

# SOĞUTMA SURESİNİN KB1 SAMSUN BAKIR İZABE CÜRUFLLARININ KIRILMA KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Investigation of the Effect of Cooling Duration on the Breakage Characteristics of Copper Smelter Slags of KBİ Samsun Smelter

Tarık DOĞRU<sup>0</sup>  
Levent ERGÜN<sup>r1</sup>

## ÖZET

Bu çalışmada, farklı koşullarda soğutulmuş cüruflların otojen öğütme özelliklerinin karşılaştırılabileceği bir deneysel yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, flaş fırın cürufllarından şok soğutma, 24 saat ve 36 saat soğutma sonrası, konverter cürufundan ise 36 saat sonra soğutma sonrası örnekler hazırlanmıştır. Darbe ve aşınma etkisiyle kırılma karakteristiklerinin belirlenmesi için, sırasıyla ikiz sarkaç ve tambur düzenekleri geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda, 24 saat ve 36 saat sonra soğutmanın benzer öğütme davranışına sahip olduğu, şok soğutmanın öğütülebilirliği önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. Konverter cürufu ise darbe ile en zor öğütülen örnek olmuştur.

Anahtar Sözcükler: Otojen Öğütme, Bakır İzabe Cürufu, Kırılma Dağılım Fonksiyonu.

## ABSTRACT

The aim of the study is to develop an experimental method for comparing autogenous grinding characteristics of differently cooled slag samples. For this purpose, water quenched samples for immediate and after 24 and 36 hours cooling duration from flash smelter slags and after 36 hours cooling from converter slag were prepared. For the determination of impact and abrasion breakage characteristics, twin pendulum and tumbling drum setups were developed and used, respectively. It was found that quenching after 24 and 36 hours gave similar grindabilities whereas shock cooling increased the grindability significantly. Converter slag was the most difficult sample to grind by impact breaking.

Keywords: Autogenous Grinding, Copper Smelter Slag, Breakage Function.

<sup>0</sup>2 Dr., Büyükşehir Belediye Başkanlığı, İSU Genel Müdür Yrd.jZMIT-KOCAELI [tarikdogru@isu.gov.tr](mailto:tarikdogru@isu.gov.tr)  
<sup>n</sup> Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, 06532, ANKARA

## 1. GİRİŞ

Karadeniz Bakır İşletmeleri (KBİ) Tekkeköy-Samsun da bulunan bakır izabe tesislerinde, bakır konsantresinden flaş izabe yöntemiyle blister bakır (% 99,3 Cu) üretilmektedir. Bakır konsantresinden blister bakıra iki aşamada geçilmektedir. Birinci aşamada flaş ergitme fırınında konsantre ergitilerek % 50-60 Cu içerikli eriyik halde mat ile % 1,5-3 Cu içeren demir oksit ve silikatlardan oluşan sıvı fazda cüruf elde edilmektedir. Akışkan durumdaki mat Pierce-Smith konverterinde iki aşamalı olarak oksidasyona tabii tutulmakta ve sonunda blister bakır ve yine % 3-5 Cu içeren ve genel olarak demir oksit ile silikatlardan oluşan cüruf elde edilmektedir. İki işlem sonucunda elde edilen cüruf açık sahaya taşınmakta, 30-35 cm kalınlığında yatak oluşturacak şekilde dökülerek soğutmaya terk edilmektedir. Soğutulmuş cüruf otojen öğütme devresinde hazırlandıktan sonra flotasyonla % 28-30 Cu tenörlü bir konsantre elde edilmektedir. Bu konsantre izabe işlemine geri döndürülmektedir.

Cürufun soğuma hızı cürufun öğütülebilirliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, ergimiş haldeki demir oksit ve silikatlardan oluşan cüruf içindeki bakır içeren fazların tane boyutları da soğuma hızına bağlı olmaktadır (Shen ve Forssberg vd, 2003). Bu durum, flotasyon verimini de doğrudan etkilemektedir (Özbayoğlu ve Akgök, 1995). Bu nedenlerle, cürufun soğuma hızı kontrol edilerek öğütme ve flotasyon açısından optimize edilmesi işlemin verimliliğini artıracaktır.

Otojen öğütmede malzemenin özelliklerinin karakterize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Geleneksel olarak ' kullanılan yaklaşım pilot ölçekli testler sonunda ampirik eşitlikler kullanılarak değirmen boyutlandırılmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, çalışan bir tesiste öğütülecek malzemenin özellikleri ve işlem koşulları değiştiğinde oluşacak etkilerin belirlenmesinde ve devrenin optimizasyonunda kullanılamamaktadır. Buna karşın, matematiksel modelleme ve simülasyon teknikleri kullanılarak bu etkileri nicel olarak hesaplamak mümkün olmaktadır (Napier-Munn vd, 1996). Bu çalışmada, cürufun soğutma koşullarının KBİ Samsun İzabe tesisleri otojen öğütme devresinin performansı üzerine etkisini modelleme ve simülasyon yoluyla nicel olarak ortaya koyacak bir yaklaşım üzerinde durulmaktadır. İzlenen

yaklaşım Şekil 1'de şematik olarak sunulmaktadır.

Otojen öğütmede temel mekanizmaların iri tanelerin ince taneleri darbe etkisiyle kırması ve iri tanelerin çentikleme (chipping) ve aşınma etkisiyle ufalanması olduğu bilinmektedir (Stanley, 1974; Lynch, 1977; Digre, 1979; Austin vd, 1986). Buna göre, bilyalı değirmenlerden farklı olarak kırılma dağılım fonksiyonunun iki bileşeni bulunmakta ve kırılma hızı tane boyutu ilişkisinin bu düşünceleri içerecek şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bunu temel alarak, literatürde otojen öğütmenin matematiksel modellemesi konusunda bir çok çalışma bulunmaktadır (Austin vd, 1976; 1987; Gault, 1975; Weymont, 1979; Leung, 1987; Chen vd, 1995).

Tüm yaklaşımlar, herhangi bir boyut fraksiyonu için o tane boyutundan kırılarak ince boyutlara geçenler ve daha iri boyutların kırılması sonucu o boyut fraksiyonuna gelen malzeme miktarı için madde denkleğinin oluşturulmasına dayanmaktadır.

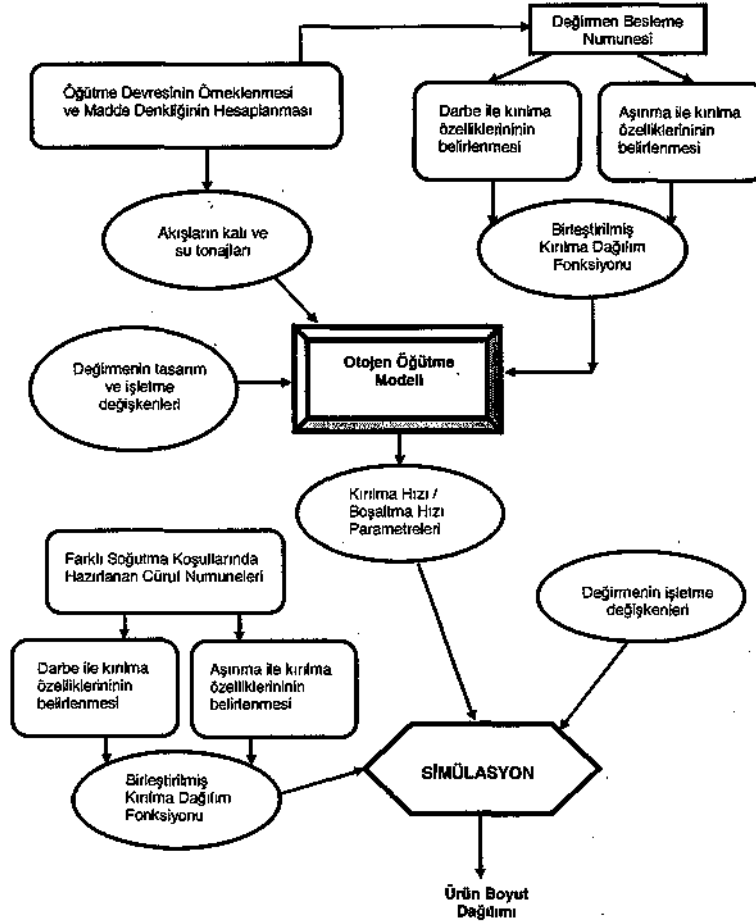
Bu çalışmada, Whiten (1974) tarafından geliştirilen mükemmel karışım (perfect mixing) yaklaşımını temel alan Leung (1987) model yaklaşımı kullanılmıştır. Yaklaşımında, herhangi bir tane boyut fraksiyonu için kararlı durumda madde denkleği Eşitlik (1) ve (2) ile verilmektedir.

$$o = \sum_{i=1}^n f_i - P_i + 2 \sum_{i=1}^n r_i - \sum_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

$$P_i = d_i S_i \quad (2)$$

Burada,

- $f_j$  : i. boyut fraksiyonunda değirmene giren malzeme tonajı (ton/saat)
- $P_i$  : i. boyut fraksiyonunda değirmenden çıkan malzeme tonajı (ton/saat)
- $r_i$  : i. boyut fraksiyonundaki tanelerin kırılma hızı (1/saat)
- $S_i$  : i. boyut fraksiyonunun değirmen içindeki miktarı (ton)
- $d_i$  : i. boyut fraksiyonundaki tanelerin değirmenden boşalma hızı (1/saat)
- $a_j$  : kırılma dağılım fonksiyonu (boyutsuz)



Şekil 1. Soğutma süresinin öğütme üzerine etkisinin simülasyon yoluyla belirlenmesinde izlenen yaklaşım

Kırılma dağılım fonksiyonu,  $a^*$ , tanenin kırıldığında kendinden ince boyutlara hangi oranlarda dağıldığını tanımlamaktadır. Otojen öğütmede kırılma dağılım fonksiyonu, malzemenin darbe etkisiyle kırılma ve kendi kendini aşındırma özelliklerinin bileşkesi olmaktadır. Darbe etkisiyle kırılma davranımını belirlemek üzere ikiz sarkaç veya ağırlık düşürme yöntemi kullanılırken, aşınma karakteristikleri için tambur testi kullanılmaktadır (Napier-Munn vd, 1996).

Çalışmada, farklı soğutma koşullarında hazırlanmış flaş fırın cürüfları ve konverter cürufunun, modelleme ve simülasyon çalışmalarında kullanılmak üzere, darbe ve aşınma ile ufalanabilirliklerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kullanılan deneysel yöntemler ve hesaplamalar açıklanmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1 Deney Örneklerinin Hazırlanması

Deney örnekleri KBİ Samsun İzabe Tesisleri'nde flaş fırın ve konverterden sıvı halde potalara alınan cürüfların 600x600x350 mm boyutlarındaki kaplara dökülmesiyle hazırlanmıştır. Şok soğutma işlemi, cüruf kaba döküldükten hemen sonra üzerine su sıkılarak, 24 saat ve 36 saat soğutmada ise soğuma zamanı sonunda kaplara su sıkılarak gerçekleştirilmiştir. Kaplardan sökülen cüruf örnekleri laboratuvar tipi çeneli kırıcıda kırılarak -55+38 mm, -13,2+12,5 mm, -9,5+8,0 mm ye -5,6+4,8 mm fraksiyonları hazırlanmıştır. Örneklerin kimyasal bileşimleri ve mineralojik özellikleri sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2'den izlenebileceği gibi soğuma süresi arttıkça fayalit miktarı azalırken manyetit miktarı

artmaktadır. Ayrıca oluşan fazların tane boyutları da soğuma süresi arttıkça büyümektedir.

Çizelge 1. Örneklerin Kimyasal Bileşimleri

	İçerik(%)	
	Flaş Fırın	Konverter
SiO <sub>2</sub>	28,01	28,08
Cu	2,88	3,39
Fe	43,91	44,48
S	0,96	0,55
Pb	0,10	0,24
Zn	2,00	-
As	0,055	0,094
MgO	0,18	0,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,38	-
CaO	0,85	-

Çizelge 2. Örneklerin Mineralojik Özellikleri

Flaş Fırın Cürufu	Şok	24 saat	36 saat
Fayalit(%)	75-85	70-75	68-73
Oluşum tane boyutu (mm)	0,030-0,3	0,4-1,2	>1,2
Manyetit (%)	12-15	18-22	20-25
Oluşum tane boyutu (mm)	0,030-0,1	0,030-0,2	0,050-0,7
Konverter Cürufu			
Fayalit (%)	60-65		
Oluşum tane boyutu (mm)	>1,2		
Manyetit (%)	25-30		
Oluşum tane boyutu (mm)	0,050-0,7		
Cu mineralleri	"abit Cu, Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub> , Cu <sub>9</sub> S <sub>5</sub> , CuFeS <sub>2</sub> , Cu <sub>2</sub> S, Cu <sub>2</sub> O, CuO		
Diğer mineraller	* * f > * CaCO <sub>3</sub> , AlSi <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> , FeS <sub>2</sub> ,		

Bakır mineralleri açısından şok soğutma örneği diğerlerine oranla farklı bir özellik göstermektedir. Bakır minerallerinin bir bölümü 2-50 jnm büyüklüğünde manyetitle içiçe taneler halinde bulunurken, bir bölümünün 20-100 j-m taneler halinde bulunduğu saptanmıştır. 24 ve 36 saat soğutma sonunda hazırlanan örneklerde bakır mineralleri genellikle 40-50 M<sup>TM</sup> boyutunda oluşmakta, 2-3 mm, nadiren de 10 mm' ye kadar iri damlalar gözlenmektedir.

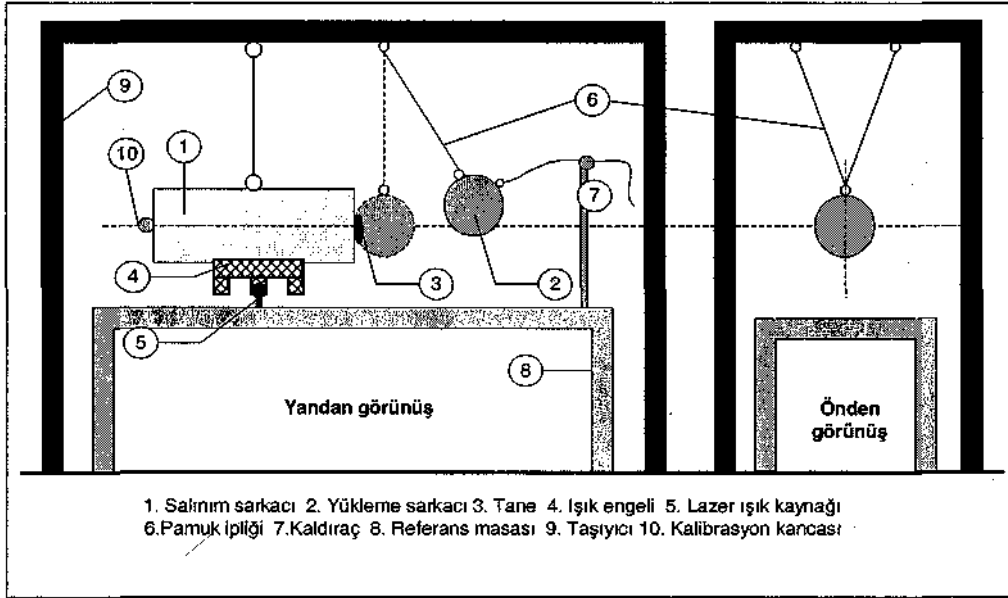
## 2.2 Deney Düzenekleri ve Deneysel Yöntem

### 2.2.1 İkiz Sarkaç Düzeneği

Bu çalışmada malzemenin darbe ile kırılma dağılımını elde etmek üzere ikiz sarkaç yöntemi kullanılmıştır. İkiz sarkaç yöntemi tek tane kırılması için harcanan enerjinin duyarlı bir biçimde belirlenmesine ve bunun boyut dağılımlarıyla ilişkilendirilmesine dayanmaktadır. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2'de sunulmaktadır.

İkiz sarkaç test düzeneğinde yükleme sarkacı (2) olarak 4,345 kg ağırlığında özel sertleştirilmiş çelikten bir bilya kullanılırken, salınım sarkacı (1) olarak 6,115 kg ağırlığında yüzeyi sertleştirilmiş çelik bir silindir kullanılmaktadır. Sarkaçlar çerçeveye yükseklikleri ayarlanabilir bir donanımla asılmaktadır. Salınım sarkacının alt kısmına uzunlamasına üç adet ışık engeli (4) monte edilmiştir. Salınım sarkacı bir lazer kaynağı ile detektör arasında salınım yapmaktadır. Yükleme sarkacı bilinen bir yükseklikten bırakılarak, salınım sarkacının ön yüzüne iliştilmiş taneyi kırması sağlanmaktadır. İlk darbeden sonra yükleme sarkacı durdurulmakta ve salınım sarkacının periyodu üzerine bağlanan üç adet ışık engelinin lazer kaynağından geçtiği sürenin kaydedilmesi ile mümkün olmaktadır. Salınım sarkacının hareketinin 25 salınım için izlenmesi sonucu, hızının duyarlı bir şekilde belirlenmesiyle momentumun korunumu ilkesinden yola çıkarak enerji denklığı oluşturulmaktadır. Yükleme sarkacının salınım sarkacına çarpması sonucunda yükleme sarkacının enerjisi; salınım sarkacının hareketi, çarpışmadan sonra yükleme sarkacının ters yönlü hareketi, sistem içindeki kayıplar ve tanenin kırılması için harcanmaktadır. Hesaplama ile ilgili detaylar başka bir kaynakta verilmektedir (Doğru, 2002).

Flaş fırın cürufunun şok soğutma (F1), 24 saat soğutma (F2), 36 saat soğutma (F3) örnekleri ve konverter cürufu (K) örneklerinden hazırlanan -13,2+12,5 mm, -9,5+8 mm ve -5,6+4,8 mm fraksiyonları Çizelge 3'te verilen yükleme enerjilerinde kırılmıştır. Her boyut fraksiyonundan temsili elek analizine yetecek sayıda tane kırılmıştır. Kırılan ürünlerin tane boyutu dağılımları kuru elemeye belirlenmiştir.



Şekil 2. İkiz sarkaç test düzeneğinin şematik görünümü ve temel bileşenleri

Çizelge 3. İkiz Sarkaç Testlerinde Kullanılan Enerji Seviyeleri

Tane Boyutu (mm)	(F1) Yükleme Enerjisi (kg-cm)	(F2) Yükleme Enerjisi (kg-cm)	(F3) Yükleme Enerjisi (kg-cm)	(K) Yükleme Enerjisi (kg-cm)
-13,2+12,5	59,84	59,84	59,84	59,84
	91,53	91,53	91,53	91,53
	131,64	131,64	131,64	131,64
-9,5+8	59,84	59,84	59,84	59,84
	91,53	91,53	91,53	91,53
	131,64	131,64	131,64	131,64
-5,6+4,8	32,33	32,33	32,33	32,33
	59,84	59,84	59,84	59,84
	91,53	91,53	91,53	91,53

### 2.2.2 Tambur Aşınma Testi

Farklı cüruf örneklerinin çentikleme ve aşındırma şeklinde kendi kendini ufalamasını karakterize etmek amacıyla Avustralya'da Julius Kruttschnitt Mineral Araştırma Merkez'inde (JKMRC) standart olarak kabul edilmiş tambur testi yöntemi kullanılmıştır (Napier-Munn vd,1996). Bu amaçla 0300x300 mm boyutlarında bir tambur imal ettirilmiştir. Tambur çevresi boyunca her 90°'de bir tane olmak üzere 4 adet 10 mm yüksekliğinde kaldırıcı astar bulunmaktadır.

-55+38mm tane boyutunda hazırlanan 3 kg malzeme %70 kritik hızla 10 dakika süre ile tamburda döndürülmüştür. Bu süre sonunda değirmen boşaltılmış ve malzemenin tamamı elenerek tane boyut dağılımı belirlenmiştir.

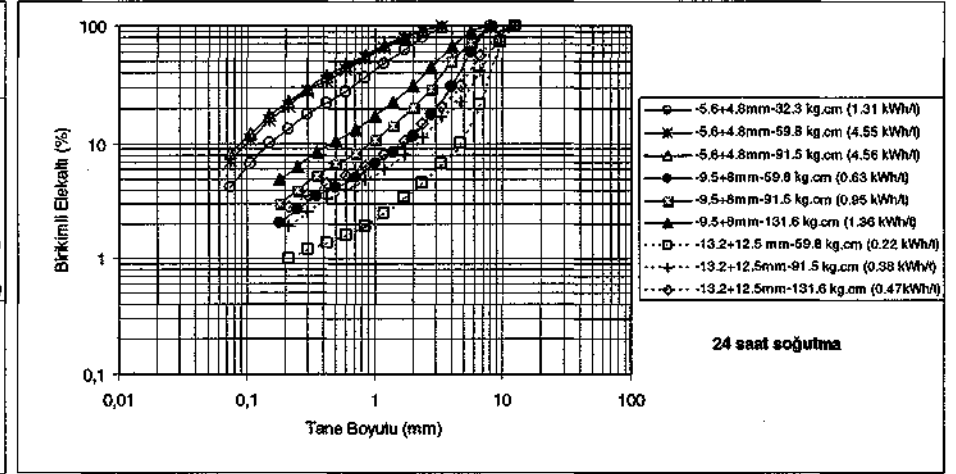
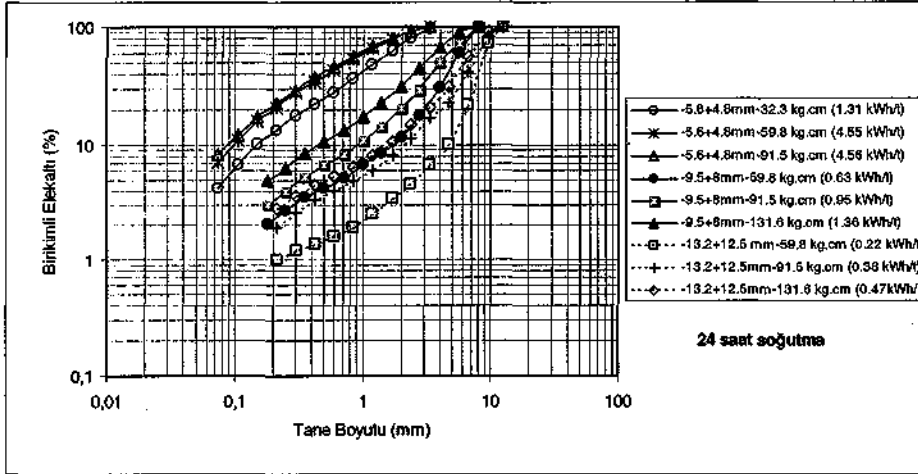
### 3. DENEY SONUÇLARI VE HESAPLAMALAR

İkiz sarkaç testleri sonucu farklı cüruf örnekleri için sonunda boyut fraksiyonlarının farklı enerji seviyelerinden kırılması ile elde edilen tane boyut dağılımları Şekil 3'de sunulmaktadır. Tanenin kırılması için harcanan enerjinin kütlesine oranı olarak tanımlanan özgül kırılma enerjisi 0,2-5 kWh/t aralığında değişmektedir. Şekillerden görülebileceği gibi her boyut fraksiyonu için yükleme enerjisi arttıkça daha ince boyut dağılımı elde edilmektedir.

Tambur testleri sonucunda farklı cüruf örneklerinin boyut dağılımları Şekil 4'te verilmektedir.

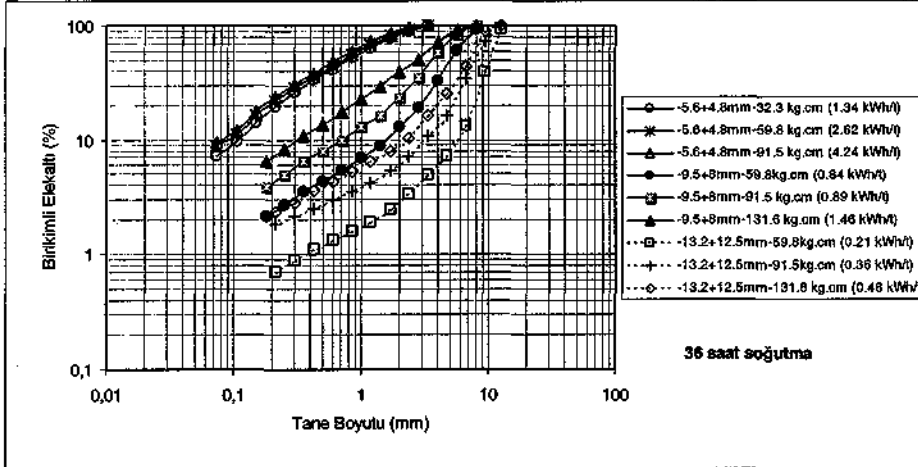
#### 3.1 Darbe Etkisiyle Kırılma İçin Dağılım Fonksiyonunun Belirlenmesi

Kırılma dağılım fonksiyonunun belirlenebilmesi için ikiz sarkaç testleri sonucu tanenin kırılmasına harcanan enerji ve boyut dağılımlarının ilişkilendirilmesi gerekmektedir.

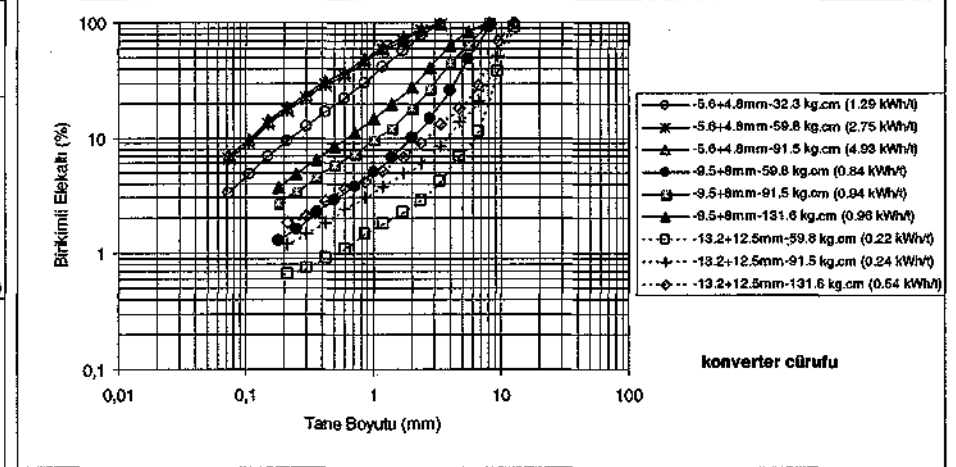


(a) Flaş Fırın Cürufu-Şok Soğutma

(b) Flaş Fırın Cürufu-24 Saat Soğutma

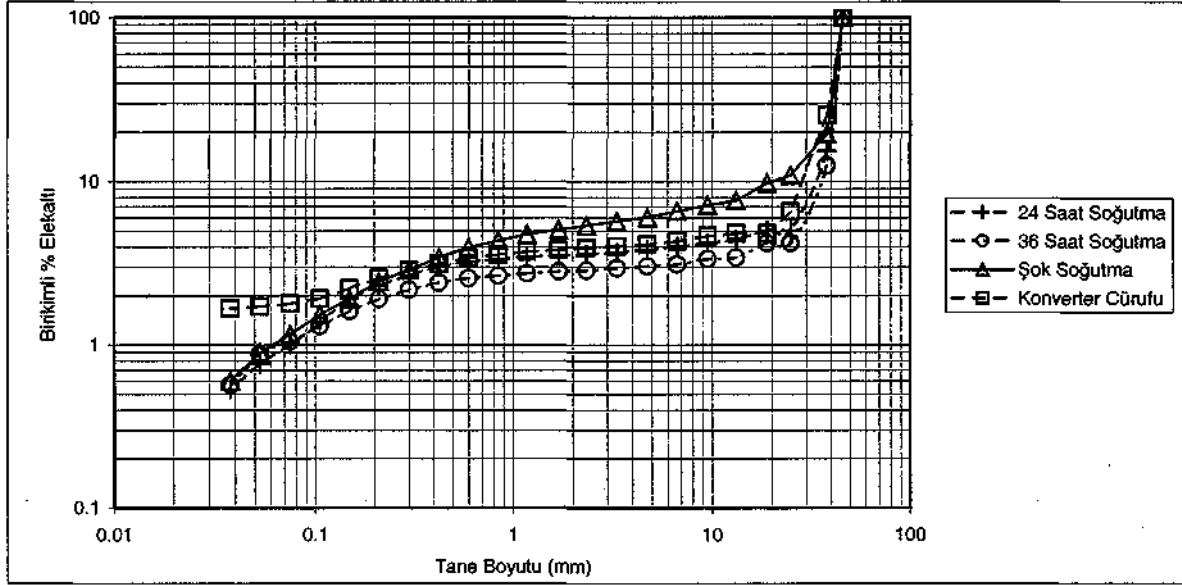


(c) Flaş Fırın Cürufu-36 Saat Soğutma



(d) Konverter Cürufu-36 Saat Soğutma

Şekil 3. İkiz sarkaç testleri sonunda tane boyu dağılımları..



Şekil 4. Aşınma testleri sonunda boyut dağılımları

Kullanılan hesaplama yöntemi, Whiten tarafından geliştirilmiştir (Narayanan ve Whiten, 1988). Yaklaşıkta, herhangi bir boyut fraksiyonunun kırılması sonucu tanenin orijinal boyutunun 1/10'unundan geçen birikimli malzeme yüzdesi  $t_{10}$  parametresi olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, -9,5+8 mm fraksiyonunun geometrik olarak ortalama boyutu 8,72 mm tanelerin orijinal boyutu olarak tanımlandığında, bu fraksiyonun herhangi bir enerji seviyesinden kırılması sonucu üründe 0,872 mm'den ince malzemenin yüzdesi bu fraksiyonun uygulanan enerji düzeyindeki  $t_{10}$  değerini vermektedir. Benzer şekilde,  $t_2$ ,  $t_4$ ,  $t_{25}$ ,  $t_{50}$  ve  $t_{75}$  değerleri belirlenmektedir (Şekil 5). Farklı fraksiyonların farklı enerji seviyelerinden kırılması sonucu elde edilen boyut dağılımlarından bulunan  $t_{10}$  değerlerinin diğer t değerlerine karşılık grafiğe çizilmesi sonucu t eğrisi ailesi (t family curve) elde edilmektedir. Diğer yandan test edilen tüm boyut fraksiyonlarından elde edilen değerler kullanılarak özgül kırılma enerjisi ile  $t_{10}$  arasındaki ilişki Eşitlik (3)'le tanımlanmaktadır.

$$t_{10} = A \cdot (1 - e^{(-E \sim b)}) \quad (3)$$

Burada,

$t_{10}$	$t_{10}$ parametresi (%)
$E$	Özgül kırılma enerjisi (kWh/ton)
A, b	Katsayılar

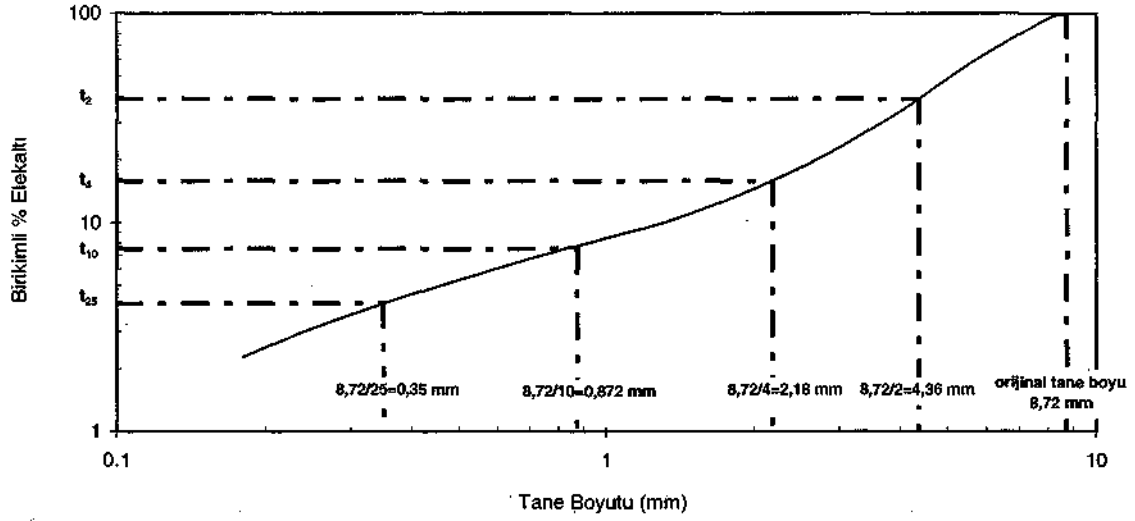
Farklı cüruf örnekleri için elde edilen özgül enerji- $t_{10}$  ilişkileri Şekil 6'da sunulmaktadır. Tüm örnekler için elde edilen t eğrisi ailesi Şekil 7'de sunulmaktadır. Herhangi bir özgül kırılma enerjisi değeri için  $t_{10}$  değeri Eşitlik (3)'ten hesaplanarak t eğrisi ailesinden karşılık gelen diğer t değerleri belirlenebilmektedir. Bu değerler darbe etkisiyle oluşan kırılma dağılımını vermektedir ve tane boyutundan bağımsız olduğu kabul edilmektedir.

### 3.2 Aşınma Etkisiyle Kırılma İçin Dağılım Fonksiyonunun Belirlenmesi

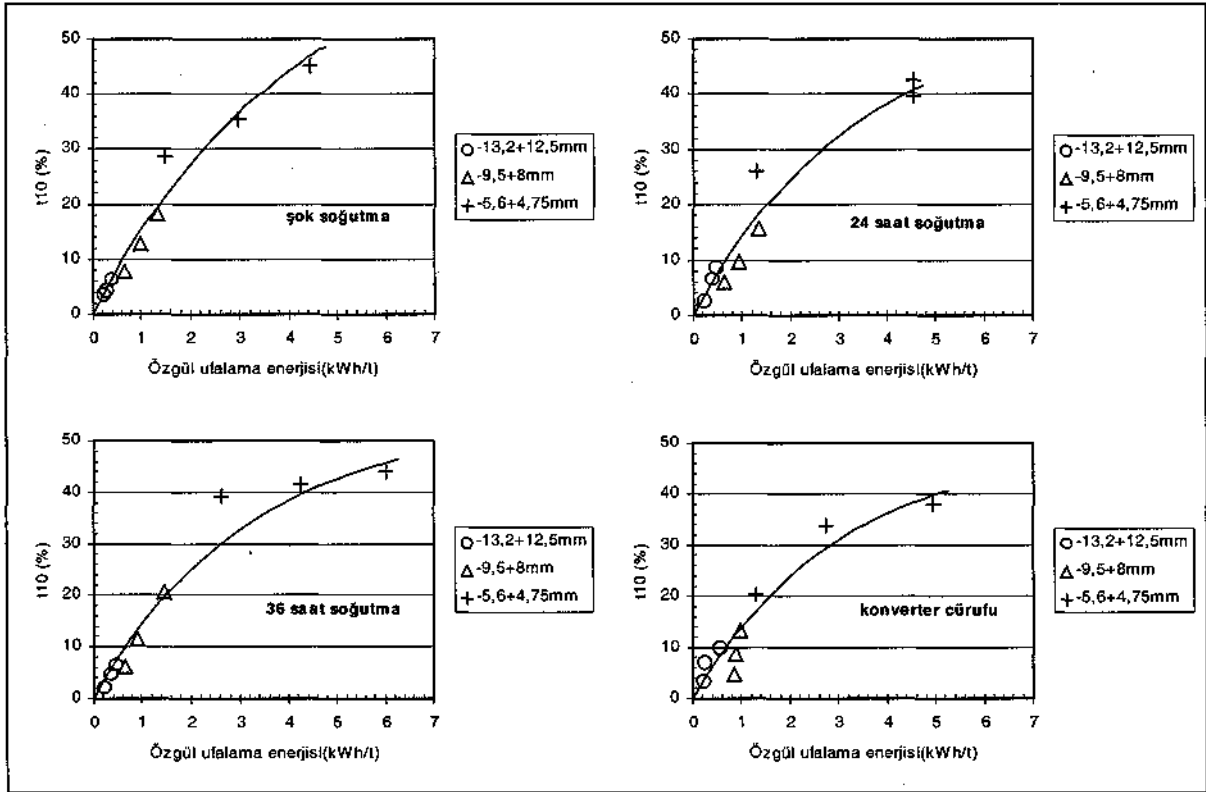
Aşınma sonucu oluşan kırılma dağılımını karakterize etmek için Şekil 4'te verilen tane boyut dağılımlarından  $t_{10}$  değerleri bulunmakta ve  $t_{10}$  değerinin 1/10'u  $t_a$  parametresini vermektedir.

İkiz sarkaç testleri sonunda elde edilen tane boyut dağılımları kullanılarak, Eşitlik (3)'teki A ve b parametreleri doğrusal olmayan optimizasyon tekniği kullanılarak belirlenmiş ve Çizelge 4'de sunulmuştur. Tambur testi sonucu belirlenen  $t_a$  parametreleri de Çizelge 4'de verilmektedir.

Farklı cüruf örnekleri için özgül kırılma enerjisi -  $t_{10}$  ilişkisi Şekil 8'de karşılaştırılmaktadır. Eğriler Çizelge 4'de verilen A değerlerine doğru yakınsamaktadır.

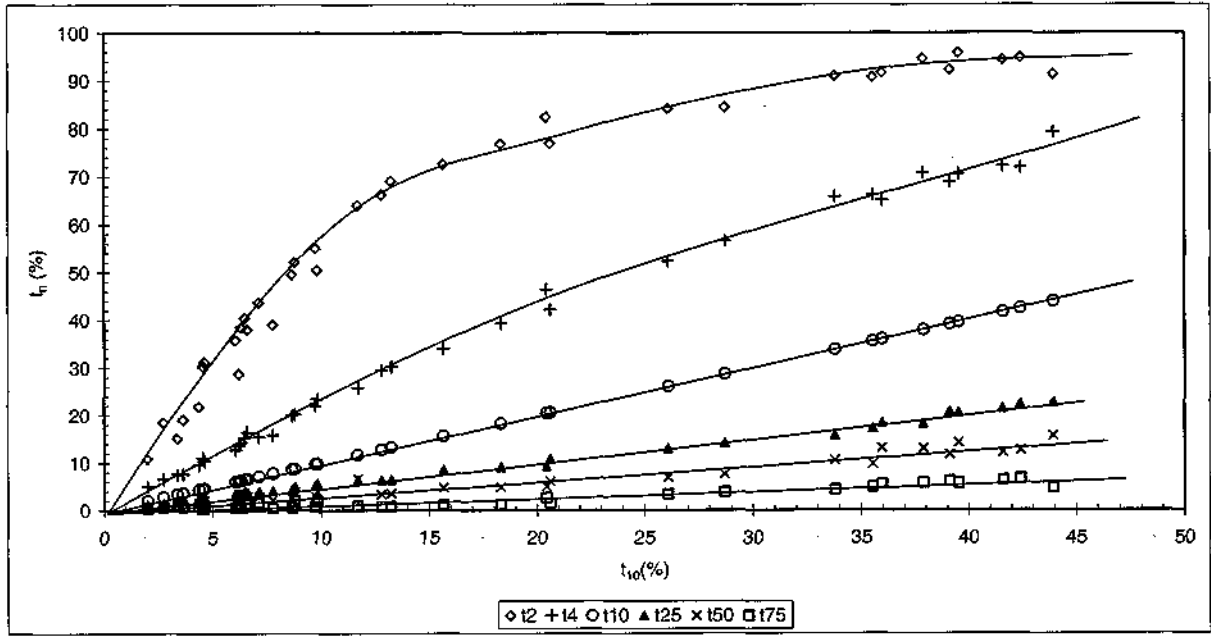


Şekil 5. Boyut dağılımından t parametrelerinin belirlenmesinin örnek gösterimi.

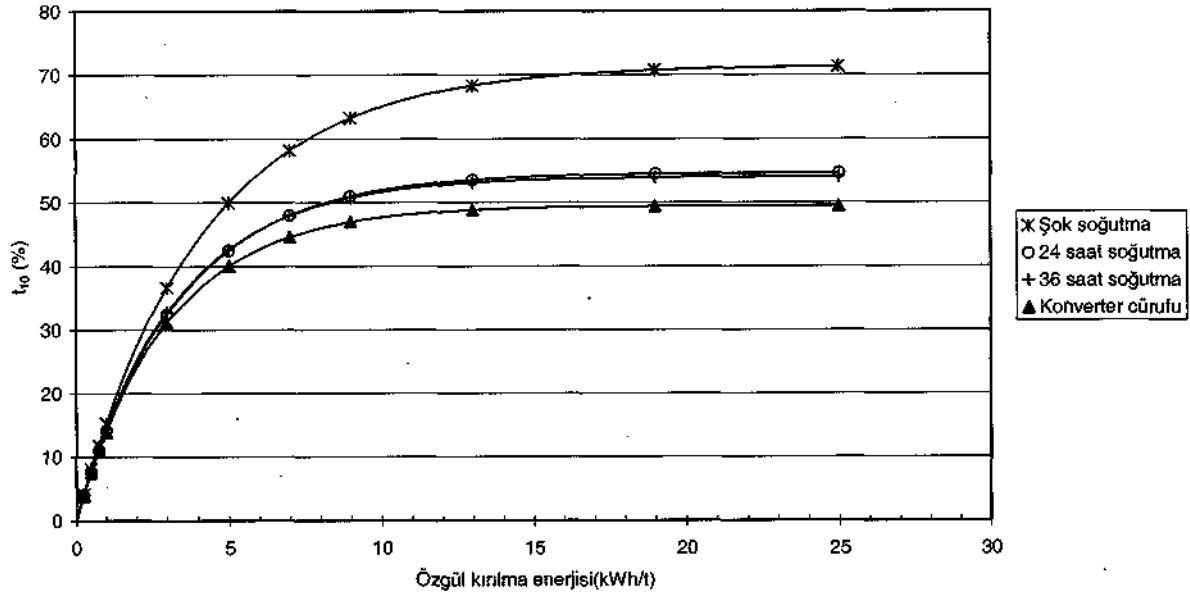


Şekil 6. Farklı cüruf örneklerinin ikiz sarkaç testleriyle belirlenen enerji- $t_{10}$  ilişkileri





Şekil 7. KBİ Samsun izabe cüruflarının darbe ile kırılma için oluşturulan t eğrisi ailesi



Şekil 8. Farklı cüruf örneklerinin özgül kırılma enerjisi -  $t_{10}$  ilişkilerinin karşılaştırılması.

A değeri darbe ile kırılmaya karşı direncin bir göstergesi olmaktadır. Buna göre, şok soğutulan flaş fırını cüruf örneği en kolay kırılırken, konverter cürufu örneği en zor ufalanmaktadır. 24 saat ve 36 saat soğutulan cüruf örneklerinin darbe ile kırılma özelliklerinin ise birbirine yakın değerlerde olduğu bulunmuştur. Aşınma karakteristiklerine bakıldığında ise örnekler kolaydan zora doğru şok soğutma, konverter cürufu, 24 saat soğutma ve 36 saat soğutma şeklinde sıralanmaktadır.

Çizelge 4. Eşitlik 3'teki A ve b Katsayıları ve t<sub>s</sub> Parametreleri

	A	b	t <sub>s</sub>
F1	71,49	0,244	0,593
F2	54,65	0,307	0,380
F3	54,00	0,307	0,300
K	49,49	0,329	0,405

Eşitlik 1'de verilen mükemmel karışım model denkleminde kullanılan kırılma dağılım fonksiyonu, a, darbe ve aşınma sonucu oluşan kırılmanın bir bileşkesi olarak Eşitlik 4 ile tanımlanmaktadır (Napier-Munn vd, 1996).

$$a = \frac{a_0}{a_0 + 10} \quad (4)$$

Burada;

a	:	Birleştirilmiş kırılma dağılım fonksiyonu
a <sub>a</sub>	:	Aşınma ' sonucu kırılma dağılım fonksiyonu
£ <sub>d</sub>	:	Darbe sonucu kırılma' dağılım fonksiyonu

Burada, kırılma dağılım fonksiyonları alt üçgen matrisi biçimindedir.

#### 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Farklı cüruf örneklerinin otojen öğütme karakteristiklerinin birbirinden oldukça farklı olduğu bulunmuştur. Şok soğutulan flaş fırın cürufu örneğinin öğütülebilirliği önemli ölçüde kolaylaşmaktadır. Isıl işlemin ve sonrasında soğutmanın minerallerin öğütülebilirliğine etkisini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Taneye ısıtma sonrası şok soğutma uygulandığında tanenin ufalamaya direncinin önemli ölçüde zayıfladığı bilinmektedir (Brown ve

Gaudin, 1960; Geller ve Tervo, 1975; Kanellopoulos ve Ball, 1975; Tavares ve King, 1995). Bunun için önerilen temel mekanizmalar:

- Tane içinde sıcaklık farklılıkları nedeniyle farklı ısıl genleşme veya büzülme
- Farklı fazların ısıl genleşme farklılıkları
- Faz dönüşümleri nedeniyle hacim değişiklikleri
- Minerallerin değişimleri sonucu gaz çıkışları

Pocock vd (1998) -4+3,35 mm tane fraksiyonu ile çok-hızlı yük hücresi (ultra-fast load cell) düzeneğinde yaptıkları çalışmada, kuvarsitin ısıtıldıktan sonra suyla şok soğutma sonrasında tanenin kırılması için harcanan enerjinin %59 oranında azaldığını göstermişlerdir. Aynı çalışmada, ısıtıldıktan sonra soğumaya bırakılan tanelerin dayanımı ise %18 oranında artmıştır. Benzer durum, kromit cevheri için de gözlenmiştir (Ersayın vd, 1994).

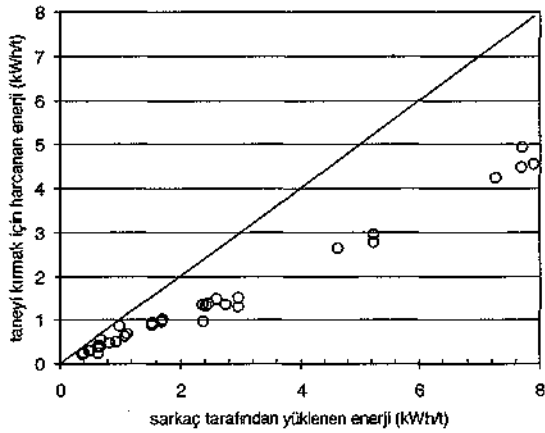
Bu çalışmada, 24 saat ve 36 saat sonunda soğutulan flaş fırın cürufu arasında fark bulunmakla birlikte yakın değerler elde edilmiştir. Bu süre sonunda, cüruf içindeki fazların oluşumunu önemli ölçüde tamamladığı ve soğutma sonunda zayıflamalara neden olacak içsel gerilmelerin azaldığı düşünülmektedir. Konverter cürufunun darbe ile öğütülebilirliği flaş fırını cürufuna oranla daha düşük olmaktadır. Konverter cürufunun kendi kendini aşındırması ise 24 saat ve 36 saat soğutulan flaş fırını cürufuna göre kolay olmaktadır. Bunun yapısal farklılıktan kaynaklanması mümkün görünmektedir.

Darbe ile ufalanabilirliğin tane boyutuna ve şekline bağlı olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konmuş olmasına karşın, bu durumun sistematik bir ilişki vermemesi nedeniyle, tane boyutundan bağımsız olduğu varsayımı yapılmaktadır (Napier-Munn vd, 1996).

Son yıllarda yöntemin geliştirildiği JKMRC'de ikiz sarkaç yönteminin yerini ağırlık düşürme yöntemi almaktadır. Ağırlık düşürme yöntemi daha tekrarlanabilir sonuçlar vermekte ve deneysel olarak daha basit uygulanabilmektedir (Napier-Munn vd, 1996). Bununla birlikte, ikiz sarkaç testlerinde kırılan her bir tane için sarkaç salınımının hesaplanması gerektiğinden yöntem zor ve zaman alıcıdır. Ayrıca, çarpışma düzgün olmadığında deneyin tekrarlanması gerekebilmektedir. İkiz sarkaç yönteminin avantajı ise tanenin kırılması için harcanan enerjinin belirlenmesine olanak sağlamasıdır.

Şekil 9'da ikiz sarkaç testlerinde yükleme enerjisine karşı taneyi kırmak için harcanan

enerji değerleri sunulmaktadır. Beklendiği gibi, taneyi kırmak için harcanan enerji yüklem enerjisinden daha düşük olmaktadır. Ağırlık düşürme yönteminde bütün hesaplamalar yüklem enerjisine göre yapılmaktadır.



Şekil 9. İkiz sarkaç testlerinde yüklem enerjisine karşı taneyi kırmak için harcanan enerji.

Bu durum fiziksel anlam açısından ikiz sarkaç yönteminin bir avantajı olarak belirtilmesine karşın diğer model parametreleri olan kırılma hızı ve boşalma hızı standartlaştırılmış koşullarda belirlenen kırılma dağılım fonksiyonu kullanılarak hesaplandığında duyarlı modeller oluşturulması açısından bir sorun yaratmamaktadır (Napier-Munn vd, 1996).

Diğer yandan, literatürde tek tane kırılması çok uzun yıllardan beri incelenmektedir (Napier-Munn vd, 1996). Eski çalışmaların bir çoğu boyut dağılımını ifade etmek veya enerji ile ilişkilendirmek üzere yapılmıştır. Öğütme performansı ile ilişkilendirmek üzere yapılan çalışmalar da bulunmaktadır (Krough, 1979). Buna karşın boyut küçültme ekipmanının ve çalışma koşullarının etkisini ortaya koyan parametreler tanımlanamadığından uygulamada kullanılamamaktadır. Literatürde, darbe ile kırılma karakteristiklerinin belirlenmesinde en duyarlı deneysel yöntem çok-hızlı yük hücresidir (Weichert ve Herbst, 1986). Otojen değirmen modellemesi için önerilmiş bir yöntemle birleştirilmemiş olmasına karşın, tanenin kırılması sırasında gerçekleşen mikro olayların izlenebilmesine olanak sağlayacak kadar hassas ölçüm olanağı vermektedir (King ve Bourgeois, 1993; Tavares ve King, 1998).

Sonuç olarak, ikiz sarkaç ve tambur testi sonuçlarından belirlenen birleştirilmiş kırılma dağılım fonksiyonu sonuçları kullanılarak farklı

soğutulmuş cüruv örneklerinin öğütme devresinin performansına etkisini belirlemek mümkün görünmektedir.

## 5. SONUÇLAR

Farklı koşullarda soğutulmuş cüruv örneklerinin kırılma karakteristikleri ikiz sarkaç ve tambur testi yöntemleri kullanılarak belirlenebilmektedir.

KBİ Samsun İzabe Tesisi bakır izabe cüruflarının otojen öğütülebilirlikleri soğuma süresi arttıkça zorlaşmaktadır. Bununla birlikte, ani soğutma öğütmeyi büyük ölçüde kolaylaştırırken 24 saat ve 36 saat sonunda soğutma örneklerinin öğütülebilirlikleri arasındaki farkın az olduğu bulunmuştur. Konverter cüruflu darbe ile en zor öğütülen örnek olurken, aşınma ile şok soğutma örneğinden sonra en kolay öğütülen örnek olmuştur.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışma sırasında işbirliği ve yardımlarından ötürü KBİ Samsun İzabe Tesisleri çalışanlarına, aşınma testleri için H.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi Namık Aydoğan'a teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

Austin, L.G., Barahona, C.A. ve Menacho, J.M.; 1986, "Fast and Slow Chipping Fracture and Abrasion in Autogenous Grinding", Powder Technology, 46, (1), 81-87.

Austin, L.G., Barahona, C.A. ve Menacho, J.M.; 1987, "Investigation of Autogenous and Semi-autogenous Grinding in Tumbling Mills", Powder Technology, 51, (1), 283-294.

Austin, L.G., Weymont, N.P. Prsbrey, K.A. ve Hoover, M., 1976; "Preliminary Results on the Modelling of Autogenous Grinding", Proc. of 14<sup>th</sup> APCOM Conf., Penn.State Uni., 207-226.

Brown, J.H. ve Gaudin, A.M., 1960; "Mechanism of Intergranular Comminution by Heating", Trans. AIME, 217,423-428.

Chen, Z., Burkert, A. ve Mular, A.L, 1995; "Simulation of Autogenous Grinding: Mechanisms, Model, and Simulator", Proc.of XIX IMPC, SME, Littleton-Colorado, 1, 287-292.

Digre, M., 1979; "Autogenous Grinding in Relation to Abrasion Conditions and

- Mineralogical Factors", Proc. Auto. Grind. Seminar, Norway, 1, A1.1-A1.20.
- Doğru, T., 2002, "Karadeniz Bakır İşletmeleri Bakır İzabe Cürüflarının Otojen Öğütme Parametrelerinin Belirlenmesi", Yayınlanmamış Doktora Tezi, H.Ü. Maden Müh. Bölümü, 179.
- Ersayın, S., Ergün, Ş.L ve Benzer, H., 1994; "The Effects of Heat Treatment on Grinding and Liberation of Chromite Ores", Progress in Mineral Processing Technology, Eds:Demirel, H., Ersayın, S., A.A. Balkema Publishers, 33-37.
- Gault, G.A., 1975; "Modelling and Control of Autogenous Grinding Circuit", PhD thesis, University of Queensland, Australia.
- Geller, L.B. ve Tervo, R.O., 1975; "Grinding of Preheated Rocks", Trans.IMM, Sect C, C25-C33.
- Kanellopoulos, A. ve Ball, A.. 1975; "The Fracture and Thermal Weakening of Quartzite in Relation to Comminution", J. of the South African IMM, Oct., 45-52.
- King, R.P. ve Bourgeois, F., 1993; "Measurement of Fracture Energy During Single-particle Breakage", Minerals Eng., 6, (4), 353-367.
- Krogh, S.R., 1979; "Determination of Crushing and Grinding Characteristics Based on Testing of Single Particles", Trans. AIME., 266, 1957-1962.
- Leung, K., 1987; "An Energy Based Ore Specific Model for Autogenous and Semi-Autogenous Grinding", PhD Thesis, University of Queensland.
- Lynch, A.J., 1977; "Mineral Crushing and Grinding Circuits: their Simulation, Optimisation, Design and Control. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 340.
- Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D. ve Kojovic T., 1996; "Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation; JKMRC, Brisbane, 413.
- Narayanan, S.S. ve Whiten, W.J., 1988; "Determination of Comminution Characteristics from Single Particle Breakage Tests and Its Application to Ball Mill Scale Up", Trans. IMM, SectC, C115-C124.
- Özbayoğlu, G. ve Akgök, Y.Z., 1995; "Effect of Cooling Rate on the Flotation Behaviour of Copper Slags", Proc. XIX IMPC, SME, Littleton-Colorado, 4, 147-149.
- Pocock, J., Veasey, T.J., Tavares, L.M. ve King, R.P., 1998; "The Effect of Heating and Quenching on Grinding Characteristics of Quartzite", Powder Tech., 95, (2), 137-142.
- Shen, S. ve Forssberg, E., 2003; "An Overview of Recovery of Metals from Slags", Waste Management, 23, 933-949.
- Stanley, G.G., 1974; "Mechanism in the Autogenous Mill and their Mathematical Representation", J. of the South African IMM, Nov., 77-98.
- Tavares, L.M. ve King, R.P., 1995; "Microscale Investigation of Thermally Assisted Comminution", Proc. XIX IMPC, SME, Littleton-Colorado, 1, 203-208.
- Tavares, L.M. ve King, R.P., 1998; "Single-particle Fracture Under Impact Loading" Minerals Eng., 54, (1), 1-28.
- Weichert, R. ve Herbst, J.A., 1986, "An Ultrafast Load Cell Device for Measuring Particle Breakage", 1<sup>st</sup> World Congr. Particle Tech., Nürnberg II, 3, Preprint.
- Weymont, N.P., 1979; "The Analysis and Simulation of Autogenous Grinding Systems", PhD thesis. Pennsylvania State University.
- Whiten, W. J., 1974; "Matrix Theory of Comminution Machines", Chem. Engng. Sci., 29, 589-599.