

## ÇATALAĞZI TERMİK SANTRAL KATI FOSİL YAKITI KIRILMA DAVRANIŞININ KARIŞTIRMALI DEĞİRMEN VE BİLYALI DEĞİRMENDE KARŞILAŞTIRILMASI

Comparison of the Breakage Behaviors' of Catalagzi Thermal Power Plant Solid Fossil Fuel in Stirred Mill and Ball Mill

Geliş (received) 12 Ekim (October) 2009; Kabul (accepted) 25 Kasım (November) 2009

Selçuk SAMANLI (\*)

### ÖZET

Dar tane boyut gruplarında hazırlanmış fosil yakıt, karıştırmalı değirmende 360 dev/dak ve Bond değirmeninde 70 dev/dak ile kuru olarak öğütülmüştür. Karıştırmalı değirmende "Bilya çapı/Değirmene beslenen maksimum tane boyutu" arasında yaklaşık 2,5 gibi oransal yaklaşım olduğunda, kırılma hızı maksimum gerçekleşmiştir. Değirmenlerde, bilyalar arası boşluğun %90'ı malzeme ile doldurulmuştur. Değirmene bağlı kırılma parametre değeri, "a<sub>T</sub>", karıştırmalı değirmende 1,08 ve bilyalı değirmende 0,53'dür. Bu, -212+150 µm ve -425+300 µm dar tane boyut gruplarında karıştırmalı değirmen lehine, yaklaşık 7 ve 5,5 kat hızlı gerçekleşen kırılma davranışının sonucudur. Karıştırmalı değirmende özgül kırılma hızı 425 µm tane boyutunda maksimum iken, bilyalı değirmende bu boyut 2360 µm'dir.

**Anahtar Sözcükler:** Öğütme, Katı fosil yakıt, Karıştırmalı değirmen, Bond değirmen, Kırılma davranışı, Özgül kırılma hızı.

### ABSTRACT

The solid fossil fuel prepared at mono size groups were ground as dry in stirred mill which was run 360 rpm stirring speed and Bond ball mill which was run 70 rpm. In stirred mill, breakage rate reached maximum when the he ratio of "Grinding medium size/Maximum size of the material ground" was approximately 2.5. The sample charged in the mills occupies as much as 90% of the gap volume between the balls in the mills. The parameters "a<sub>T</sub>", an important parameter depending on mill specifications, were found as 1.08 and 0.53 in stirred mill and ball mill respectively. This situation is the result of the specific rate of breakage at mono size groups, -212+150 µm and -425+300 µm, were carried out faster at stirred mill approximately 7 and 5.5 fold more than that at ball mill. Although specific rate of breakage reached its maximum at 425 µm in stirred mill, it was determined as 2360 µm in ball mill.

**Keywords:** Grinding, Solid fossil fuel, Stirred mill, Bond mill, Breakage behaviour, Specific rate of breakage

---

(\*) Yrd. Doç. Dr. Selçuk SAMANLI, Zonguldak Karaelmas Üni. Müh. Fak. Maden Müh. Böl. 67100  
İncivez/Zonguldak, selcuksamanli@karaelmas.edu.tr

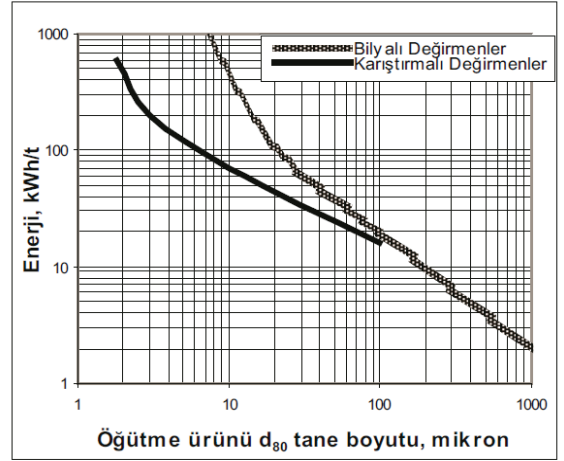
## 1. GİRİŞ

Dünya enerji üretiminde katı fosil yakıt tüketimi artan bir öneme sahiptir. Yüksek rezerve sahip enerji kaynağı olması, kömürle ilgili çalışmaların artmasına neden olmuştur. Kömüre dayalı termik santrallerde yüksek ısı kapasite ve yüksek yanma verimliliği elde etmek için, pülvarize enjeksiyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, mikronize boyutta öğütülen katı fosil yakıt, santraldeki yakma kazanlarına gönderilmektedir.

Tane boyutu küçüldükçe tanelerin kırılmaya karşı olan dirençlerinin artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarları da aşırı bir şekilde artmaktadır. Bu bağlamda; öğütme, enerjinin en yaygın ve en verimsiz olarak kullanıldığı işlem birimidir. Öğütme konusunda yapılan çalışmaların çoğunda enerji-boyut küçültme arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılarak en az enerji ile en uygun boyuta küçültme yapabilmenin olanakları araştırılmaktadır (Bond, 1951; Mankosa vd, 1989; Gao ve Forssberg, 1993, Yang vd, 2006).

Konvansiyonel değirmenlerde, öğütme verimi 75  $\mu\text{m}$  altındaki boyutlarda oldukça azalmakta ve öğütmede harcanan enerjinin önemli bir bölümü faydalı bir iş yapmadan (boyut küçültme) ısı ve ses olarak kaybedilmektedir. Kömür, konvansiyonel değirmenlerde (bilyalı, çubuklu ve diğer) öğütebildiği gibi, son zamanlarda çok ince boyutlarda dahi etkili öğütme yapabilen karıştırmalı değirmenlerde de öğütülebilmektedir. Bilyalı değirmenlerde 10  $\mu\text{m}$  altında öğütme yapmak neredeyse imkânsız iken, karıştırmalı değirmenlerde bu olasıdır. Bunun nedeni, karıştırmalı değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle enerji tüketimlerinin tamburlu değirmenlere kıyasla oldukça düşük kalmasıdır (Kwade, 1999; Wang ve Forssberg, 2000; Jankovic, 2003; Dikmen ve Ergün, 2004; Bilgili vd, 2006; Ding vd, 2007).

Artan enerji tüketimiyle birlikte bilyalı değirmenlerde elde edilen tane boyutu  $>10 \mu\text{m}$  iken, karıştırmalı değirmenlerde  $<10 \mu\text{m}$  ürün boyutuna ulaşılabilmektedir. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketimi değişimi Jankovic (2003) tarafından aşağıda sunulan Şekil 1' de grafiksel olarak oldukça açık ifade edilmiştir.



Şekil 1. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketimi değişimi (Celep ve Alp'den (2008) alıntı yapılmıştır).

Bununla birlikte, kullanılan karıştırmalı değirmenlerin büyük ölçekte yapılması, ortam aşınmasının fazla olması ve işlem sırasında bilyaların çıkış ızgarasını tıkaması gibi problemlerin çözümü veya öğütme yardımcılarının etkisi de gelecekte yapılacak araştırma konularının temelinde yer alacaktır (Celep ve Alp, 2008).

Karıştırmalı değirmenlerde aşındırma ve kesme kuvvetleri etkilidir. Özellikle ince tanelerin öğütülmesinde kesme kuvvetinin diğer kuvvetlere göre daha etkili olduğu bilinmektedir. Küçük tanelerin ufalanmasında basınç ve burulma kuvvetleri gereklidir. Çarpma ve aşınma kuvvetlerinin baskın olduğu bilyalı değirmenlerde öğütme iri boyutta kalmaktadır. Bilyalı değirmenlerin ekonomik öğütme sınırları 100  $\mu\text{m}$ 'ye kadardır. Bu sınırların altına inildiğinde bilyalı değirmenlerin özgül enerjilerinin üstel olarak artış gösterdiği belirtilmiştir (Liddell, 1986; Jankovic, 2003; Fuerstenau vd, 2004; Makokha vd, 2006).

Karıştırmalı değirmenler, mikronize malzeme üretiminde çok etkili öğütücülerdir. Diğer ince öğütme yapan cihazlara göre kolay işletim, basit konstrüksiyon, yüksek boyut küçültme oranı, malzemenin öğütme ortamı tarafından az kirlenmesi ve düşük enerji sarfıyatı yönünden son yıllarda oldukça büyük önem kazanmıştır ve dar tane boyut grubunda ürün istenen endüstri alanlarında tercih edilmektedir (Miranda ve Yaeger, 1998; Wang ve Forssberg, 2000; Sinnott vd, 2006). Birçok üstünlüklerinden ötürü mineral,

seramik, metalürji, elektronik, boya, kimya, gıda, hayvan besini, biyoteknoloji, lastik, ziraat, ilaç, fotoğraf, kömür ve enerji endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mankosa vd, 1986; Fadhel ve Frances, 2001; Kwade ve Schwedes 2002).

Karıştırmalı değirmen, sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir eksenini üzerinde dönen bir rotordan oluşmaktadır. Rotor üzerine belirli aralıklarla yerleştirilmiş çubuk veya diskler yardımıyla silindiri dolduran ortam hareket ettirilerek öğütme yapılmaktadır. Öğütme ortamı, genelde seramik, çelik, bazen de cam, alüminyum gibi uygulama alanına bağlı değişik malzemelerden imal edilen bilyalardır (Bilgili vd, 2006; Ding vd, 2007). Bilyalar değirmen hacminin %70–80'ini doldurmaktadır (Tuzun vd, 1995; Blecher ve Schwedes, 1996; Karbstein vd, 1996). Öğütücü ortam olarak birkaç yüz mikrondan birkaç milimetreye kadar değişebilen bilyalar kullanılmaktadır. Ortam boyutları uygulamaya göre 0,2 ile 8 mm arasında değişebilir. Beslenen cevherin verimli öğütülebilmesi için 100 µm'den ince olması gerekir. Ürün boyutu, bilya boyutu azaldıkça ve/veya karıştırma hızı arttıkça orantılı olarak ekonomik ve verimli bir şekilde mikronize boyuta inmektedir. Karıştırıcı disk sayısının ve değirmen hacminin artışı, öğütmeye verilen gücün artışı ve bilya sarfiyatının azalmasıyla sonuçlanmaktadır (Young ve Gao, 2000).

Karıştırmalı değirmendeki bilyaların, bilyalı değirmenlerdeki ortamın hareketi ve kendi ağırlığı ile kazandığı kinetik güce erişebilmesi için hızının yeterli ölçüde artırılması gerekmektedir. Karıştırma ünitesi diskli, pinli ve halkalı olmak üzere üç tipden oluşur. Bu değirmenler yatay veya dikey olarak kullanılabilirler gibi, yaş veya kuru olarak farklı cevherlerin öğütülmesinde kullanılmaktadır (Tuzun vd, 1995; Kwade, 1999; Jankovic ve Sinclair, 2006; Sinnott vd, 2006; Ding vd, 2007).

Karmaşıklaşan cevher yapısının ince boyutta serbestleşme gerektirmesinden ötürü çok ince öğütme kaçınılmaz hale gelmiştir. Klasik bilyalı değirmenler ile bu boyutta serbestleşme mümkün olamayacağı için yüksek kapasiteli karıştırmalı değirmenlerin imalatı zorunlu hale gelmiştir. Bazı eski tesislerdeki öğütme sistemlerinin yenileştirilmesinde, önceki bilyalı değirmenlere ek olarak tekrar öğütme devrelerinde karıştırmalı değirmenlere de yer verilmektedir (Tuzun vd, 1995).

Endüstriyel kullanımı yaygınlaşmaya başlayan karıştırmalı değirmenlerden 6 µm ( $d_{50}$ ) ürün boyutunda 20 t/s kapasiteye varanları mevcuttur (Mankosa vd, 1986). Bu değirmende yapılan öğütmede özgül enerji sarfiyatı da bilyalı değirmenlere oranla %60 daha az olabilmektedir. Tane boyutu 15 µm altına yapılacak öğütmelerde diğer yöntemlere oranla daha ekonomik işlemleri mümkün kılmaktadır (Orumwense ve Forssberg, 1992). Günümüzde, yatay karıştırmalı değirmen "Isa mill", %70-80 öğütücü bilya doluluk oranı ile, %40-50 pülp katı oranında, 180-240 lt/dk pülp çalışma debisinde, 1120 kW güçle yüksek kapasiteyle çalıştırılmaktadır (Yaung ve Gao, 2000).

Diğer taraftan; günümüzde kullanılmakta olan bilyalı (kamaralı tip) değirmenlerde boy/çap oranı genellikle 2,5'ten büyüktür. Tüp değirmen olarak da adlandırılan ve birinci kamarada iri, ikinci kamarada daha ince bilyaların kullanıldığı bu tip değirmenler, kuru öğütme yaparlar. Acık devre, kapalı devre ve yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerle birlikte kullanıldığı devrelerde uygulama alanı bulmaktadırlar (Erdem vd, 2007). Birim ağırlık için bilya yüzey alanı çubuklardan daha fazla olduğu için bilyalı değirmen ince öğütme için daha uygundur. Bunların uzunluk/çap oranı 1–1,5 ile sınırlıdır. Bilyalı değirmenler, öğütme tamburu ve öğütme gövdelerinin (bilyalar veya miller) dönüşü yoluyla malzemeyi öğütür. Bilyalı değirmenlerde, bilyalara ufalama etkisini sağlayacak kinetik enerji kazandırmak daha kolaydır. Çünkü ortam boyutu oldukça iridir. Bilyalı değirmenlerde kullanılan bilya ebadı 50-20 mm arasındadır. Şarj miktarı değirmen iç hacminin %40–50'si kadardır. Değirmene verilmesi gereken enerji, şarj miktarı ile artar. Değirmen hacminin %50'si kadar şarj verilirse harcanması gereken enerji maksimum olur. Optimum değirmen hızı da şarj hacmi ile artar.

## 2. KIRILMA DAVRANIŞININ TANIMLANMASI

Kinetik modelde ufalama birim işlemi bir hız süreci olarak ele alınmıştır. Bu modeli ilk olarak ileri süren Roberts (1950)'dir. Roberts birim kütle başına değirmenin çektiği güç ile elek üstündeki malzemenin değişim hızı arasındaki ilişkiyi incelemiş ve yaş öğütme teorisi olasılığını önermiştir. Daha sonra Bowdish (1960) Roberts'ın çalışmasını geliştirmiş ve bir bilyalı değirmendeki iri malzemenin kırılma hızının,

değirmende bulunan iri malzeme konsantrasyonu ile orantılı olduğunu göstermiştir. Yani, bir bilyalı değirmendeki belirli bir boyuttaki parçaların öğütülmesi “birinci derece hız süreci” olarak kabul edilir (Lynch vd, 1986; Fuerstenau vd, 2004).

## 2.1. Kırılma Davranışının Kinetik Modelde Tanımı

Doğrusal birleştirilmiş parametre modelinde değirmen, iri tane boyutunda malzemenin kırılarak, ince tane boyutunda ürünün oluştuğu bir reaktör olarak düşünülmektedir. Bu durumda değirmene belli bir boyutta veya bir boyut aralığında beslenen malzemeyi de reaktant olarak tanımlamak mümkündür. Beslemenin boyut dağılımı grafiksel olarak ifade edilebilir. Bu yöntemde, birikimli % ağırlık miktarının elek boyutuna karşı logaritmik ölçekli gösterimiyle birinci derece kırılma hızı elde edilir. Gaudin Schuhmann eğrisi olarak isimlendirilen grafiksel tanımlama yönteminde özellikle boyutlar daha iyi tanımlanır. Belirli tane boyu dağılımına sahip besleme malzemesinde her tane boyu aralığındaki malzemenin kırılma hızları birbirinden farklı olmaktadır (Klimpel ve Austin, 1970; Austin vd, 1984; Fuerstenau vd, 2004).

Değirmende etkin bir şekilde kırılma olduğu zaman belirli bir tane boyu aralığında olan malzemenin kırılması genellikle birinci derece öğütme kuramına uymaktadır. Birinci derece ifadesi, reaksiyonun yavaşlamadan devam etmesi anlamını taşır. Reaksiyonun yavaşlaması durumunda, ikinci ve üçüncü derece reaksiyon hızları oluşur. Öğütme işleminde birinci derece öğütme hipotezini daha iyi anlayabilmek için, için W miktarda numune konulmuş basit bir değirmen dikkate alınır. Buradaki malzemenin boyut dağılımı  $\sqrt{2}$  veya  $\sqrt[4]{2}$  geometrik elek serilerinden 1, 2, 3...j, ...i, ... boyut aralıklarında tanımlandığı düşünülmektedir. Bu besleme malzemesi bir seri artan zaman aralıklarında öğütüldüğünde, bunların öğütülme hızları genellikle birinci derece öğütme kinetiğine uyacaktır. Buna göre; i, tane boyu aralığının “kırılma hızı =  $S_1 w_1 W$ ” olacaktır.

Burada  $S_1$ , i tane boyu aralığındaki malzemenin birim kütlelerinin birim zamanda kırılma hızı;  $w_1$ , i tane boyu aralığındaki malzeme fraksiyonu ve W ise değirmende öğütülen malzemenin toplam ağırlığıdır. Eğer başlangıç beslemesinin

tamamı 1. boyut aralığı ile tanımlanan üst boyut aralığında yani en iri boyut fraksiyonunda ise; kırılmayla 1. boyut aralığının kaybolma hızı  $w_1(t)$  W ile orantılı olacaktır. Toplam kütle, W, sabit olduğundan aşağıdaki Eşitlik 1 elde edilir;

$$\frac{dw_1(t)}{dt} = -S_1 w_1(t) \dots\dots\dots(1)$$

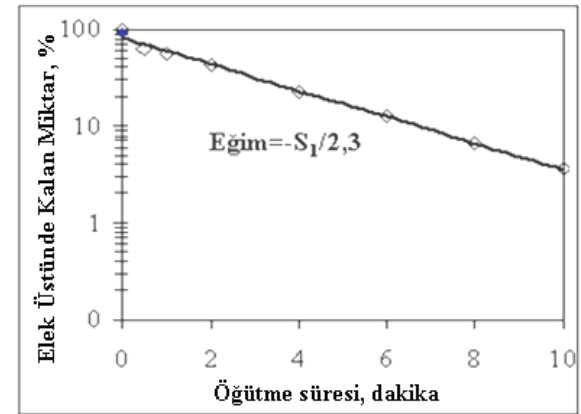
Burada,  $S_1$  özgül kırılma hızı olarak adlandırılır ve bu değer oransal olarak sabit ise ve zamanla değişmiyorsa, aşağıdaki Eşitlik 2 ile ifade edilir.

$$w_1(t) = w_1(0) \exp(-S_1 t) \dots\dots\dots(2)$$

Sonuçta; Eşitlik 3 ile verilen ve birinci derece öğütme kinetiği olarak ifade edilen formül elde edilir.

$$\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_1 t / 2,3 \dots\dots\dots(3)$$

Burada,  $w_1(0)$  ve  $w_1(t)$  öğütmenin başlangıcındaki ve “t” anındaki 1. boyut aralığında bulunan malzemenin yüzdesini,  $S_1$  1. boyut aralığındaki malzemenin kırılma hızını ve t ise zamanı göstermektedir. Birinci derece kırılma davranışı Şekil 2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2. Birinci derece kırılma davranışı.

## 2.2. Kırılma Hızının Tane Boyu ile Değişimi

Tek bir çaptan oluşan bilyaların öğütücü ortam olarak kullanılmasıyla, özgül kırılma hızı ile tane boyu arasındaki ilişki, aşağıda Eşitlik 4 ile ifade edilebilir;

$$S_i = a_T \left[ \frac{x_i}{x_n} \right]^\alpha, x_i \ll d \dots\dots\dots(4)$$



Çizelge 1. Fosil Yakıt Kısa Analiz Sonuçları.

Numune	Kül (%)	Uçucu Madde (%)	Kükürt (%)	Ü. Isıl Değer (Kkal/kg)
Fosil yakıt	47,58	17,20	0,50	3825

Ayrıca; piknometre ile yapılan yoğunluk belirleme testleri sonucunda, ÇATES numunesinin 1,8 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip olduğu belirlenmiştir.

### 3.1. Öğütme Deneyleri

Bu çalışmada, konik kırıcıda kontrollü olarak 3,35 mm altına kırılmış olan katı fosil yakıtından hazırlanan dartane boyut aralıklarında, laboratuvar ölçekli dikey pinli karıştırmalı değirmen ve Bond bilyalı değirmende kuru olarak öğütme deneyleri yapılmıştır.

Öğütme deneylerinde kullanılmak üzere ÇATES numunesi, Russell elek kullanılarak -3350+2360 µm, -2360+1700 µm, -1180+850 µm, -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında hazırlanmıştır.

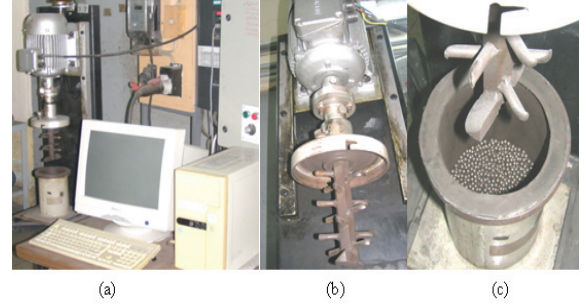
Deneyisel çalışmalarda; değişen parametreler altında, söz konusu dar tane boyut gruplarındaki katı fosil yakıtın kırılma davranışı incelenmiş, karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende öğütme kinetiği açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca; ÇATES numunesinin öğütülebilirliği iki kategoride yapılan deneyler sonucunda değerlendirilmiştir. Birincisi, Bond bilyalı değirmeninde yapılan deneyler sonucunda belirlenen "Bond iş indeksi"dir. İkincisi ise, Hardgrove cihazı ile yapılan deneyler sonucunda belirlenen "Hardgrove indeksi"dir.

#### 3.1.1. Laboratuvar Ölçekli Karıştırmalı Değirmen ile Yapılan Kesikli Öğütme Deneyleri

Karıştırmalı değirmen; gövde, AC motor, inverter, güç sayacı ve bilgisayar donanımı olmak üzere beş ana ekipmandan oluşmaktadır. Değirmen 2,2 kW'lık güce sahip maksimum devri 1500 dev/dak olan bir motorla karıştırılmaktadır. Farklı karıştırma hızlarında deney yapabilmek için Siemens Midi Master 1500 model sürücü (frekans inverteri) motora bağlanmıştır. Karıştırma hızını ve deney süresini hassas ayarlayabilmek için PC bağlantısı yapılmıştır.

Ayrıca sisteme bağlı elektrik sayacından çekilen enerji de ölçülebilmektedir.

Aşağıda Şekil 3'de laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmen bütün ekipmanları: (a), karıştırıcı mil ve pinler (b), gövde ve öğütücü bilyalar (c) görülmektedir.

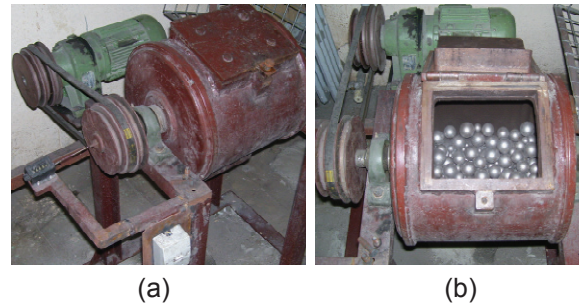


Şekil 3. Bu çalışmada kullanılan laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmen.

Karıştırmalı değirmen gövde hacmi 2945 cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Değirmen karıştırıcı mili ve silindirik karıştırıcı pinlerin hacmi çıkarıldığında kalan etkin değirmen hacminin yaklaşık % 40'ı öğütücü ortam ile doldurulmuştur. Kullanılan numune ağırlığı ise, bilyalar arası boşluğun %90'ını dolduracak oranda belirlenmiştir.

#### 3.1.2. Laboratuvar Ölçekli Bilyalı Değirmen ile Yapılan Kesikli Öğütme Deneyleri

Öğütülebilirlik deneyleri aşağıda Şekil 4'de görülen Bond bilyalı değirmende yapılmıştır. Bilyalı değirmende öğütme deneylerinde kullanılan malzeme ağırlığı, Austin vd.'ne göre (1984) hesaplanmış olup, yaklaşık 1650 gr olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Bu çalışmada kullanılan laboratuvar ölçekli Bond bilyalı değirmen; (a) Gövde-motor-kayış kasnak, (b) Öğütücü bilyalar.

Bilyalı değirmene ait karakteristik özellikler ve öğütücü ortam özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Bond Bilyalı Değirmen ve Öğütücü Ortam Karakteristik Özellikleri.

Değirmen	Çap x Uzunluk, (cm)	30,5 x 30,5
	Hacim, (cm <sup>3</sup> )	22272,5
	Dönüş hızı, (dev/dak)	70
Öğütücü Ortam	Bilya çapı, (mm) - Adedi	36,83 – 43
		29,72 – 67
		25,40 – 10
		19,05 – 71
		12,70 – 94
Yoğunluğu, (gr/cm <sup>3</sup> )	Toplam ağırlığı, (gr)	7,79
		20125
		Bilya doldurma oranı

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

##### 4.1. Karıştırmalı Değirmende Kırılma Davranışının Belirlenmesi

-3350+2360 µm, -2360+1700 µm, -1180+850 µm, -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında hazırlanan ÇATES numunesi, laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmende değişen sürelerde öğütülerek, kırılma davranışları incelenmiştir. Karıştırmalı değirmen öğütme deneylerine, karıştırma hızı (dev/dak) ve en uygun bilya boyutu’nun (mm) belirlenmesine yönelik yapılan deneyler ile başlanmıştır.

Deneylerde kırılma davranışı incelenirken, her bir öğütme periyodu sonunda en üst tane boyutu eleğinin üstünde kalan miktar sırasıyla %80, %50, %10 ve %5 oranlarında olacak şekilde seçilmeye çalışılmıştır. Söz konusu bu oranlar, daha önce de değişik araştırmacılar (Klimpel ve Austin, 1970; Austin vd, 1984; Ozkan ve Yekeler 2003; Fuerstenau vd, 2004; Deniz, 2004; Yue ve Klein, 2005; İpek vd, 2005; Bilgili vd, 2006) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, kırılma davranışı hızını belirlemede kullanılmıştır.

##### 4.1.1. Karıştırma Hızının Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Karıştırma hızının değişimi, motor gücü değiştirilerek sağlanmıştır. 1440 dev/dak, 720 dev/dak ve 360 dev/dak olmak üzere 3 farklı karıştırma hızında çalışılmıştır. Karıştırmalı değirmende, %100 motor gücüne karşılık gelen

karıştırma dönüş hızı 1440 dev/dak olarak gerçekleştirilmektedir. Karıştırmalı değirmen karıştırma hızının belirlenmesi için 5 sn, 10 sn ve 15 sn olmak üzere 3 farklı öğütme süresinde çalışılmış, her öğütme süresi sonunda alınan ürünlerin boyut dağılımları belirlenmiştir. Karıştırmalı değirmende aşağıda belirtilen deney koşullarında öğütme çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Samanlı, 2008):

Kullanılan malzeme boyutu: -2360+1700 µm  
1700 µm elek üstü miktarı: % 91,51  
Malzeme miktarı: 472 gr  
Karıştırma hızı : 1440, 720, 360 dev/dak  
Öğütücü ortam çapı: 6 mm  
Öğütücü ortam miktarı: 5594 gr  
Öğütme süreleri: 5, 10, 15 sn

Öğütme sonuçları aşağıda Çizelge 3-5’de sunulmuştur;

Çizelge 3. 1440 dev/dak Karıştırma Hızında Yapılan Deneylerin Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	10 sn	15 sn
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	84,19	91,52	93,24
-1180+850	66,33	77,84	82,63
-850+600	55,78	70,80	77,48
-600+425	49,02	66,21	74,43
-425	42,31	61,78	71,44

Çizelge 4. 720 dev/dak Karıştırma Hızında Yapılan Deneylerin Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	10 sn	15 sn
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	57,17	67,10	76,62
-1180+850	33,95	43,33	53,41
-850+600	24,51	32,88	42,16
-600+425	19,18	26,78	35,51
-425	14,74	21,76	29,43

Çizelge 5. 360 dev/dak Karıştırma Hızında Yapılan Deneylerin Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	10 sn	15 sn
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	28,35	37,99	45,44
-1180+850	12,18	18,79	23,86
-850+600	8,37	13,26	17,08
-600+425	6,55	10,55	13,56
-425	5,19	8,31	10,44

15 sn öğütme sonunda; 1440 dev/dak, 720 dev/dak ve 360 dev/dak karıştırma hızlarında sırasıyla; 18,42 kW/t, 6,84 kW/t ve 2,63 kW/t enerji çekildiği hesaplanmıştır. Kırılma davranışı belirlemede istenen elek üstü oranları, karıştırma hızı 360 dev/dak'da elde edilmiştir.

#### 4.1.2. Öğütücü Ortam Boyutunun Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Karıştırma hızı 360 dev/dak sabit olmak üzere, 1700 µm elek üstü miktarı % 91,51 olan -2360+1700 µm dar tane boyut grubunda, yapılan öğütmelerde, öğütücü ortam olarak 6 mm, 4 mm ve 2,36 mm çaplı bilyalar kullanılmıştır. Ayrıca her üç boyuttan ağırlıkça 1/3 oranında karıştırarak hazırlanan bilya karışımı ile öğütme deneyleri yapılarak, öğütücü ortam boyutunun kırılma davranışına etkileri araştırılmıştır (Samanlı, 2008).

6 mm boyutlu bilya ile aşağıda verilen deneysel koşullarda öğütme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 6 ile sunulmuştur:

Malzeme miktarı: 472 gr  
Öğütücü ortam miktarı: 5594 gr  
Öğütme süreleri: 5, 15 sn, 1, 5, 12 dak.

Çizelge 6. 6 mm Bilya ile Öğütme Deney Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	15 sn	1 dak	5 dak	12 dak
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	28,35	45,44	65,47	80,25	88,98
-1180+850	12,18	23,86	43,41	64,92	77,99
-850+600	8,37	17,08	34,68	59,98	74,77
-600+425	6,55	13,56	30,02	58,03	73,90
-425	5,19	10,44	26,00	56,99	73,50

4 mm boyutlu bilya ile aşağıda verilen deneysel koşullarda öğütme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 7 ile sunulmuştur:

Malzeme miktarı: 480 gr  
Öğütücü ortam miktarı: 5693 gr  
Öğütme süreleri: 5, 15 sn, 5, 8 dak.

Çizelge 7. 4 mm Bilya ile Öğütme Deney Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	15 sn	5 dak	8 dak
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	25,42	37,92	74,06	79,34
-1180+850	8,60	16,62	50,48	55,91
-850+600	6,46	12,47	42,52	48,08
-600+425	5,25	10,19	38,10	44,23
-425	4,25	8,39	35,33	42,09

2.36 mm boyutlu bilya ile aşağıda verilen deneysel koşullarda öğütme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 8 ile sunulmuştur:

Malzeme miktarı: 485 gr  
Öğütücü ortam miktarı: 5752 gr  
Öğütme süreleri: 15 sn, 1, 8 dak.



Çizelge 8. 2,36 mm Bilya ile Öğütme Deney Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	15 sn	1 dak	8 dak
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	22,31	33,22	55,11
-1180+850	6,68	13,03	32,39
-850+600	5,22	9,67	24,91
-600+425	4,47	7,94	19,98
-425	3,81	6,23	15,63

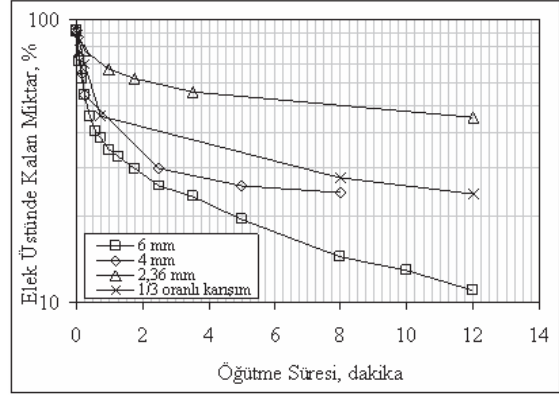
2.36-4-6 mm boyutlu bilyaların ağırlıkça 1/3 oranında karışımları ile aşağıda verilen deneysel koşullarda öğütme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 9'da sunulmuştur:

Malzeme miktarı: 479 gr  
 Öğütücü ortam miktarı: 5680 gr  
 Öğütme süreleri: 15 sn, 8, 12 dak.

Çizelge 9. 2,36-4-6 mm Bilya Karışımı ile Öğütme Deney Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	15 sn	8 dak	12 dak
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	30,46	72,44	75,67
-1180+850	12,27	50,75	55,73
-850+600	8,67	39,69	45,79
-600+425	6,75	32,31	39,10
-425	5,27	26,06	35,27

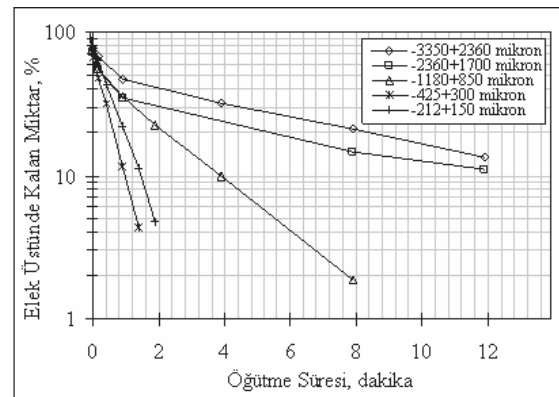
ÇATES numunesinin kırılma davranışlarının incelenmesi sonucunda; 6 mm boyutlu bilya ile yapılan karıştırmalı değirmen deneylerinde öğütmenin 4 mm, 2,36 mm ve bunların 1/3 ağırlıksal oranlı bilya karışımlarından daha hızlı gerçekleştiği sonucuna varılmış ve sonuçlar aşağıda Şekil 5'de sunulmuştur (Samanlı, 2008).



Şekil 5. Farklı boyutlu bilyalar ile yapılan öğütme deneylerinde kırılma davranışları.

#### 4.1.3. Tane Boyutunun Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

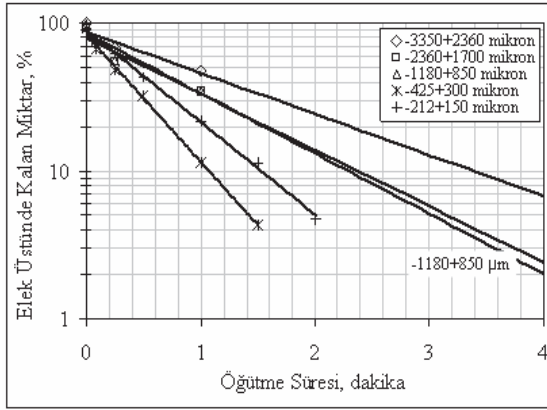
Dar tane boyut gruplarında (-212+150  $\mu\text{m}$ , -425+300  $\mu\text{m}$ , -1180+850  $\mu\text{m}$ , -2360+1700  $\mu\text{m}$  ve -3350+2360  $\mu\text{m}$ ) hazırlanmış malzemeler karıştırmalı değirmende, 360 dev/dak karıştırma hızı ve 6 mm bilya boyutu ile değişen sürelerde öğütülmüştür. Öğütme süresi sonunda üst tane boyu aralığında kalan malzeme fraksiyonlarının öğütme sürelerine karşı yarı logaritmik grafikleri çizilmiştir. Grafiğin doğrusal olarak azaldığı bölge birinci derece kırılma bölgesini temsil etmektedir ve bu doğrunun eğiminden de malzemenin o tane boyu aralığındaki özgül kırılma hızı ( $S_1$ ) belirlenmiştir. Sonuçta; söz konusu boyut gruplarında, tane boyutunun kırılma davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Karıştırmalı değirmende dar tane boyut gruplarında kırılma davranışı.

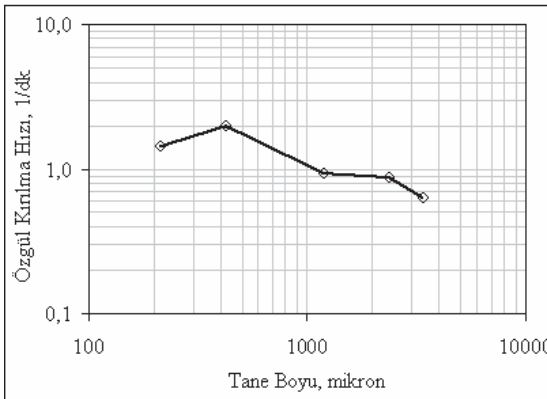
Karıştırmalı değirmende birinci derece kırılma davranışı  $-425+300 \mu\text{m}$  ve  $-212+150 \mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında gerçekleşmiştir.  $-1180+850 \mu\text{m}$  dar tane boyut grubunda kısmen doğrusal hareket söz konusu iken,  $-3350+2360 \mu\text{m}$  ile  $-2360+1700 \mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında doğrusal kırılma davranışından uzaklaşmıştır.

Şekil 6'da görülen bütün dar tane boyut grupları için kırılma davranışının doğrusallıktan uzaklaştığı kısımlar göz ardı edilir ve her bir dar tane boyut grubu için birinci derece kırılma davranışının var olduğu süreler dikkate alınır; elde edilen birinci derece kırılma davranışları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Karıştırmalı değirmende birinci derece kırılma davranışı.

Doğruların eğimlerinden özgül kırılma hızları hesaplanmış ve aşağıda Şekil 8'de verilmiştir.

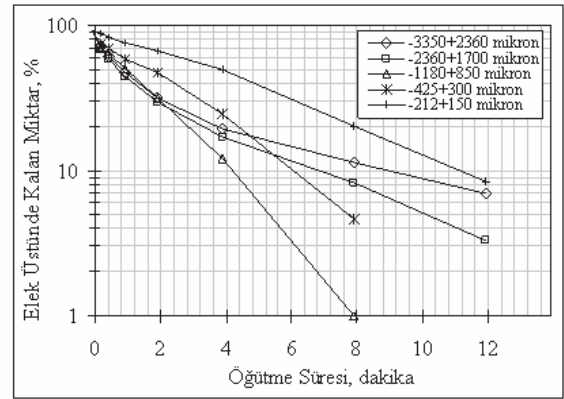


Şekil 8. Karıştırmalı değirmende kırılma hızlarının tane boyutu ile değişimi.

Özgül kırılma hızı  $425 \mu\text{m}$  tane boyutunda maksimuma ulaşmıştır. Grafikten  $a_T=1,08$  ve  $\alpha=0,51$  olarak hesaplanmıştır (Samanlı, 2008).

#### 4.2. Bond Bilyalı Değirmende Kırılma Davranışının Belirlenmesi

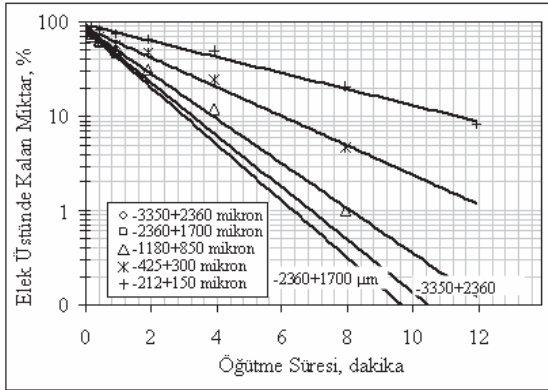
Dar tane boyut gruplarında ( $-212+150 \mu\text{m}$ ,  $-425+300 \mu\text{m}$ ,  $-1180+850 \mu\text{m}$ ,  $-2360+1700 \mu\text{m}$  ve  $-3350+2360 \mu\text{m}$ ) hazırlanmış olan malzemeler değişen sürelerde öğütülmüştür. Kırılma davranışları aşağıda Şekil 9'da tüm dar tane boyut grupları için birlikte sunulmuştur.



Şekil 9. Bilyalı değirmende dar tane boyut gruplarında kırılma davranışı.

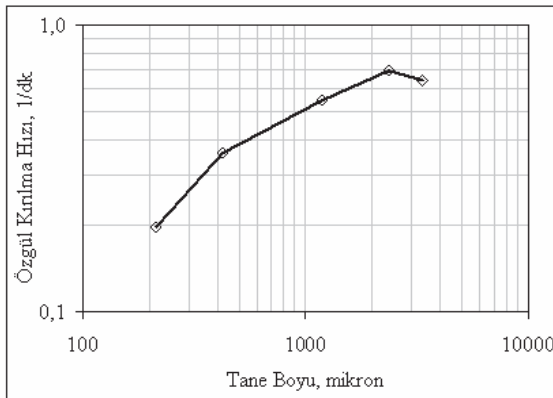
Bilyalı değirmende öğütmede birinci derece kırılma davranışı  $-1180+850 \mu\text{m}$ ,  $-425+300 \mu\text{m}$  ve  $-212+150 \mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında gerçekleşmiştir.  $-3350+2360 \mu\text{m}$  ve  $-2360+1700 \mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında doğrusal kırılma davranışından kısmen uzaklaşmıştır.

Şekil 9'da görülen bütün dar tane boyut grupları için kırılma davranışının doğrusallıktan uzaklaştığı kısımlar göz ardı edilmiş ve her bir dar tane boyut grubu için birinci derece kırılma davranışının var olduğu süreler dikkate alınmıştır. Elde edilen birinci derece doğrusal formdaki kırılma davranışları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Bilyalı değirmende birinci derece kırılma davranışı.

Doğruların eğimlerinden özgül kırılma hızları hesaplanmıştır. Hesaplanan özgül kırılma hızlarının, elek aralıklarının üst değerlerine göre logaritmik olarak grafikleri çizilerek Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Bilyalı değirmende kırılma hızlarının tane boyutu ile değişimi.

Özgül kırılma hızı 2360  $\mu\text{m}$  tane boyutunda maksimuma ulaşmış, sonrasında azalmaya başlamıştır. Doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle ölçülen ile hesaplanan değerler arasındaki farkları en aza indirecek şekilde ÇATES numunesi için bilyalı değirmende  $a_T$ ,  $\alpha$ ,  $\mu$  ve  $\Lambda$  parametreleri belirlenmiştir. Sonuçta; bilyalı değirmende özgül kırılma hızı model parametre değerleri  $a_T=0,53$ ,  $\alpha=0,57$ ,  $\mu=3,97$  ve  $\Lambda=2,62$  olarak bulunmuştur (Samanlı, 2008).

## 5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende gerçekleşen özgül kırılma hızları Çizelge 10'da birlikte sunulmuştur.

Çizelge 10. Özgül Kırılma Hızlarının Karşılaştırılması.

Dar Tane Boyut Grubu (mikron)	Karıştırmalı Değ. Kırılma Hızı, $S_i$	Bilyalı Değ. Kırılma Hızı, $S_i$
-3350+2360	0,6382	0,6416
-2360+1700	0,8728	0,6943
-1180+850	0,9359	0,5484
-425+300	1,9757	0,3586
-212+150	1,4385	0,1966

Karıştırmalı değirmende özgül kırılma hızı 425  $\mu\text{m}$  tane boyutunda maksimuma ulaşırken, bilyalı değirmende özgül kırılma hızı 2360  $\mu\text{m}$  tane boyutunda maksimum yapmış sonrasında azalmaya başlamıştır. Öğütme deneyleri sonunda elde edilen kırılma hızı parametre değerleri, karıştırmalı değirmende;  $a_T=1,08$  ve  $\alpha=0,51$  olarak hesaplanırken, bilyalı değirmende;  $a_T=0,53$  ve  $\alpha=0,57$  olarak hesaplanmıştır. Değirmene bağlı bir parametre olarak tanımlanan  $a_T$  değerinin büyük olması karıştırmalı değirmende bilyalı değirmene kıyasla daha hızlı öğütmenin, başka bir deyişle daha ince öğütme ürünü eldesinin bir sonucudur.

Literatürde farklı malzemeler için çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda karıştırmalı değirmenlerde öğütme işlemlerinde, doğrusal olmayan öğütme kinetiği geliştiği belirtilmiştir (Mankosa vd, 1986; Orumwense, 1992; Gao ve Forssberg, 1993; Tüzün vd, 1995; Cho vd, 1996; Karbstein vd, 1996; Zhenhua vd, 1998; Bilgili vd, 2006; Bilgili 2007). Başka bir deyişle, kırılma hızı öğütme süresi arttıkça yavaşlama göstermektedir. Karıştırmalı değirmende ÇATES numunesi ile yapılan öğütme deneylerinde karşılaşılan bu sapmanın, bilyalı değirmende de gerçekleşmesi, malzeme özelliğinin kırılma davranış hızının yavaşlamasında etkisi olabileceğini beklentisini ortaya çıkarmıştır. ÇATES numunesinde,

homojen olmayan yapısı gereği daha kolay kırılmaya uğrayan düşük küllü kısmın (kömür özellikli) artan öğütme süresine paralel olarak ince boyuta geçtiği ve oluşan ince ürünün de gerek öğütücü ortam ve gerekse de iri tanelerin üzerini kaplayarak öğütme hızında yavaşlamaya neden olduğu düşünülmüştür. Bu savı desteklemek amacı ile karıştırmalı değirmende çalışılan beş dar tane boyut grubunda 30 sn öğütme yapılmış ve alınan öğütme ürünleri, üst elek boyutunda elenmiş, elek üstü ve elek altı olmak üzere sınıflandırılmıştır. Söz konusu elek altı ve elek üstü ürünlerin kül değerlerine bakılmış ve sonuçlar Çizelge 11’de verilmiştir.

Çizelge 11. Karıştırmalı Değirmende 30 sn Öğütme Sonuçları.

Boyut Grubu (mikron)	EÜ Ağ. %	EÜ Kül %	EA Kül %	Hes. Bes. M. Kül %	Öç. Bes. M. Kül %
-3350+2360	57,89	80,08	51,47	68,03	68,62
-2360+1700	52,52	72,87	48,25	61,18	61,59
-1180+850	47,70	67,81	40,42	53,48	53,89
-425+300	31,58	51,29	32,88	38,69	39,45
-212+150	50,11	43,33	32,11	37,73	36,85

Çizelge 11 incelendiğinde, beş dar tane boyut grubunda kırılarak elek altına geçen kısımlara ait kül değerleri elek üstünde kalanlardan daha düşük bulunmuştur. Yani, ÇATES numunesinde mevcut homojen olmayan yapı içindeki düşük küllü (kömür özellikli) kısım yüksek küllü (şist özellikli) kısma göre daha hızlı kırılmaya uğramıştır. Sonuçta; gelişen öğütme süresine paralel olarak, elek üstünde kalan kısım daha zor öğütülebilir özellikli olan şistlerden ibaret olmakta, kırılma davranışı yavaşlamakta ve doğrusal kırılma davranışından sapma ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca; ÇATES numunesinin Bond bilyalı değirmende yapılan deneyler sonucunda Bond iş indeksi 16,93 kWs/t ve Hardgrove cihazı ile yapılan deneyler sonucunda da Hardgrove indeksi (HGI) 77,45 olarak belirlenmiştir (Samanlı, 2008).

## 6. SONUÇLAR

Değirmene bağlı kırılma parametre değeri olarak tanımlanan  $a_T$ , karıştırmalı değirmende 1,08 ve bilyalı değirmende 0,53 olarak hesaplanmıştır. Karıştırmalı değirmene ait  $a_T$  değerinin daha yüksek çıkması -212+150  $\mu\text{m}$  ve -425+300  $\mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında, karıştırmalı değirmen lehine yaklaşık olarak sırasıyla 7 ve 5,5 kat hızlı gerçekleşen kırılma davranışının, başka bir deyişle daha ince öğütme ürünü eldesinin bir sonucudur.

Laboratuar ölçekli karıştırmalı değirmende, “Bilya çapı/Değirmene beslenen maksimum tane boyutu” arasında yaklaşık 2,5 gibi oransal yaklaşım olduğunda kırılma hızının optimal değere ulaşabileceği belirlenmiştir.

ÇATES numunesinde, homojen olmayan yapısı gereği, kırılma davranışında gerçekleşen doğrusallıktan sapma, literatürde belirtilen malzeme özelliğinin kırılma davranış hızının yavaşlamasında etkisi olabileceği savını desteklemektedir.

## TEŞEKKÜR

Yazar, katkıları için Yrd. Doç. Dr. Dilek Çuhadaroğlu, Doç. Dr. Sait Kızıgüt, Prof. Dr. İhsan Toroğlu/ Zonguldak Karaelmas Üni. Maden Müh. Böl., Prof. Dr. Levent Ergün/Hacettepe Üni. Maden Müh. Böl., Doç. Dr. Halil İpek, Prof. Dr. Yaşar Uçbaş/Osmangazi Üni. Maden Müh. Böl. ve karıştırmalı değirmen deney setinin kurulmasını sağlayan Dr. C. Cengiz Pilevneli’ye teşekkürü bir borç bilir.

## KAYNAKLAR

Austin, L. G., 1971; “A review introduction to the mathematical description of grinding as a rate process”, Powder Technology, **5**, 1-17.

Austin, L. G. ve Bahatia V. K., 1971; “Experimental methods for grinding studies in laboratory mills”, Powder Technology, **5**, 261-266.

Austin, L. G., Shoji K., Bahatia V. K., Jindal V., Savage K. ve Klimpel R. R., 1976; “Some results on the description of the size reduction as a rate process in various mill”, Ind. Eng. Chem. Process Des. Devel, **15**, 187-196.

- Austin, L. G., Shoji K. ve Bell D., 1982; "Rate equations for non-linear breakage in mills due to material effects", *Powder Technology*, **31**, 127-133.
- Austin, L. G., Klimpel R. R. ve Luckie P. T., 1984; "The process engineering of size reduction: ball milling", *SME-AIME*, New York, 561.
- Bilgili E., 2007; "On the consequences of non-first-order breakage kinetics in comminution processes: absence of self-similar size spectra", *Particle&Particle Systems Characterization*, **24**, 12-17.
- Bilgili E., Hamey R. ve Scarlett B., 2006; "Nano-milling of pigment agglomerates using a wet stirred media mill: Elucidation of the kinetics and breakage mechanism" *Chemical Engineering Science*, **61**, 149-157.
- Blecher L. ve Schwedes J., 1996; "Energy distribution and particle trajectories in a grinding chamber of a stirred ball mill", *International Journal of Mineral Processing*, **44**, 617-627.
- Bond F. C., 1951; "Third theory of comminution", *Trans. AIME*, **193**, 484-494.
- Bowdish F. K., 1960; "Theoretical and experimental studies of kinetics of grinding in a ball mill", *Trans. SME/AIME*, **217**, 194-202.
- Celep O. ve Alp İ., 2008; "Karıştırmalı değirmenler ile ince öğütmenin refrakter altın cevherlerine uygulanabilirliğinin incelenmesi", *Madencilik*, **47(3)**, 15-26.
- Cho H., Waters M. A. ve Hogg R., 1996; "Investigation of the grind limit in stirred media milling", *International Journal of Mineral Processing*, **45**, 607-615.
- Deniz V., 2004; "Relationship between bond's grindability and breakage parameters of grinding kinetic on limestone", *Powder Technology*, **139**, 208-213.
- Dikmen S. ve Ergün Ş. L., 2004; "Karıştırmalı bilyalı değirmenler", *Madencilik*, **43(4)**, 3-15.
- Ding Z., Yin Z., Liu L. ve Chen Q., 2007; "Effect of grinding parameters on the rheology of pyrite-haptane slurry in a laboratory stirred media mill", *Minerals Engineering*, **20**, 701-709.
- Erdem A. S., Ergün Ş. L. ve Benzer H., 2007; "Modelleme ve simulasyon yardımıyla çimento öğütme devresi tasarımı ve kamaralı bilyalı değirmen seçimi", *Madencilik*, **46(4)**, 21-30.
- Fadhel H. ve Frances C., 2001; "Wet batch grinding of alumina in a stirred bead mill", *Powder Technology*, **119**, 257-268.
- Fuerstenau D. W., De A. ve Kapur P. C., 2004; "Linear and nonlinear particle breakage process in comminution systems", *International Journal of Mineral Processing*, **74**, 317-327.
- Gao M. W. ve Forssberg E., 1993; "A study on the effect of parameters in stirred ball milling", *International Journal of Mineral Processing*, **37**, 45-59.
- İpek H., Üçbaş Y., Yekeler M. ve Hoşten C., 2005; "Dry grinding kinetics of binary mixtures of ceramic raw materials by bond milling", *Ceramic International*, **31(8)**, 1065-1071.
- Jankovic A., 2003; "Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills" *Minerals Engineering*, **16**, 337-345.
- Jankovic A. ve Sinclair S., 2006; "The shape of product size distributions in stirred mills", *Minerals Engineering*, **19**, 1528-1536.
- Karbstein H., Müler F. ve Polke R., 1996; "Scale-up for grinding in stirred ball mills", *Aufbereitungs-Technick*, **37(10)**, 469-479.
- Klimpel R. R. ve Austin L. G., 1970; "Determination of selection for breakage functions in the batch grinding equation by nonlinear optimization", *Ind. Eng. Chem. Fundam*, **9(2)**, 230-237.
- Kwade A (1999) *Wet comminution in stirred media mills-research and its practical application*. *Powder Technology*, 105: 14-20.
- Kwade A. ve Schwedes J., 2002; "Breaking characteristics of different materials and their effect on stress intensity and stress number in stirred media mills", *Powder Technology*, **122**, 109-121.
- Liddell K. S., 1986; "Machines for fine milling to improve the recovery of gold from calcines and pyrite, *Proceeding of the international conference*

on gold”, Extractive Metallurgy of Gold, **2**, 405-417.

Lynch A. J., Whiten W. J. ve Narayanan S. S., 1986; “Ball mill models: Their evaluation and present status. Advances in Mineral Processing”, SME/AIME Pub., Littleton, C O, 48-66.

Makokha A. B. ve Moys M. H., 2006; “Towards optimising ball-milling capacity: effect of lifter design”, Minerals Engineering, **19**, 1439-1445.

Mankosa M. J., Adel G. T. ve Yoon R. H., 1986; “Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal”, Powder Technology, **49**, 75-82.

Mankosa M. J., Adel G. T. ve Yoon R. H., 1989; “Effect of operating parameters in stirred ball mill grinding of coal”, Powder Technology, **59**, 255-260.

Miranda S. ve Yaeger S., 1998; “Homing on the best size reduction method”, Chemical Engineering, **105**, 102-110.

Orumwense O. A. ve Forssberg E., 1992; “Super-fine and ultra-fine grinding - a literature survey”, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, **11(1)**, 107-127.

Özkan A. ve Yekeler M., 2003; “Fine dry grinding of zeolite in a laboratory ball mill”, Particle&Particle Systems Characterization, **20**, 276-282.

Prasher C. L., 1987; “Crushing and Grinding Process Handbook”, John Wiley&Sons Ltd., GB, 474.

Roberts E. J., 1950; “The probability theory of wet ball milling and it’s applications”, Trans. SME/AIME, **187**, 267-272.

Samanlı S., 2008; “Zonguldak-Çatalağzı Termik Santralı Katı Fosil Yakıtı Öğütme Kinetiğinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, 177.

Sinnott M., Clearly P. W. ve Morrison R., 2006; “Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 1- media motion, energy consumption and collisional environment”, Minerals Engineering, **19**, 1537-1550.

Sönmez B., 1992; “Gümüş Cevherinin Kırılma Parametrelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Öğütme Devresinin Benzetimi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 112.

Teke E., Yekeler M., Ulusoy U. ve Canbazoğlu M., 2002; “Kinetics of dry grinding of industrial minerals: calcite and barite”, International Journal of Mineral Processing, **67**, 29-42.

Tuzun M. A., Loveday B. K. ve Hinde A. L. 1995; “Effect of pin tip velocity, ball density and ball size on grinding kinetics in a stirred ball mill”, International Journal of Mineral Processing, **43**, 179-191.

Wang Y. ve Forssberg E., 2000; “Product size distribution in stirred media mills”, Minerals Engineering, **13**, 459-465.

Yang R. Y., Jayasundara C. T., Yu A. B. ve Curry D., 2006; “DEM Simulation of the flow of grinding media in Isa mill”, Minerals Engineering, **19**, 984-994.

Yerlikaya A., 1994; “Bilyalı Değirmenlerde Bilya Dağılımının Matematiksel Model Yardımıyla Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 88.

Young M. F. ve Gao M., 2000; “Performace of the Isa Mills in the George Fisher flowsheet”, Proceedings of AusIMM Seventh Mill Operators’ Conference, Australia, 75-81.

Yue J. ve Klein B., 2005; “Particle breakage kinetics in horizontal stirred mills”, Minerals Engineering, **18**, 325-331.

Zhenhua M., Sian H., Shaoming Z. ve Xinzhang P., 1998; “Breakage behavior of quartz in a laboratory stirred ball mill”, Powder Technology, **100(1)**, 69-73.