

## **BOND İŞ İNDEKSİNİN HIZLI BELİRLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI**

### **A COMPARISON OF METHODS FOR RAPID DETERMINATION OF BOND WORK INDEX**

S.ERSAYIN

Hacettepe Üniversitesi, Maden Müh. Böl. Beştepe-ANKARA

H.İ.KIRŞAN

MTA Genel Müd., M.A.T. Dairesi-ANKARA

**ÖZET:** Bu çalışmada Bond iş indeksini belirlemede kullanılan üç hızlı yöntem karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler Kapur, Karra ve Magdolinovic yöntemleridir. Her üç metod da Standart Bond değirmeninde iki öğütme evresi gerektirmektedir. Önce, altı farklı malzemenin farklı test eleği açıklığı için Standart Bond yöntemiyle iş indeksleri belirlenmiştir. Daha sonra, iş indeksleri hızlı yöntemlerle hesaplanmıştır. Herbir yöntemle elde edilen öğütülebilirlik ve iş indeksleri standart yöntemle karşılaştırılmıştır. En iyi değerlerin Magdalinovic yöntemiyle elde edildiği sonucuna varılmıştır.

**ABSTRACT:** In this study, three rapid methods of Bond Work Index determination are compared. These were Kapur, Karra and Magdolinovic methods. All three methods require only two cycles of grinding in a standard Bond mill. First, the work indices of six different materials were determined by following the Standard Bond method for different meshes of grind. Then, they were also estimated by the rapid methods. The predicted grindabilities and work indices of each method were compared with the standard values. It was concluded that the method of Magdolinovic provided the best estimates.

#### **1. GİRİŞ**

Cevher hazırlama tesislerinin öğütme devrelerinin tasarımında, ele alınan bir cevher için gerekli değirmen boyut ve güç gereksiniminin belirlenmesinde ve çalışan devrelerin performansının değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan yaklaşım Bond yöntemidir. Son yıllarda modelleme ve simülasyon konularındaki gelişmelere paralel olarak, enerji temeline dayalı yeni yöntemler geliştirilmişse de (Lira ve Kavetsky, 1992), Bond yöntemi hala endüstrideki önemini korumaktadır. Bunun nedeni yöntemin uzun yıllar kullanılması sonucu bir endüstriyel standart haline gelmesinin yanı sıra uygulamada tatmin edici

sonuçlar veriyor olmasıdır. Yöntem bu olumlu yönlerine karşın kullanımı zorlaştıran iki özelliğe sahiptir. Bunlar, yöntemin temelini oluşturan Bond İş indeksinin belirlenmesi için bu işleme özel bir değirmene gereksinim olması ve bu işlemin uzun ve yorucu deneysel çalışmalar gerektirmesidir. Bu olumsuzlukların aşılabilmesi için çok sayıda araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalar yapılmış, bu çalışmalar Çizelge 1 de sıradan bir laboratuvar değirmeni Üe Bond İş indeksini belirleme yöntemleri ve Bond değirmeni ile hızlı olarak iş indeksi belirleme yöntemleri olarak iki ayrı kategoride verilmiştir.

## Çizelge 1. Bond İş İndeksini Hızlı Olarak Belirlemede Kullanılan Yöntemler

### a. Sıradan Laboratuvar Değirmeni Kullanılan Yöntemler

Kaynak	Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
Bery ve Bruce (1966) Horst ve Bassarear (1976)	Referans cevherle karşılaştırma Kinetik yaklaşım ve referans cevherle karşılaştırma	Hızlı Hassas	Düşük hassasiyet, referans cevherine ihtiyaç var Referans cevher ve uzman gereksinimi
Yap ve arkadaşları (1982)(Anaconda Yöntemi) Armstrong (1986)	Çok sayıda referans cevherle kalibrasyon Çubuklu değirmen deneylen ile iş indeksi tayini	Hızlı ve hassas Hızlı	Çok sayıda referans cevherle kalibrasyon gereksinimi Enerji ölçümü gereksinimi

### b. Bond Değirmeni Kullanan Hızlı Yöntemler

Smith ve Lee (1963)	Kesikli ve Bond öğütlebilirlikleri ilişkisi	Hızlı	Sapmalar yüksek
Kapur (1970)	Bond testinin ilk iki evresinin verilen ile simülasyon	Hızlı	Bazı malzemelerde yüksek sapmalar
Karra (19SI) Magdalinovic(1989)	Kapur yönteminin geliştirilmiş şekli Özel hazırlanmış malzeme ile iki evreli Bond testi	Hızlı Hızlı	Uzun Hesaplama Özel malzeme hazırlama gereksinimi
Lewis ve arkadaşları (1990)	Bond testinin ikinci evresi verilen ile simülasyon	Çok hızlı, farklı meşlerde uygulama Hızlı, farklı meşlerde uygulama	Karmaşık hesaplama yöntemi
Sönmez ve Demrel (1992)	Kümülatif bazı modellerle simülasyon	Hızlı, farklı meşlerde uygulama	En az Uç öğütme evresi gereksinimi Bilgisayarla simülasyon

Bu çalışmaların dışında iş indeksinin belirlenmesi sadece çok az kısaltan Hızlı Kontrol (Quick Check) yöntemi (Yap ve arkadaşları, 1982) ve Köse ve Koç (1990) tarafından geliştirilen yöntem de bulunmaktadır.

Hızlı kontrol yöntemi -6 meş olarak hazırlanan standart Bond testi beslemesinin  $F_{80}$  değerinin malzemeden malzemeye fazla değişmeyeceğini, benzer şekilde de ürüne ait  $P_{80}$  değerinin de büyük ölçüde test eleğine bağlı olacağını göz önüne alarak iş indeksinin tayini için gerekli bu değerlerin deneysel olarak belirlenmeden, bu amaçla hazırlanan çizelge değerlerinin direkt olarak kullanılabilirliğini öngörmektedir.

Köse ve Koç (1990) tarafından geliştirilen yöntem ise Standart Bond testinin ilk evresi dönüş sayısının besleme içindeki test eleğinden daha ince malzeme oranından yola çıkılarak belirlenmesinin topları evre sayısını kısaltabileceği temeline dayanmaktadır.

Buna karşılık Yashima ve arkadaşları (1970) ise malzemenin mekanik özelliklerinden yola çıkılarak iş indeksinin belirlenmesini hedefleyen bir yöntem geliştirmişlerdir. Malzemenin mekanik

özelliklerini belirlemek standart Bond deneyinden daha zor olması nedeniyle bu yöntem pratik olarak görülmemektedir.

Kapur, Karra ve Magdalinovic yöntemleri Standart Bond değirmeni kullanarak, iş indeksini hızlı olarak belirlemeyi amaçlamaktadırlar. Her üçüde standart Bond testinin ilk iki evresinden elde edilen verilerden yola çıkmaktadır. Gerektirdikleri deneysel çalışma hemen hemen aynıdır. Çok sayıda malzemelerle yapılan çalışmalar sonunda Kapur yöntemiyle belirlenen iş indeksinin standart yöntemle belirlenene oranla olan ortalama sapmasının % 9.37 olduğu ifade edilmiştir. Buna karşılık Kapur yöntemini daha iyi sonuçlar elde etmek amacıyla geliştirerek oluşturulan Karra yönteminin ise daha iyi sonuçlar verdiği ve ortalama %4.77 sapma gösterdiği belirlenmiştir. Özel hazırlanan besleme malzemesiyle yapılan deneylere dayalı Magdalinovic yöntemi ise daha az sayıda malzeme ile test edilmiş ve bu çalışmalarda ortalama sapma değeri %4.92 olmuştur. Literatürde her üç yöntemde yöntemi geliştirenler tarafından test edilmiştir. Bu yöntemleri karşılaştıran bağımsız, bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmada bu üç yöntemin karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik olarak geniş bir

aralıkta iş indeksi değerine sahip malzemelerin önce standart Bond yöntemi ile iş indeksi belirlenmiş daha sonra bu yöntemlerle iş indeksleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar bu yöntemlerin iş indeksinin hızlı tayin edilmesinde kullanılabilirlikleri açısından karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir.

## 2. YÖNTEMLER

### 2.1. Standart Bond Testi (Deister, 1987)

İş indeksi (Wi) Bond bilyalı değirmeninde % 250 lik bir devreden yüke ulaşıncaya kadar kapalı devre kuru öğütme işleminin simülasyonu ile belirlenmektedir. Bu amaçla 3.327 mm (6 meş) altına indirilmiş 700 cm<sup>3</sup> hacimli numune kullanılmaktadır. Bu numune standart bilya dağılımında boyut ve devir sayısına sahip Bond bilyalı değirmenine konularak ilk öğütme evresinde gelişigüzel seçilen bir dönüş sayısı kadar öğütülür. Her bir öğütme evresi sonunda bütün ürün boşaltılıp test eleğinden elenir. Elek üstüne taze besleme ilave edilerek toplam ağırlık başlangıçtaki ağırlığa eşitlenir ve değirmene tekrar beslenir. İkinci öğütme evresi için dönüş sayısı %250 devreden yüke yavaş yavaş ulaşılacak şekilde hesaplanır. İkinci evreden sonra aynı eleme ve öğütme işlemi her bir devir sayısında üretilen test eleği elek altı miktarı son üç öğütme evresinde sabit oluncaya kadar devam eder. Bu durumda %250 devreden yükede ulaşılacaktır. Standart Bond testi yaklaşık 7-15 öğütme evresi sonunda tamamlanabilmektedir. Son öğütme evresinden elde edilen ürün elek analizine tabi tutulmakta ve iş indeksi aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$W_i = 1.1 \frac{44.5}{P_c^{0.23} G^{0.02} (10/P)^{1/2} - (10/F)^{1/2}}$$

bu eşitlikte;

- Wi : Bond iş indeksi (kWr<sup>-1</sup>)  
P<sub>c</sub> : Test eleği elek açıklığı (um)  
G : Bond öğütülebilirlik katsayısı  
F : Beslemenin %80 ninin geçtiği elek açıklığı (um)  
P : Son üç öğütme evresinde elde edilen elek altı ürünün % 80 ninin geçtiği elek açıklığı (um)

### 2.2. Kapur Yöntemi (Kapur, 1970)

Bu yöntem Bond öğütülebilirlik testinin doğrusal öğütme kinetiği yaklaşımı kulamlarak simülasyonuna dayanmaktadır. Bu amaçla Bond testinin ilk iki evresinden elde edilen öğütülebilirlik kullanılmaktadır. Bu yöntemde göre birinci öğütme evresi sonunda başlangıçta r oranında elek üstü içeren M<sub>1</sub> miktarındaki malzemenin t<sub>1</sub> zaman süresince öğütülmesi sonucunda elek üstünde kalan miktarı; R<sub>1</sub> aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$R_1 = r M_1 \exp(G_1 \times t_1)$$

G<sub>1</sub>] birinci evre için öğütülebilirlik parametresidir. ikinci evre için ise, elek üstünde kalan miktar

$$R_2 = r M_2 \exp(G_1 \times t_1 + G_2 \times t_2) + r M_2 \exp(G_2 \times t_2)$$

olacaktır. M<sub>2</sub>, G<sub>2</sub>, t<sub>2</sub> sırasıyla ikinci evreye ilave edilen taze besleme, ikinci evre öğütülebilirlik parametresi ve ikinci evre öğütme süresidir. Kapur bu eşitlikte yer alan G<sub>2</sub> değerinin öğütülebilirlik parametresi gibi kabul edilerek aşağıdaki eşitlikte yerine konularak Bond öğütülebilirliğinin, G<sub>2</sub> tahmin edilebileceğini ileri sürmektedir.

$$G_2 = -r M_2$$

İş indeksi ise aşağıda verilen ampirik eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$W_i = 1.1 * 2.648(P_c)^{0.406} (-G_2)^{-0.810} (rM_1)^{-0.853} (1-r)^{-0.099}$$

### 2.3. Karra Yöntemi (Karra, 1981)

Kapur yöntemini geliştirme düşüncesiyle oluşturulan bu yöntemde çıkış noktası Bond testinin ilk aşamalarında öncelikle kolay öğütülebilen tanelerin elek altı boyuta geçecekleri /or öğütülen tanelerin ise devreden yükte kalarak Bond testinin ilerleyen evrelerinde öğütülebilirliği a/altacakları düşüncesi yer almaktadır. Bu amaçla, algoritma geliştirilerek simülasyonla Bond öğütülebilirlik katsayısı, G<sup>^</sup> hesaplanması hedeflenmiştir. Bu algoritma yardımıyla bulunan öğütülebilirlik değeri aşağıdaki ampirik eşitlikte yerine konularak iş indeksi hesaplanmaktadır.

$$W_i = 1.1 * 9.934(P_c)^{0.308} (G_{kr})^{-0.696} (F)^{-0.125}$$

#### 2.4. Magdolinovic Yöntemi (Magdolinovic, 1989)

Bu yöntem de doğrusal öğütme kinetiği temeline oturtulmaktadır. Diğer yöntemlerden farkı iki evreli öğütme deneylerinin özel hazırlanmış ve Bond testinin deneysel olarak simülasyonunun amaçlayan besleme malzemesi ile yapıyor olmasıdır. Bu amaçla 2.5/3.5'i test eleğinden iri 1/3.5'i ise besleme malzemesinden oluşan karışımla ilk öğütme gelişigüzel seçilmiş bir devir sayısı (n=50,100,150) için yapılır. Elde edilen ürünlerdeki test eleği elek üstü  $R_0$  ve başlangıçtaki elek üstü  $R_0$  değerlerinden yola çıkılarak kinetik parametre  $k$ , ve ikinci öğütme evresi için devir sayısı  $N_c$  aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$k = \frac{n(\ln R_0 - \ln r_1)}{N}$$

$$N_c = \frac{n \ln(1 + 0.4r)}{k}$$

Bu eşitliklerdeki  $n$ , değirmenin dönüş hızı olup, standart Bond değirmeninde  $n=70$  dev/dak dır. İkinci öğütme evresinde de özel hazırlanan besleme malzemesi kullanılır.  $N_c$  devirli bir öğütme sonunda elek üstü miktarının yaklaşık 2.5/3.5 M 'e eşit olması beklenmektedir. İkinci öğütme evresinin elek altının boyut dağılımı belirlenmekte ve Bond öğütülebilirlik katsayısı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$G = \frac{m - 1/3.5M(1-r)}{N_c}$$

Bu eşitlikte  $m$  ikinci öğütme evresinin elek altı miktarını göstermektedir.

İş indeksi, öğütülebilirlik,  $G$ , değerinin direkt olarak Bond iş indeksi eşitliğinde yerine konulmasıyla hesaplanır. İş indeksi hesaplamasında yöntem özel ampirik bir eşitlik kullanımı gerektirmemesi bu yöntemi diğerlerinden ayıran bir başka özelliğidir. Bu yöntemin ikinci devir sayısının,  $N_c$ , standart yöntemin başlangıç devri olarak kullanılmasıyla standart yöntemin kısallılıhlıccçğidc ileri sürülmektedir.

#### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda geniş bir iş indeksi aralığının kapsayacak şekilde malzeme seçimine gidilmiştir. Sinter boksit, klinker, kuvarsit, kireçtaşı, feldspat ve apatitli manyetitten oluşan deney malzemelerinin iş indeksi önce standart Bond yöntemi ile belirlenmiş daha sonra Magdolinovic yöntemi ile de iş indeksi tayini yapılmıştır.

Herbir malzeme önce US Tyler 6 meş (3.329 mm) eleğinden geçirilmiştir. Elek üstü bir konik kırıcıda kırılmış, sürekli eleme ve kırma yapılarak bütün malzemenin -6 meş olması sağlanmıştır. Malzemenin tamamı harmanlanıp, otomatik numune bölücülerle numune alınmıştır. Orijinal numuneler elek analizine tabi tutularak boyut dağılımları belirlenmiştir. Deney numunelerinin %80 ninin geçtiği tane boyları (F) değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Aynı Çizelgede sıkıştırılmış 700 cc lik hacime karşılık gelen deney numunesi, ağırlıklarda verilmektedir.

Çizelge 2. Deney numunelerinin %80 ninin Geçtiği Elek Açıklıkları ve Standart Bond Deneyinde Kullanılan Numune Miktarları

Numune	F (um)	m (gr)
Sinter boksit	2000	1321.8
Klinker	2631	1315.5
Kuvarsit	2500	1130.5
Kireçtaşı	1679	1339.7
Feldspat	1645	1180.8
Apatitli Manyetit	1883	1421.4

Deneyler farklı öğütme meşlerinde (65,100 ve 150) yapılmıştır. Sadece sinter boksit için her üç öğütme meşinde de deneyler yapılmıştır.

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bond yönteminin yanısıra her üç yöntemde hem öğütülebilirlik hemde iş indeksi hesaplanmıştır. Sinter boksitle yapılan 208nm test elek açıklıklı standart Bond testi 3 tekrarlı olarak yapılmıştır. Bunlardan birinde ilk öğütme evresinde Magdalinovic yöntemi ile belirlenen nihai devir sayısı kullanılmıştır. Böylelikle Magdalinovic'in öne sürdüğü gibi standart yöntemde bir kısalma olup olmayacağıda araştırılmıştır. Benzer şekilde de kuvarsit ve apatitli manyetit ile yapılan standart testlerde, Magdalinovic yöntemi ile belirlenen nihai devir sayısı kullanılarak tekrar edilmiştir.

Standart Bond yöntemiyle ve diğer üç yöntemle elde edilen öğütülebilirlik değerleri Çizelge 3'de İş İndeksi değerleri ise Çizelge 4' de verilmiştir. Çizelgelerde ayrıca hızlı yöntemlerle bulunan değerlerin Standart Bond yöntemine oranla olan sapmaları da yer almaktadır. Literatürde verilen

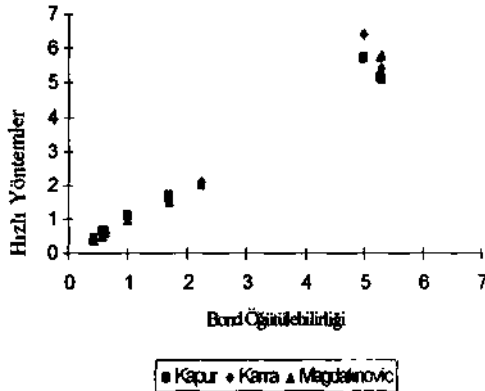
verilerle genel bir karşılaştırma yapmak amacıyla, her bir hızlı yöntem için oransal sapmaların karelerinin ortalaması aşağıda verilen eşitlikle hesaplanmıştır. Bu değerler de çizelgelerde yer almaktadır.

Çizelge 3. Bond Yöntemi ve Diğer Üç Yöntemle Elde Edilen İş İndeksi Değerleri

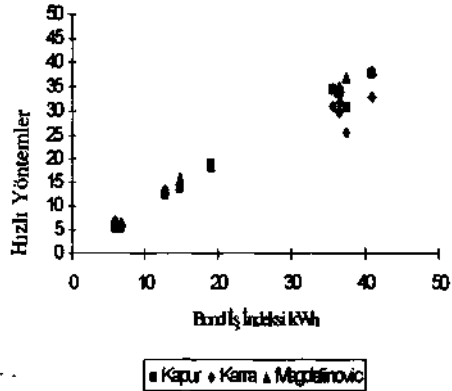
Malzeme	Test Bek Açıklığı (um)	Bond Öğütülebilirlik	Kapur		Karra		Magdalinovic	
			OJUUL	% Sapma	Öğütül.	%Sapma	ÖBÜtil.	% Sapma
Sinter Boksit	208	0.607	0.657	-8.2	0.647	-6.6	0.629	-3.6
Sinter Boksit	208	0.624	0.640	-2.6	0.609	2.4	-	-0.8
Sinter Boksit	208	0.591	0.658	-11.3	0.591	0.0	-	-6.4
Sinter Boksit	147	0.571	0.645	-12.3	0.691	-21.0	0.521	8.8
Sinter Boksit	104	0.417	0.442	AA	0.413	1.0	0.397	4.8
Klinker	147	0.995	1.103	-10.9	1074	-7.9	0983	1.2
Kuarsit	147	1.698	1.698	0.0	1587	6.5	1.522	10.4
Kuarsit	147	1.692	1.644	2.8	1521	10.1	-	10.0
Kireçtaşı	208	2.240	2.014	10.1	2.100	6.2	2.060	8.0
Feldspat	208	4.972	5.708	-14.8	6.400	-28.7	5.751	-15.7
Apatitli Manyetit	208	5.276	5.148	2.4	5711	-8.2	5.789	-9.7
Apatitli Manyetit	208	5.286	5.085	3.8	5.402	-2.2	-	-9.5
Ortalama Sapma				8.3		11.7		8.5

Çizelge 4. Bond Yöntemi ve Diğer Üç Yöntemle Elde Edilen Öğütülebilirlik Değerleri

Malzeme	Test Elek Açıklığı	Bond İş İndeksi (kWhA)	Kapur		Karra		Magdalinovic	
			İş İndeksi (kWM)	% Sapma	İş İndeksi (kWh/t)	%Sapma	İş İndeksi (kWhA)	% Sapma
Sinter Boksit	208	36.43	33.76	7.3	29.76	18.3	34.84	4.4
Sinter Boksit	208	35.61	34.45	3.3	31.04	12.8	-	2.2
Sinter Boksit	208	36.55	33.71	7.8	31.76	13.1	4	4
Sinter Boksit	147	37.44	30.77	17.8	25.53	31.8	36.76	1
Sinter Boksit	104	40.91	37.56	8.2	32.84	19.7	38.21	6.6
Klinker	147	190.1	19	0.1	18.15	4.5	18.34	3.5
Kuarsit	147	14.79	13.55	8.4	13.93	5.8	15.77	-6.
Kuarsit	147	14.76	1191	5.8	1434	2.8	-	-6.
Kireçtaşı	208	12.75	12.36	3.1	1341	-5.2	13.39	-
Feldspat	208	6.75	5.28	21.8	6.19	8.3	6.56	2
Apatitli Manyetit	208	5.82	5.75	1.2	6.59	-13.2	5.53	5.
Apatitli Manyetit	208	5.84	5.81	0.5	6.85	-17.3	-	-
Ortalama Sapma				9.6		15.0		



Şekil 1. Standart Bond öğütülebilirliklerinin hızlı yöntemlerle karşılaştırılması



Şekil 2. Standart Bond iş indeksi değerlerinin hızlı yöntemlerle karşılaştırılması

$$\text{Ortalama Sapma} = \left[ \frac{\sum (\% \text{sapma})^2}{N} \right]^{1/2}$$

N = toplam deney sayısı

Sapmalann herhangi bir eğilim gösterip göstermediğinin görülebilmesi için öğütülebilirlik ve iş indeksi değerleri ayrıca grafiksel olarak Şekil 1 ve 2' de sırasıyla sunulmuştur.

## 5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Öğütülebilirlik sonuçları göz önüne alındığında en iyi sonuçları Kapur ve Magdalinovic yöntemi ile elde edilmiş görülmektedir. Kapur yöntemi düşük öğütülebilirlik değerlerinde standart yöntemle oranla yüksek değerler verirken yüksek öğütülebilirliklerde daha düşük değerler vermiştir. Magdalinovic yönteminde ise genel bir eğilimden bahsetmek zordur. Hem Karra hemde Kapur yönteminde elde edilen ortalama sapma değerleri literatürde yer alan değerlerle uyumlu ve hatta daha da iyidir. Buna karşılık beklentilerin aksine Karra yöntemi Kapur yöntemine oranla daha büyük ortalama sapma değerine sahiptir.

Endüstriyel uygulamalar açısından daha önemli olan iş indeksi değerleri ele alındığında ise en iyi sonuçları %4.8 lik ortalama sapma değeri ile Magdalinovic yöntemi ile elde edilmiştir. Bu değer literatürde yer alan sonuçlardan çok azda olsa iyidir. Öğütülebilirlik değerlerine paralel olarak iş indeksi değerlerinde de en büyük sapmayı %15 lik ortalama sapma ile Karra yöntemi vermiştir. Kapur yöntemiyle elde edilen ortalama sapma değeri Kapur (1970) un kendi değeri olan %9.4 ile uyumlu görülmektedir. Buna karşılık Karra yöntemi beklenenden çok üzerinde bir ortalama sapma vermiştir.

Kapur yöntemi ile elde edilen iş indekslerinin ilginç bir yanı sıra bütün değerlerin standart değerlere oranla daha küçük olmasıdır. Buda Kapur'un oluşturduğu ampirik eşitliğin birinci çarpanında yapılacak küçük bir değişimle bu çalışmada elde edilen sonuçlara daha iyi uyum verecek şekilde dönüştürülebileceğini göstermektedir. Amaç bu çalışmaya özgü bir eşitlik geliştirmek olmadığı için böyle bir girişimde bulunulmamıştır. Fakat elde edilen verilere Karra tarafından geliştirilen (Karra,1981) modifiye Kapur eşitliğinin daha iyi uyum sağlayıp sağlayamayacağı araştırılmıştır. Bu eşitlikte bulunan değerler standart değerlerle karşılaştırıldığında

daha homojen bir dağılım vermesine karşın ortalama sapma değerinde kayda değer bir iyileşme olmamıştır.

Kapur ve Karra yöntemleriyle elde edilen sapmaların temelinde bu yöntemlerin sınırlı sayıda veriye dayalı ampirik eşitliklerin olmasının yattığı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışmada ele alınan malzemelerden bazılarının Kapur ve Karra'nın çalıştığı aralığın dışında malzemelerden oluşuyor olmasında bu yaklaşımların daha da büyük sapmalar vermesine katkıda bulunduğu inanılmaktadır. Fakat vurgulanması gereken bir başka nokta da bu yöntemlerin temelini oluşturan doğrusal öğütme modeline uyum göstermeyen malzemelerde en büyük sapmaların meydana gelmiş olmasıdır. Standart Bond testi verileri incelendiğinde hızlı yöntemlerin büyük sapmalar verdiği malzemelerin öğütülebilirlik değerlerinin öğütme evreleri boyunca büyük iniş çıkışlar gösterdiği görülmüştür. Bu durum bu yaklaşımların temelini oluşturan düşünce sistemine terstir.

Magdalinovic yöntemi sonuçları ele alındığında ise bu yöntemin başansız kısmen deney yöntemi olarak standart yöntemi simüle ediyor olmasından kısmende öğütülebilirlik değerlerindeki sapmaların, P değerlerindeki küçük farklılıklarla dengeleniyor olmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Her iki yöntemde elde edilen P değerleri Çizelge 5 de verilmiştir. Magdalinovic yönteminin iş indeksini hesaplamakta Standart Bond eşitliğini kullanıyor olması bu yöntemin geniş bir aralıkta başarılı sonuçlar vermiş olmasının diğer bir nedeni olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5. Standart Bond Yöntemi ve Magdalinovic Yöntemiyle Belirlenen P Değerleri

Malzeme	Test Elek Açıklığı (µm)	P Değerleri	
		Bond	Mag.
Sinter Boksit	208	150	147
Sinter Boksit	208	145	-
Sinter Boksit	208	146	-
Sinter Boksit	147	129	112
Sinter Boksit	104	88	74
Klinker	147	97	90
Kuarsit	147	129	124
Kuarsit	147	128	-
Kireçtaşı	208	147	143
Feldspat	208	150	164
Apatitli Man.	208	135	140
Apatitli Man.	208	136	-

Standart Bond yönteminin iş indeksini belirlemedeki tekrar edilebilirliği literatürde yer alan değerlere (Lewis ve arkadaşları (1990)) benzer çıkmıştır. Değerler arasındaki en büyük sapma yaklaşık % 2.6 olmuştur. Buna karşılık öğütülebilirlik değerlerindeki sapmalar çok daha büyüktür. Yaklaşık % 0.2-5 arasında değişen "Sapmalar elde edilmiştir. Öğütülebilirlikteki sapmalar büyük ölçüde P değerindeki bir değişimle dengelenmiş görünmektedir.

Kapur ve Karra yöntemlerinin tekrarlanabilirliği standart yöntemle göre düşük olmuştur. Her iki yöntemde büyük ölçüde öğütülebilirliği baz alması ve P değerinin bu yöntemlerle yapılan iş indeksi hesaplamalarında kullanılmıyor olmasının böyle bir sapmanın ortaya çıkmasına neden olduğu anlaşılmaktadır.

Magdalinovic yönteminin ikinci evresindeki devir sayısı baz alınmasının standart yöntemin evre sayısını 2-5 arasında kısalttığı görülmüştür. Magdalinovic yönteminde 2 evreden oluştuğu göz önüne alındığında bu yöntemin bu amaçla kullanılmasının pratik olmayacağı anlaşılmaktadır. Fakat bu durum başlangıç devir sayısının uygun seçiminin standart yöntemi kısaltabileceğini göstermektedir.

Standart Bond testi verileri incelendiğinde öğütülebilirlikteki değişimin Karra yönteminde öngörüldüğü gibi gelişmediği, özellikle doğrusal öğütme kinetiğine sahip olmadığı düşünülen malzemelerde öğütülebilirlik değerlerinin başlangıca oranla büyük ölçüde değiştiği görülmüştür. Bu durum Karra yönteminin başarısızlığına neden olmuş görülmektedir. Buna karşın ikinci öğütme evresinden elde edilen Kapur öğütülebilirliğinin Karra yöntemine oranla daha güvenilir bir gösterge olduğu anlaşılmaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi bu yöntemde iş indeksini hesaplamak için oluşturulan ampirik eşitliğin üzerine oturduğu veri tabanı genişletildiğinde bu yöntemin daha iyi sonuçlar verebileceğine inanılmaktadır.

Zaman gereksinimi açısından karşılaştırıldığında Kapur ve Karra sadece standart yöntemin ilk iki evresine ihtiyaç göstermektedir. Magdalinovic yönteminde de evre sayısı iki olmakla birlikte, deney malzemelerinin özel bir boyut dağılımı içeriyor olması ve ikinci evre test eleği elek altı ürününde boyut dağılımına gereksinim duyması deneysel yükü a/da olsa arttırmaktadır. Fakat bu ekstra deneysel yük, iş indeksi ölçümünde önemli ölçüde hassasiyet artışı sağlamaktadır. Magdalinovic yönteminin önemli bir avantajı da

deneysel olarak sapma göstermekle birlikte diğer yönleri ile tamamıyla Bond yöntemine sadık kalmasıdır.

Hesaplama kolaylığı açısından ele alındığında da Magdalinovic yöntemi standart yöntemle hemen hemen aynı hesaplamaları içermektedir. Buna karşın Kapur yönteminde biraz daha karmaşık olmasına karşın bir hesap makinesiyle çözümlenebilecek bir dizi eşitlikten oluşmaktadır. Karra yönteminin ise basit bir bilgisayar programı gereksinimi vardır.

Genel olarak ele alındığında her üç yöntemde ele alınan bir tesis için öğütülebilirlikteki değişikliklerin rutin olarak takip edilmesinde kullanılabilir özelliklere sahiptir. Özellikle aynı ve benzer nitelikteki malzeme ile çalışılması durumunda Kapur ve Karra yöntemlerinde kullanılan ampirik eşitlik geçmiş verilerden yola çıkılarak tesise özgü bir yapıya dönüştürülebilir ve böylece daha hassas tahmin yapımları sağlanabilir. Buna karşılık Magdalinovic yönteminde benzer kullanım için geliştirilmiş olmasına karşın, oransal sapsamasının maksimum %6.8 olması ve standart yöntemin bile tesiste elde edilen iş indeksini tahmin etmede yaklaşık  $\pm 20$  hata içerdiği (Bayraktar, 1974 ve Austin ve Luckie,1984) göz önüne alındığında bu yöntemin tasarım amaçlı olarak da kullanılması düşünülebilir.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada karşılaştırılan Uç hızlı iş indeksi tayin yönteminden Kapur ve Magdalinovic yönteminin öğütülebilirliği belirlemede standart yöntem değerlerine en yakın değerleri verdikleri görülmektedir. Buna karşın iş indeksi belirlemede ise en iyi sonuçların Magdalinovic yöntemi ile alınabileceği sonucuna varılmıştır.

Karra yöntemi ise temelini oluşturan düşüncenin tersine en büyük sapmaları vermiştir. Hem Kapur ve hemde Karra yönteminin veri tabanlarını genişleterek daha iyi iş indeksi tahminleri vermeleri sağlanabilir. Her üç yöntemde doğrusal öğütme kinetiğine uyum göstermeyen malzemelerin öğütülebilirlik ve iş indekslerinin belirlenmesinde, diğer malzemelere oranla daha yüksek sapma değerleri vermektedir.

## 7. KAYNAKLAR

**Armstrong, D.G.** 1986, An alternative Grindability Test, An Improvement of the Bond Procedure. **Int. J. of Min. Processing**, 16: 195-208

**Austin, L.G., Klimpel, R.R.** ve Luckie, P.T., 1984, .Process Engineering of Size Reduction, Ball Milling, **SME**, 50.

**Bayraktar, I.** 1974, Öğütme Hesaplarında Bond Formülleri, **Madencilik**, XIII, sayı 4: 1J-19

**Berry, T.F. ve Bruce, R.W.** 1966, A Simple Method of Determining the Grindability of Ores. **Canadian Mining Journal**, 87: 63-63.

**Deister, R.J.,** 1987, How to Determine the Bond Work Index Using Laboratory Lab Ball Mill Tests, **Eng. and Min. J.**, Feb., 42-45.

**Horsti W.E. ve Bassurear,** 1976, Use of Simplified Ore Grindability Technique to Evaluate Plant Performance. **Trans. SME AIEM**, 260: 348-351

**Kapur, P.C.** 1970, Analysis of the Bond Grindability Test. **Trans. IMM**, 79: C103-108

**Karra, V.K.,** 1981, Simulation of Bond Grindability Test, **CIM Bulletin**, 74, No.827:195-199.

**Köse, M. ve Koç, M.,** 1990, A Simplified Method of Determining the Bond Index, Proceedings of III.International Mineral Processing Symposium, 28-37.

**Lewis, K.A., Pearl, M. ve Tucker, P.,** 1990, Computer Simulation of the Bond Grindability Test, **Minerals Engineering**, 3, No. 1/2 : 199-206.

**Lira, B.B. ve Kavetsky, A.,** 1992, Breakage Power in a Grinding Process, Proceedings of the 4th International Mineral Processing Symposium, 66-82.

**Magdalinovic, N.,** 1989, A Procedure for Rapid Determination of the Bond Work Index, **Int. J. of Mineral Processing**, 27; 125-132.

**Smith, R.W. ve Lee, K.H.,** 1968, A Comparison of Data from Bond Type Closed Circuit and Batch Type Grindability Tests, **Trans. SME-AIME**, 241: 99-101.

**Sonmc/, B. ve Demirel, H.,** Benzetişim Kullanılarak Bond Öğütiilebilirlik Testinin

Basitleştirilmesi, IV. Uluslararası Cevher Hazırlama Sempozyumu Bildiriler **Kitabı**, 66-82.

**Yap, R.F., Sepulveda, J.L. ve Jauregai, R.,** 1982, Determination of The Bond Index Using an Ordinary Laboratory Batch Ball Mill, Design and Installation of Comminution Circuits, **SME**, 176-203.

**Yashima, S.,** 1970, On the Relation of Work Index and Mechanical Properties of Brittle Materials, **Kagaku Kogaku**, 34, No. 11, 1199-1205.