sample (C) clearly showed the impurities despite them being difficult to observe visually on the feed side (A). Overall, a capacity of approximately 100 m³/h can be treated with 4 x SF1000 filters. As a result, **product quality is improved and ensures that the operator can deliver sufficiently high quality product to their customers.**