

## KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE KOKAKSU BOKSİTİNİN ÖĞÜTÜLMESİNDE BAZI ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN ÖĞÜTME VERİMİNE ETKİSİ VE BOND DEĞİRMENİ İLE ÖĞÜTME VERİMLİLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

The Effect of Certain Operating Parameters on the Grinding Efficiency in Grinding the Kokaksu Bauxite in a Stirred Mill and Comparison of the Grinding Efficiency With that of the Bond Mill  
Geliş (received) 28 Nisan (April) 2008; Kabul (accepted) 15 Aralık (December) 2008

Hasan HACİFAZLIOĞLU (\*)  
Selçuk SAMANLI (\*\*)  
İhsan TOROĞLU (\*\*\*)

### ÖZET

Bu çalışmada, -3,35 mm'nin altına kırılmış olan Kokaksu (Zonguldak) boksitinin karıştırmalı bir değirmende öğütülebilirliği araştırılmıştır. Karıştırmalı değirmende çalışma parametrelerinden; bilya boyutu, karıştırma süresi ve karıştırma hızının ürün inceliği üzerinde önemli etkiye sahip olduğu ve bu parametrelerin enerji tüketimi ile doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Birim zamanda yapılan öğütme sonucunda, bilya boyutunun büyütülmesi ile hem daha ince boyutlu ürün elde edilmiş hem de enerji tüketimi artmıştır. Test edilen farklı çaptaki bilyalardan, besleme boyutu için optimum bilya boyutunun 6,5 mm olduğu saptanmıştır. Diğer taraftan, karıştırma süresi ve karıştırma hızının artırılmasıyla hem daha ince ürün elde edilmiş hem de enerji tüketimi artmıştır. Sonuç olarak, karıştırmalı değirmende ince ürün eldesinin daha çok birim zamanda tüketilen enerji ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Son aşamada, klasik Bond değirmeninde boksit örneği öğütülmüş ve öğütme verimlilikleri karıştırmalı değirmenle karşılaştırılmıştır. İnce boyuttaki tanelerin (<140 µm) öğütülmesinde karıştırmalı değirmenin, iri boyuttaki tanelerin (>140 µm) öğütülmesinde ise Bond değirmeninin enerji tüketimi açısından daha avantajlı olduğu saptanmıştır. Ancak, her iki boyut grubunda da öğütme süresi bakımından karıştırmalı değirmenin daha avantajlı olduğu görülmüştür. Karıştırmalı değirmenle, birkaç dakikada birkaç mikronluk ürünler elde edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Karıştırmalı Bilyalı Değirmen, Bond Değirmeni, Boksit, İnce Öğütme, HGI

### ABSTRACT

This paper presents grindability of the Kokaksu (Zonguldak) bauxite crushed below -3.35 mm in a stirred mill. It was established that the operating parameters of the stirred mill such as the ball size, stirring time and the stirring speed have a considerable effect on the fineness of the product and these parameters are directly related to energy consumption. For grinding in a unit time, increasing the ball size yielded finer products and also increased the energy consumption. It was determined from the balls of various diameters tested that the optimal ball size for the feeding size was 6.5 mm. On the other hand, an increase in stirring time and stirring speed both yielded finer products and increased the energy consumption. To conclude, the yield of finer products by means of the stirred mill was established to be directly related to the energy consumed per unit time. In the last stage, the bauxite sample was ground in a conventional Bond mill and the grinding efficiency was compared with that of the stirred mill. It was established that the stirred mill is more advantageous in grinding fine particles (<140 µm), whereas the Bond mill is more advantageous in grinding coarse particles (>140 µm) in terms of energy consumption. However, for both size groups, the stirred mill was established to be advantageous in terms of grinding time. The stirred mill yielded products of a few micrometers in a few minutes.

**Keywords:** Stirred Ball Mill, Bond Mill, Bauxite, Fine Grinding, HGI

(\*) Maden Yük. Müh., hhacifazlioglu@yahoo.com

(\*\*) Ar.Gör.Dr., Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak

(\*\*\*) Prof. Dr., Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 67100 Zonguldak

## 1. GİRİŞ

Madencilik sektöründe, mekanizasyonun ve ince öğütmeye olan ihtiyacın artmasıyla birlikte konvansiyonel tambur değirmenlerin yerini karıştırılmalı bilyalı değirmenlere almaya başlamıştır. Ayrıca, plastik, seramik, çimento, metalurji, boya ve gıda gibi diğer sektörlerde de ince ürüne olan talebin artması karıştırılmalı değirmenlerin önemini daha da artırmaktadır. Günümüzde, ocaktan çıkarılan pek çok metalik cevherin zenginleştirilebilmesi için öncelikle bu cevherlerin serbestleşme boyutuna kadar öğütülmesi gerekmektedir. Öyle ki bazı cevher tiplerinde bu boyut birkaç mikrona kadar inebilmektedir. Ayrıca, ultra temiz kömür üretmek ve bazı endüstriyel hammaddeleri zenginleştirebilmek amacıyla çok ince boyutlara kadar öğütme yapmak gerekir. Örneğin, feldispattan renk verici minerallerin giderilebilmesi için -100 µm, kömürden süper temiz kömür üretimi için -20 µm seviyelerine kadar öğütülme yapmak gerekir (Mankosa vd., 1986 Bayraktar vd., 1999; Demir vd., 2001; Abd-El-Rahiem, 2003).

Endüstriyel tesislerde öğütme, enerjinin en yaygın ve en verimsiz olarak kullanıldığı işlemidir. Özellikle, tane boyutu küçüldükçe tanelerin kırılmaya karşı olan dirençlerinin artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarları da aşırı bir şekilde artmaktadır. Öğütme konusunda yapılan çalışmaların bir çoğunda enerji-boyut küçültme arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece, en az enerji ile en fazla boyut küçültmenin yolları araştırılmıştır (Bond, 1951; Mankosa vd., 1989; Zheng vd., 1996; Gao and Forsberg, 1993; Dikmen ve Ergün, 2004). Bilindiği gibi, konvansiyonel tambur değirmenlerde harcanan enerjinin bir kısmı doğrudan boyut küçültmede kullanılmakta, önemli bir bölümü ise ısı ve ses olarak kaybedilmektedir. Ayrıca, 75 µm'nin altındaki öğütmelerde tambur değirmenlerin verimi çok azalmakta (enerji tüketimi aşırı artmakta) ve öğütme ekonomik olmaktan çıkmaktadır (Jankovic, 2003). Oysa, günümüzde karıştırılmalı değirmenlerin kullanılmasıyla 10 µm'nin altında bile ekonomik öğütmeler yapmak mümkün olmaktadır. Bunun arkasında yatan temel neden, karıştırılmalı değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle, enerji tüketiminin tamburlu değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmasıdır (Kwade, 1996; Dikmen ve Ergün, 2004; Sinnott vd., 2006; Celep ve Alp,

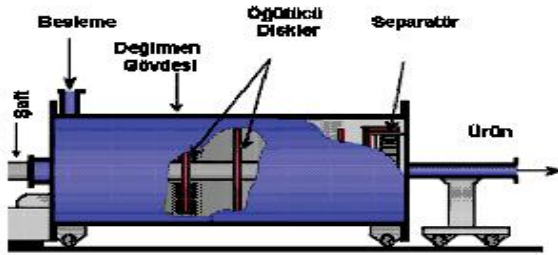
2008). Bir endüstriyel uygulamada, 20 ton/saat kapasiteli bir karıştırılmalı değirmen ile 6 µm'ye yapılan öğütme sonucunda harcanan enerjinin konvansiyonel değirmenlere göre %60 daha az olduğu kaydedilmiştir (Mankosa vd., 1986).

Bilyalı değirmenlerde kullanılan en küçük bilya boyutu 25 mm olmasından dolayı, değirmen içindeki çarpma hareketlerinden öğütülen cevhere aktarılacak enerji, ince boyutlarda kırma için yeterli olmamaktadır. Küçük tanelerin ufanmasında basınç ve burulma kuvvetleri gereklidir. Çarpma ve aşınma kuvvetlerinin baskın olduğu bilyalı değirmenlerde öğütme iri boyutta kalmaktadır. Bilyalı değirmenlerin ekonomik öğütme sınırları 100 µm' ye kadardır. Bu sınırların altına inildiğinde bilyalı değirmenlerin spesifik enerjileri üstel olarak artış gösterir (Liddell, 1986). Besleme boyutu 0,5 mm altında olduğunda, karıştırılmalı değirmenlerin bilyalı değirmenlerden daha ekonomik olmaya başladığı ve tüp değirmenlere oranla karıştırılmalı değirmenlerle orta dereceli öğütmelerde ( $d_{80} \geq 5$  mm ürün inceliğinde) %25-50 enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmektedir. Ayrıca; az yerleşim alanı, yüksek kapasiteleri (50 ton/saat), düşük yatırım maliyetleri, düşük gürültü seviyesi (1 m' de <85 dB) gibi avantajlarının da olduğu belirtilmektedir (Anon, 2002). Çubuklu ve bilyalı değirmenlerde tambur hareket ettirilirken, karıştırılmalı değirmenlerde yalnızca bir karıştırıcı yardımı ile ortam hareket ettirilmektedir. Temel tasarımı 1920'li yıllara kadar uzanan karıştırılmalı değirmenler, ilk kez 1960'lı yıllarda kaolinin öğütülmesi için kullanılmıştır (Kwade, 1999; Conway-Baker vd., 1999). Karıştırılmalı değirmen, temelde sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir ekseninde dönen bir rotordan oluşmaktadır. Öğütücü ortam olarak birkaç yüz mikrondan birkaç milimetreye kadar değişebilen boncuklar kullanılmaktadır. Uygulama alanına bağlı olarak boncuklar çelik, seramik, cam veya zirkon olabilmektedir. Öğütülecek malzemenin besleme boyutu da birkaç mikronla bir kaç milimetre arasında değişebilmektedir. Ancak, genellikle 100 µm'nin altındaki öğütmelerde enerji tüketiminin konvansiyonel değirmenlere göre daha az olduğu belirtilmektedir (Anon, 2002; Pilevneli, 2003; Jankovic ve Sinclair, 2006; Bilgili, 2007; Ding vd., 2007).

Karıştırılmalı değirmenler kolay işletim koşulları, basit konstrüksiyon, yüksek boyut küçültme oranları, malzemenin öğütme ortamı tarafından

az kirlenmesi ve düşük enerji sarfiyatı yanında, dar boyut grubunda ürün istenen endüstri alanlarında son yıllarda yoğun olarak tercih edilmektedir (Wang ve Forsberg, 2000).

Karıştırmalı değirmenlerde ürün boyut inceliği ( $d_{97}$ ) 200-10  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir (Miranda ve Yaeger, 1998). 15  $\mu\text{m}$  altına yapılacak öğütmelelerde diğer yöntemlere oranla daha ekonomik işlemleri mümkün kılmaktadır. Uygulamada, öğütme inceliğine göre cevherin kuru tonu başına harcanan enerji 1000-2000 kW-saat/ton olmaktadır (Orumwense and Forsberg, 1992). 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 ekolarak tekrar öğütme devrelerinde karıştırmalı değirmenlere de yer verilmektedir. Son yıllarda en yüksek kapasiteli karıştırmalı değirmen Avusturalya Mount Isa madeninde ISAMILL adı altında, Mount Isa Mines Ltd. ve NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH (Germany) işbirliğiyle kurulmuştur. Cihaz, 3000 litre net hacim, sekiz karıştırıcı disk, 10 m/s üstünde disk hızı, %70-80 boncuk doluluk oranı, % 40-50 pulp katı oranı, 180-240 lt/dak pulp çalışma debisi ve 1120 kW güçte çalıştırılmaktadır (Young ve Gao, 2000; Weller vd., 2000).  $d_{80}=19 \mu\text{m}$  boyutlu kurşun-çinko cevher beslemesinden  $d_{80}=12$  ve  $6,9 \mu\text{m}$  boyutlu ürün elde etmek için sırasıyla 7 ve 37 kW-saat/ton enerji yeterli olmaktadır (Johnson vd., 1998). Isa Mill'in baz metal madenlerindeki enerji verimli uygulamalarının ardından, altın madenlerinde zor serbestleşen cevherlerde pilot ölçekte denemeler yapılmış ve endüstriyel ölçekte kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 1. Yatay karıştırmalı değirmen-ISAMILL.

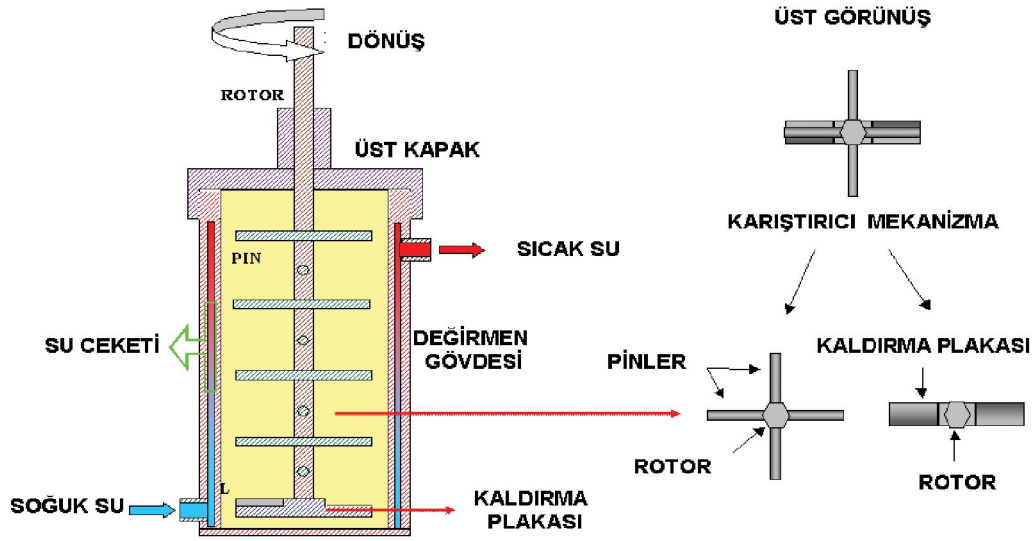
Zamanla çeşitli ekipmanları değiştirilerek değişik tiplerde karıştırmalı değirmenler tasarlanmıştır. Bunlardan bazıları Tower mill, Verti mill, Isa mill, Svedala detritör, Sala agitated mill ve ANI-Metsoprotech SVM mills'dir. Maxmill olarak adlandırılan karıştırmalı değirmen tipinde ise değirmenin gövdesi de dönmekte ve gövde içinde bulunan bir plaka yardımıyla malzemenin akışı değiştirilebilmektedir (Wang vd., 2004). Karıştırmalı değirmenler, karıştırıcı geometrisine göre de adlandırılabilirler. Karıştırıcılar; diskli, pinli ve halkalı olmak üzere temelde üç şekilden oluşur. Bu değirmenler yatay veya dikey olarak kullanılabilirler gibi yaş veya kuru öğütme de yapabilmektedirler (Kwade, 1999; Jankovic, 2003; Yue and Klein, 2005).

Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli dikey pinli kesikli tip bir karıştırmalı değirmende, 3,35 mm'nin altına kırılmış olan Kokaksu (Zonguldak) boksit cevheri kuru olarak mikronize boyuta öğütülmüştür. Ayrıca, Bond değirmeni ile öğütme performansları karşılaştırılmış ve bazı parametrelerin ürün inceliği üzerine etkileri araştırılmış ve tartışılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Dikey Pinli Karıştırmalı Değirmen

Şekil 2'de yerel imkanlarla imal edilmiş olan laboratuvar ölçekli, kesikli dikey pinli karıştırmalı değirmen (KD) gösterilmiştir. Donanım; değirmen gövdesi, AC motor (3 kW), inverter ve 486 model PC olmak üzere dört ana ekipmandan oluşmaktadır. Değirmen gövdesinin içine dik inen karıştırıcı mil, altıgen kesitli olup üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş 16 adet 9,6x34 mm boyutlarında silindirik karıştırıcı pinlerden oluşmaktadır. Milin alt ucunda karıştırılan öğütücü ortamı yukarıya doğru kaldırma hareketi sağlaması için dönüş yönündeki uçları keskinleştirilmiş 25x20x100 mm ölçülerinde kaldırma plakası bulunmaktadır. Değirmen gövdesi 118x200 mm boyutlarında olup, karıştırıcının kapladığı hacim çıkarıldıktan sonra elde edilen efektif gövde hacmi 2.000 litre olmaktadır. Değirmen 2.2 kW'lık güce sahip, maksimum devri 1400 dev/dk olan bir motorla çalıştırılmaktadır. Farklı karıştırma hızlarında deney yapabilmek için Siemens Midi Master 1500 model sürücü (frekans inverteri) motora bağlanmıştır. Öğütme parametrelerinin ayarı ve kontrolü için PC bağlantısı yapılmıştır.



Şekil 2. Dikey pinli karıştırıcı değirmenin şematik görünümü.

Tane boyutunun analizinde esas olarak Malvern Mastersizer S lazer boyut analiz cihazından yararlanılmıştır. Bunun yanı sıra, 10-400 mesh arası ASTM standart elekleri de kullanılmıştır. Fakat 400 mesh elek altına geçen miktar önemli ölçülerde olmasından ve  $d_{50}$  ve  $d_{80}$  gibi karakteristik boyutların incelenmesine imkan vermediği için elek kullanımından vazgeçilmiştir. Lazer difraktometre yöntemiyle çalışan Malvern boyut analiz cihazı helyum-neon lazer ışın kaynağından yararlanarak ölçüm yapmaktadır. Yöntem 0.1-2000  $\mu\text{m}$  arası boyut belirlenmesinde bir çok endüstri alanında tercih edilen standart bir yöntem haline gelmeye başlamıştır. 30 yıl kadar öncesine dayanan yöntem, saçınım açısı ile tane boyutu arasındaki ters orantı prensibine dayanmaktadır.

## 2.2. Malzeme ve Yöntem

Deneylerde kullanılan boksit örnekleri, Türkiye'nin Kuzeybatısında yer alan, Zonguldak iline bağlı Kokaksu beldesinden temin edilmiştir. Bölgeden görünüş özelliklerine bağlı olarak 4 farklı renkte alınan boksitler A, B, C ve D tipleri olmak üzere kodlanmıştır. Fikir vermesi açısından ve cevherin çoğunluğunu oluşturması bakımından B tipine ait boksit örneğinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. A, B, C ve D kodlu boksitlerin öğütülebilirliğinin araştırılması amacıyla öncelikli olarak standart Hardgrove testleri yapılmıştır. Bu yöntemde her biri  $25,4 \pm 0,13$  mm çapında olan 8 adet bilyenin

hareket ettiği 8 adet bilya yuvasından oluşan laboratuvar tipi değirmen kullanılmıştır. Sonuçta, Hardgrove indeks değerleri; A, B, C ve D tipi boksit örnekleri için sırasıyla 37, 41, 51 ve 47 olarak hesaplanmıştır. Buna göre, deneylere başlanmadan önce en zor öğütülen boksit tipinin A kodlu örnek olduğu saptanmıştır.

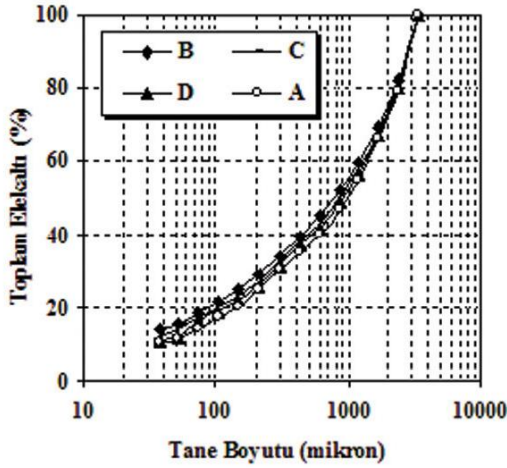
Çizelge 1. B Kodlu Örneğin Kimyasal Analizi

Analiz	İçerik (%)
MgO	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50.70
SiO <sub>2</sub>	8.65
CaO	0.16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.16
SO <sub>3</sub>	0.46
K <sub>2</sub> O	0.34
Na <sub>2</sub> O	0.20
TiO <sub>2</sub>	3.45
Kızdırma Kaybı	12.21

Maksimum tane boyutu 150 mm olan boksit örnekleri önce çeneli kırıcıda 35 mm altına, daha sonra konili kırıcı ile tamamı 3,35 mm'nin altına kırılmıştır. Karıştırıcı ve Bond değirmenine kuru olarak boksit cevherinin -3,35 mm'lik fraksiyonu beslenmiştir. Besleme mallarına ait elekaltı eğrileri Şekil 3'de görülmektedir. Karıştırıcı değirmen deneylerinde, çapları 2,5, 3,5, 4,5 ve 6,5 mm olan çelik bilyalar ayrı ayrı gruplar halinde kullanılmıştır. Bu bilyaların, ortalama yoğunluğu 7 g/cm<sup>3</sup> ve sertliği 40-50 HRC arasında değişmektedir. Bilya şarjı,



değirmen gövde efektif hacminin %40'ı kadar alınmıştır. Daha yüksek bilya şarj oranlarında karıştırıcının hareketi zorlanmış veya durmuştur. Boksit besleme miktarları ise bilyalar arasındaki boşluğu %100 oranında dolduracak kadar seçilmiştir. Karıştırmalı değirmene beslenen bilya ve boksit miktarları Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan Zonguldak iline bağlı Kokaksu beldesi boksit örneklerinin elekaltı eğrileri.

Çizelge 2. KD'ye Beslenen Bilya ve Boksit Miktarları

Bilya şarj oranı (%)	Bilya Çapı (mm)	Bilya ağırlığı (g)	Boksit Ağırlığı (g)
% 40	6.5	3 900	764
	4.5	4 000	746
	3.5	4 400	782
	2.5	4 600	764

Karıştırmalı değirmen deneylerinde öncelikle, bilya boyutu, karıştırma süresi ve karıştırma hızının öğütmeye etkisi araştırılmıştır. Bu parametrelerin araştırılmasında yalnızca B tipi boksit kullanılmıştır. Bilya boyutunun etkisi araştırılırken; 2,5, 3,5, 4,5 ve 6,5 mm çaplarında bilyalar kullanılmıştır. Her bilya grubu ile %40 şarj oranında, 1 dakika süresince, karıştırıcı hızı 1400 dev/dk olacak şekilde öğütmeler yapılmıştır.

Karıştırma süresinin etkisinin araştırılmasında ise optimum bilya boyutu ( 6,5 mm) kullanılmış ve farklı karıştırma sürelerinde (15, 30, 60, 120, 180 saniye) öğütmeler yapılmıştır. Bu deneylerde karıştırma hızı 1400 dev/dk olup, bilya şarj oranı benzer şekilde % 40'dır.

Karıştırıcı hızının etkisinin araştırılmasında ise 5 farklı karıştırma hızında çalışılmıştır. Bu karıştırma hızları; 600, 800, 1000, 1200, 1400 dev/dk'dır. Öğütme, 6,5 mm bilyalar ile %40 bilya şarj oranında ve 1 dakika süresince yapılmıştır.

Daha sonra, farklı öğütülebilirliğe sahip A, B, C ve D numuneleri ile benzer koşullarda 1'er dakikalık öğütmeler yapılmıştır. HGI ile KD'de boyut küçültme arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Öğütmeler %40 bilya şarjında, 1400 dev/dk karıştırma hızında ve 6,5 mm çapındaki bilyalar ile yapılmıştır.

Son aşamada, klasik Bond değirmeni ile öğütmeler yapılarak, KD ile öğütme verimlilikleri karşılaştırılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

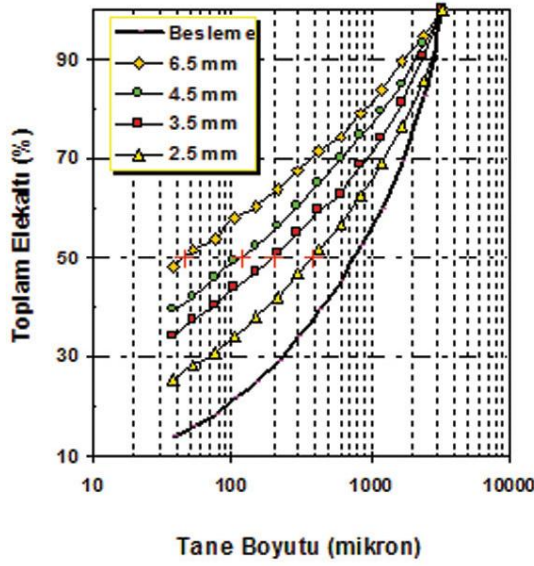
#### 3.1. Bilya Boyutunun Ürün İnceliğine Etkisi

Bilya boyutu arttıkça kırılma hızı da artmaktadır. Bilya boyutunun en verimli olduğu bir tane boyutu vardır. Bu ideal tane boyutundan daha büyük taneler için kırılma hızında düşme meydana gelir. En iyi kırılma hızı için "bilya çapı/optimum tane boyutu" oranının 7-20 arasında olduğu bildirilmiştir (Mankosa vd., 1986; Orumwense, 1992). Fakat bu çalışmaya uymayan başka sonuçlar da bulunmaktadır. Örneğin, Young ve Gao (2000) iki ayrı boyutlu kurşun cevheri cevheri, bilya yerine kullandıkları çalışmalarında, aynı ürün inceliği için bilya/cevher çap oranlarından (db/dc, = 1600/30; 800/30) büyük değere sahip olanın daha iyi sonuç sağladığını göstermiştir (Pilevneli, 2003).

Bilya boyutunun incelendiği diğer çalışmalarda, ince bilya kullanılması ile elde edilen ürünün tane boyutu da incelmektedir. Bu eğilim besleme tane boyutu ile orantılı olarak belli bir bilya boyutuna kadar devam etmektedir. Daha ince bilyaların kullanılması durumunda ise, çarpışma anında açığa çıkan enerjinin azalması nedeniyle, bilyaların besleme malı içindeki iri taneleri parçalaması zorlaşmakta ve verim düşmektedir (Mankosa vd.,1986; Zheng vd, 1996; Jankovic, 2003; Dikmen ve Ergün, 2003).

Farklı boyutlardaki bilyalar ile yapılan 1'er dakikalık öğütme sonucunda elde edilen ürünlerin boyut dağılımları Şekil 4'de gösterilmiştir. Buna

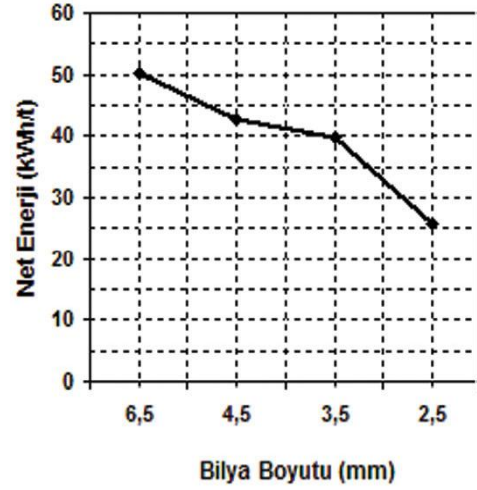
göre maksimum tane boyutu 3,35 mm olan B kodlu boksit örneğinin öğütülmesi için en uygun bilya boyutu 6,5 mm'lik bilyalardır. 6,5 mm çaplı bilyalar ile 1 dakikalık öğütme süresi sonunda elde edilen ürünün ortalama tane boyutu 45 µm olmaktadır. Diğer taraftan, 2,5 mm'lik bilyalarla yapılan öğütme sonucunda ise ortalama tane boyutu 385 µm olmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma için bilya boyutu ile tane boyutu arasındaki optimum oran değeri  $6,5/0,78=8,33$  bulunmuştur.



Şekil.4. Kokaksu boksitinin KD'de öğütülmesinde bilya boyutunun ürün inceliğine etkisi.

Spesifik enerji başına elde edilen ürünün  $d_{50}$  boyutu, bilya boyutuyla birlikte azalmaktadır (Mankosa vd., 1986; Tüzün and Loveday, 1994). Bilya boyutu yarıya indirilirse, enerji sarfiyatı da aynı oranda azalır. Fakat, ürün boyutu da o oranda iri olacak ve aynı inceliği elde etmek için öğütme süresinde artış gerekecektir. Karıştırma hızının çok yüksek (11,4 m/s) olduğu durumlarda dahi, aynı spesifik enerji sarfiyatında ince boyutlu bilyalar, irilere oranla daha iri boyutta ürün verebilir (Wang and Forssberg, 2000). Bu hafif ve küçük bilyalar için belirtilen hızdaki çarpma olaylarının ve/veya çarpma şiddetinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Kırılma hızı, artan bilya boyutuyla artar ve doğrusallığa yaklaşır. Fakat, enerji sarfiyatı da artan bilya boyutu ile artacağından kırılma hızındaki artıştan kaynaklanan fayda nötrleşmiş olur (Pilevneli, 2003; Sinnott vd., 2006).

Farklı boyutlu bilyalar ile 1'er dakikalık öğütme süresi sonunda tüketilen enerji değerleri Şekil 5'de gösterilmiştir. Buna göre, bilya boyutu arttıkça enerji tüketimi de artmaktadır. Örneğin, 6,5 mm çaplı bilyaların kullanılması durumunda enerji tüketimi 50,3 kW-saat/ton iken, 2,5 mm'lik bilyaların kullanılması durumunda 25,7 kW-saat/ton olmaktadır. Bu durum, önemli ölçüde iri bilyaların değirmen içerisindeki hareketinin ince bilyalara göre daha zor olmasından ve bilyalar arasındaki sürtünme/kesme kuvvetlerinin daha büyük olmasından kaynaklanmıştır.



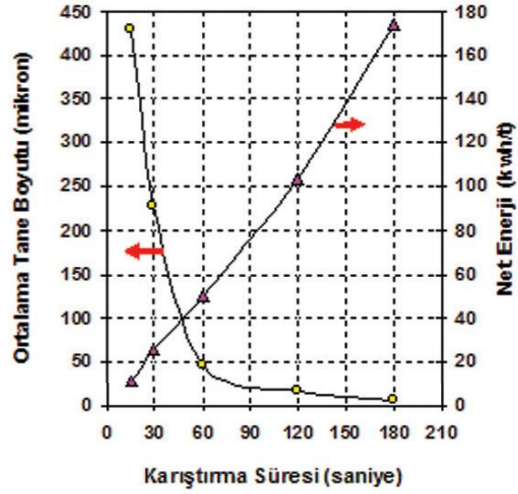
Şekil 5. Kokaksu boksitinin KD'de öğütülmesinde bilya boyutu-harcanan enerji ilişkisi.

### 2.3 Karıştırma Süresinin Ürün İnceliğine Etkisi

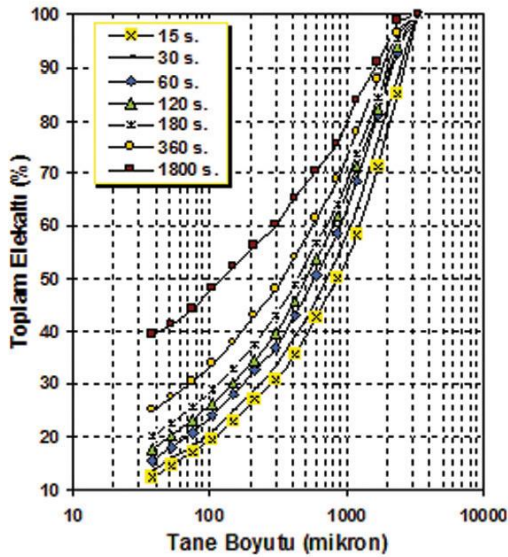
Karıştırma süresinin ürün inceliğine etkisinin incelenmesi için 15, 30, 60, 120 ve 180 saniye olmak üzere toplam 5 farklı zaman aralığında karıştırma (öğütme) yapılmıştır. Deneylerde kullanılan örnek B kodlu boksit, karıştırıcı hızı 1400 dev/dk, ortam boyutu ise 6,5 mm'dir. Deneyler sonucunda elde edilen ürünlere ait elekalrı eğrileri Şekil 6'da enerji tüketim değerleri ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

Şekil 6'dan, karıştırma süresi arttıkça elde edilen ürünün inceliğinin de arttığı görülmektedir. Besleme  $d_{50}$  boyutu 780 µm olan boksit örneğinin 15 saniye öğütülmesi sonucunda ürünün  $d_{50}$  boyutu 430 µm olmaktadır. Benzer şekilde; 30, 60, 120 ve 180 saniye öğütme için ürünün  $d_{50}$  boyutları sırasıyla 227, 45, 15 ve 5 µm bulunmuştur. Harcanan enerji ise doğal olarak

karıştırma süresi arttıkça artmıştır. Ancak, benzer boyut küçültme oranı için ince boyutlarda yapılan öğütme, iri boyutlarda yapılan öğütmeye göre daha fazla enerji sarfiyatına neden olmaktadır. İlk 60 saniye sonundaki boyut küçültme oranı  $780/45=17,3$  iken, ikinci 60 saniyede  $45/5=9$ 'dur. Harcanan enerji ise ilk 60 saniyede ton başına 50,30 kW-saat iken, ikinci 60 saniyede artarak 53,10 kW-saat olmuştur. Bunun nedeni, gözleme dayalı olarak açıklanacak olursa, ince tanelerin birbirine bağlanarak topaklar oluşturması ve öğütme yapan ortamla teması engellemesidir. Burada tavsiye edilebilecek bir uygulama sisteme bir dağıtıcının ilave edilmesi ya da ince ürünün bir separatörle sistemden alınmasıdır. Genellikle endüstriyel ölçekte ince ürün separatörle alınmakta ve öğütmeye kalan diğer irilerle devam edilmektedir.



Şekil 7. Kokaksu boksitinin KD'de öğütülmesinde karıştırma süresi-tüketilen enerji ilişkisi.



Şekil 6. Kokaksu boksitinin KD'de öğütülmesinde karıştırma süresinin ürün inceliğine etkisi.

#### 2.4 Karıştırma Hızının Ürün İnceliğine Etkisi

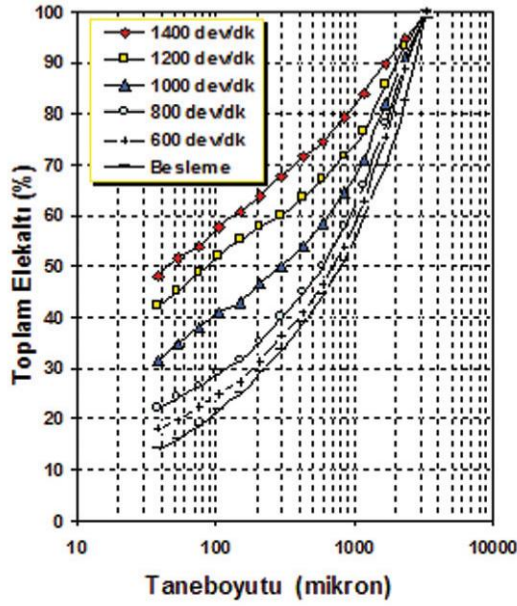
Karıştırma hızı ürün inceliğini ve enerji tüketimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Genel olarak karıştırma hızı arttıkça, kırılma hızı da artmakta ve ürün boyutu, buna orantılı olarak ekonomik ve verimli bir şekilde mikronize boyuta inmektedir. Ayrıca, boyut dağılımı da karıştırma hızıyla incelmekte ve daha dar boyut aralığına sahip ürünler elde edilmektedir. Karıştırma hızındaki farklılığın aynı spesifik enerji için ürün boyutu üzerinde % 12 kadar etkisi olacağı belirtilmiştir (Pilevneli, 2003).

En verimli karıştırma hızı, bilyaların taneler arası kuvvetleri yenmeye başladığında elde edilmektedir. Bu hız aşıldığında, fazla olan enerjinin, elde edilen inceliğe ya da verime bir katkısı olmadığı gibi aşırı ısınmaya da neden olabileceği belirtilmektedir (Orumwense, 1992; Kwade vd., 1996; Fadhel ve Frances; 2001; Pilevneli, 2003).

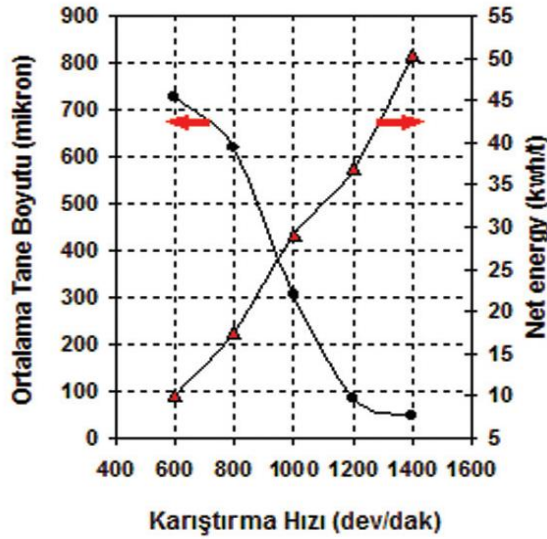
Karıştırma hızının ürün inceliğine etkisini araştırmak amacıyla 1 dakika süresince 600, 800, 1000, 1200 ve 1400 dev/dk karıştırma hızlarında deneyler yapılmıştır. Deneylerde B tipi boksit ve 6,5 mm çaplı bilyalar kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen ürünlere ait elekaltı eğrileri Şekil 8'de enerji tüketimleri ise Şekil 9'da verilmiştir.

Buna göre, karıştırıcı hızının artması ile birlikte elde edilen ürünün  $d_{50}$  tane boyutu da inceleşmektedir. Aynı zamanda, karıştırıcının hızı arttıkça tüketilen enerji miktarı da artmaktadır. Sonuç olarak, hız arttıkça değirmenin birim hacminde harcanan enerji de artmaktadır. Bu da, istenilen ürün tane boyutuna ulaşmak için gerekli olan sürenin azalmasını sağlamaktadır. Örneğin; 600 dev/dk karıştırma hızında 1 dakika öğütme sonunda elde edilen ürünün  $d_{50}$  boyutu 750  $\mu$ m iken, 1400 dev/dk karıştırma hızında 45  $\mu$ m'dir. Bu durumda, 600 dev/dk karıştırma hızında 45  $\mu$ m boyutuna öğütme yapabilmek için daha fazla zamana (> 1 dakika) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da zamanla enerji tüketiminin artmasına neden olacaktır.





Şekil.8. Kokksu boksitinin KD'de öğütülmesinde karıştırma hızının ürün inceliğine etkisi.



Şekil.9. Kokksu boksitinin KD'de öğütülmesinde karıştırma hızı-enerji tüketimi ilişkisi.

## 2.5 HGI Değerleri Farklı Olan Boksitlerin Karıştırmalı Değirmende Öğütülmesi

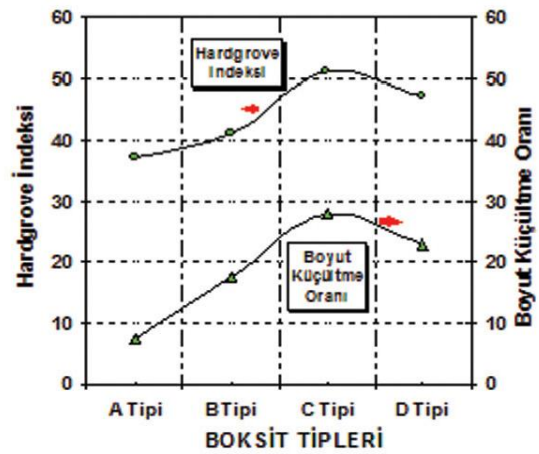
Farklı HGI değerlerine sahip olan A, B, C ve D kodlu boksit örnekleri 1400 dev/dak karıştırma hızında, 6,5 mm çaplı bilyalarla 1 dakika süresince öğütülmüştür. Bilya şarj oranı %40 olup, boksit miktarları bilyalar arasındaki boşlukları %100

oranında dolduracak kadar alınmıştır. Beslenen cevher türlerinin  $d_{50}$  boyutları ile 1 dakika öğütme sonunda elde edilen ürünlerin  $d_{50}$  boyutları Çizelge 3'de verilmiştir. Bu çizelgeden de görülebileceği gibi, farklı boksit türleri için elde edilen ürünlerin  $d_{50}$  boyutları 30  $\mu$ m ile 130  $\mu$ m arasında değişmektedir. Ancak, 1 dakikalık öğütme süresi sonucunda harcanan enerji boksitin öğütülebilirliğinden bağımsız olup, her örnek için ton başına 50,30 kS-saat'tir.

Çizelge 3. A,B,C ve D Kodlu Boksit Örneklerinin Besleme ve Ürün boyutları

	A	B	C	D
Besleme, $d_{50}$ ( $\mu$ m)	950	780	830	910
Ürün, $d_{50}$ ( $\mu$ m)	130	45	30	40
Boyut Küçültme Oranı	7.30	17.33	27.66	22.75

Karıştırmalı değirmende en yüksek boyut küçültme oranları, sırasıyla C, D, B, ve A tipi boksit örnekleri ile elde edilmiştir. Buna göre öğütülebilirliği en kolay olan C tipi, en zor olan ise A tipi boksit türüdür. Bu durum, HGI değerleri ile de tutarlılık içerisinde olup benzer eğilimler söz konusudur (Şekil 10). Zira, HGI değeri 51 olan C örneği en kolay öğütülebilen, HGI değeri 37 olan A tipi boksit ise en zor öğütülebilen boksit türüdür. Sonuç olarak, karıştırmalı değirmende yüksek HGI değerleri için yüksek boyut küçültme oranları elde edilmiştir.



Şekil 10. Kokksu boksiti için Hardgrove indeksi değerleri ve KD'de boyut küçültme arasındaki ilişki.



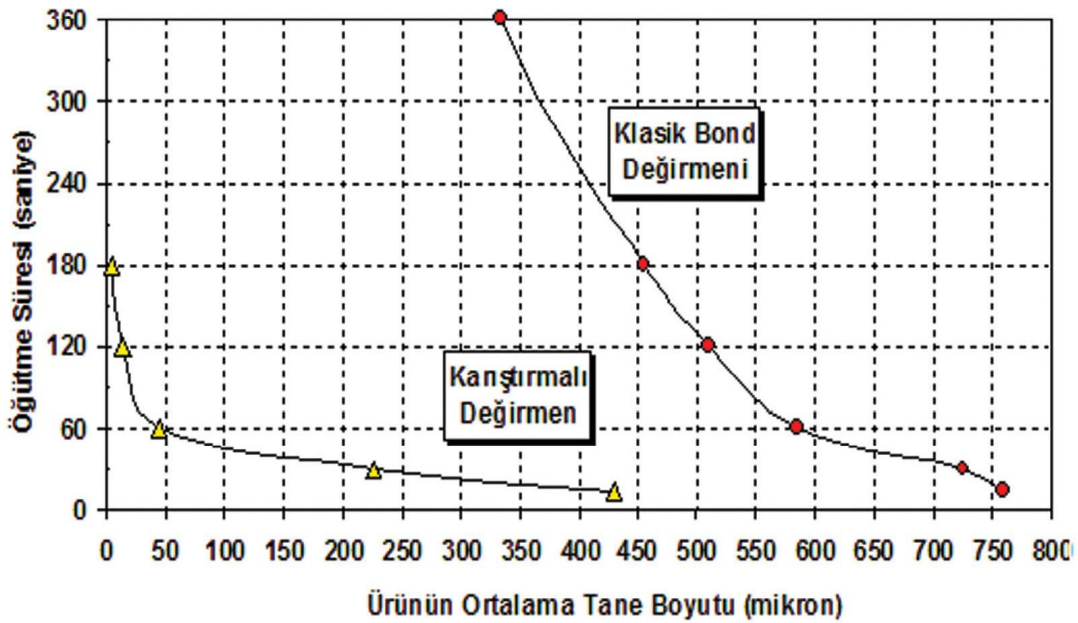
## 2.5 Bond Değirmeninde B Tipi Boksitin Öğütülmesi ve Karıştırmalı Değirmenle Karşılaştırılması

Deneysel olarak kullanılan Bond değirmeni, 30,5x30,5 cm boyutlarında ve dakikadaki dönüş hızı 70 devirdir. Değirmen içine öğütücü ortam olarak 43 adet 3,68 cm, 67 adet 2,97 cm, 10 adet 2,54 cm, 71 adet 1,90 cm ve 94 adet 1,15 cm çaplarında çelik bilyalar konmuştur. B tipi boksitin besleme miktarı bilyalar arasındaki boşluğu %100 oranında dolduracak kadar (3,5 kg) alınmıştır.

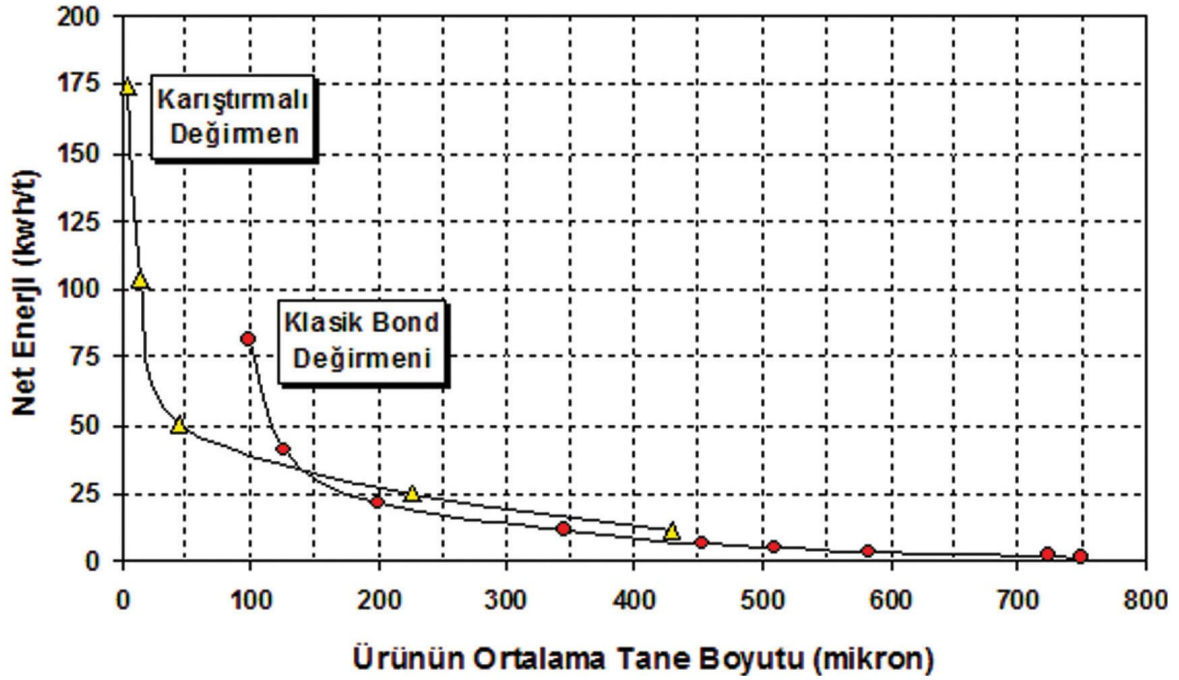
Bond değirmeni ile KD'nin karşılaştırılabilmesi için Bond değirmeninde farklı sürelerde öğütmeler yapılarak enerji tüketimleri ve ürün incelikleri belirlenmiştir. Şekil 11'de öğütme süresine bağlı olarak KD'den ve Bond değirmeninden elde edilen ürünlerin ortalama tane boyutları gösterilmiştir. Buna göre, öğütme süresinin 15, 30, 60, 120 ve 180 saniye olması durumunda KD'den elde edilen ürünlerin inceliği sırasıyla 430, 227, 45, 15 ve 5 µm olmakta iken; Bond değirmeninden elde edilen ürünlerin inceliği 750, 725, 585, 510 ve 455 µm olmaktadır. KD'de 180 saniyelik öğütme sonucunda ürünün ortalama tane boyutu 5 µm'ye düşmekte iken, Bond değirmeninde 360 saniyelik öğütme sonunda bile ürünün ortalama tane boyutu 345 µm olmaktadır. Eğrilerin eğimlerinden de görülebileceği gibi, KD çok kısa sürelerde (15-30 saniye gibi) oldukça

ince ürünler verebilmektedir. Sonuç olarak, Bond değirmeninde 5 µm'lik bir ürün eldesi için saatlerce öğütme yapmak gerekli iken, KD'de benzer ürün inceliğine birkaç dakikada ulaşmak mümkün olmaktadır.

Şekil 12'de her iki değirmen tipinde tüketilen enerjiye karşılık elde edilen ürünlerin incelikleri gösterilmiştir. Enerji tüketiminin 11,10 kW-saat/ton olması durumunda, Bond değirmeninde ürünün ortalama tane boyutu 345 µm olmakta iken, KD'de 430 µm olmaktadır. Benzer şekilde, 21,4 kW-saat/ton'luk enerji tüketimi için Bond değirmeninde ürünün ortalama tane boyutu 200 µm iken, KD'de 292 µm'dir. Bu durumda, Bond değirmeni enerji tüketimi açısından KD'ye göre daha avantajlıdır. Başka bir deyişle iri boyutlu tanelerin öğütülmesinde Bond değirmeni daha az enerji tüketmektedir. Ancak, öğütme ürünün ortalama tane boyutunun 140 µm'nin (çakışma noktası) altında olması durumunda, KD hem enerji tüketimi hem de öğütme süresi açısından daha avantajlı olmaktadır. Her iki tip değirmende enerji tüketiminin 81,3 kW-saat/ton olduğu durumda, KD'nin ürününün ortalama tane boyutu 34 µm iken, Bond değirmeninin ürünü 101 µm olmaktadır. Sonuç olarak, iri boyutlu boksit tanelerinin öğütülmesi (>140 µm) için Bond değirmeni, ince boyutlu tanelerin (<140 µm) öğütülmesi için KD daha ekonomiktir.



Şekil 11. Kokaksu (Zonguldak) boksitin karıştırmalı değirmen (KD) ve Bond değirmeninde öğütülmesi durumunda her iki değirmene ait ürün inceliği-öğütme süresi ilişkisi.



Şekil 12. Kokaksu (Zonguldak) boksitinin karıştırılmalı değirmen (KD) ve Bond değirmeninde öğütülmesi durumunda her iki değirmene ait ürün inceliği-tüketilen enerji ilişkisi.

#### 4. SONUÇLAR

Karıştırılmalı değirmende, -3,35 mm altına kırılmış olan Kokaksu boksitinin öğütülmesinde çeşitli çalışma parametrelerinin ürün inceliği ve enerji tüketimi üzerinde önemli etkilere sahip olduğu saptanmıştır.

Boyutları 2,5, 3,5, 4,5 ve 6,5 mm olan bilyalarla yapılan 1'er dakikalık öğütme deneyleri sonucunda, en ince boyutlu ürün 6,5 mm'lik bilya grubuyla elde edilmiştir. Buna göre, birim öğütme süresi için optimum bilya boyutu/tane boyutu oranı 8,33'tür. Ancak, diğer taraftan bilya boyutunun artmasıyla tüketilen enerji miktarı da artmakta ve ürün inceliği daha çok enerji tüketimiyle ilişkili olmaktadır. Genel olarak, bilya boyutu arttıkça tanelerin ve bilyaların birbirine sürtme kuvvetleri de artmakta ve bu hem enerji tüketimini arttırmakta hem de cevherin öğütülmesini hızlandırmaktadır.

Karıştırma süresi ürün inceliğini etkileyen diğer bir önemli parametre olup, süre arttıkça hem enerji tüketimi artmakta hem de elde edilen ürünün boyutu incelmektedir. Karıştırılmalı değirmende, birkaç dakikalık karıştırma (öğütme) süresi

sonunda tane boyutu birkaç mikrona kolaylıkla indirilebilmektedir.

Karıştırma hızının artırılması, tanelerin ve bilyaların birbiri ile çarpışma hızlarını da arttırmakta ve doğal daha ince ürünlerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Buna bağlı olarak, karıştırma hızının artışı ile birim hacimde harcanan enerji miktarı da artmaktadır.

Farklı HGI değerlerine sahip boksit cevherlerinin karıştırılmalı değirmende öğütülmesi durumunda, yüksek HGI'ye sahip olanlar daha yüksek boyut küçültme oranları sağlamıştır. Karıştırılmalı değirmende farklı boksit tiplerinin öğütülebilirliği ile, türlerin HGI değerleri arasında paralel bir ilişki söz konusudur.

Karıştırılmalı değirmenin öğütme veriminin Bond değirmeni ile karşılaştırılması durumunda, ince (<140 µm) boyutlardaki öğütme için karıştırılmalı değirmen, iri boyutlardaki öğütme (>140 µm) için Bond değirmeni daha avantajlı olmaktadır. Ancak her iki boyut grubunda da, benzer tane iriliği eldesi için, Bond değirmeninde karıştırılmalı değirmene göre, kat kat daha fazla öğütme sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

## KAYNAKLAR

Anonymous, 2002; "Energy saving ultra fine grinding with the SALA agitated mill", Zement-Kalk-Gibs, **46**, 600-601.

Abd ElRahiem, F.H., 1999; "Some Aspects on Grinding the Albite Particles to Reach Liberation Size", Ore Dressing, **2**, 1-13.

Bayraktar, İ., Ersayın, S., Gülsoy, Y., Ekmekçi, Z., ve Can, M., 1999; "Temel Seramik ve Cam Hammaddelerimizdeki (Feldspat, Kuvars ve Kaolin) Kalite Sorunları ve Çözüm Önerileri", 3.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 14-15 Ekim, İzmir.

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.

Bond, F.C., 1951; "Third Theory of Comminution, Trans. AIME, Vol.193, pp. 484-494.

Celep, O ve Alp, İ., 2008; "Karıştırmalı Değirmenler ile İnce Öğütmenin Altın Cevherlerine uygulanabilirliğinin İncelenmesi, Madencilik, **47(3)**, s.15-26.

Cho, H., Waters, M.A. and Hogg, R.,1996; "Investigation of the Grind Limit in Stirred Media Milling", International Journal of Mineral Processing, **44-45**, 607-615.

Conway-Baker, J., Barley R.W., Williams R.A., Clarke A.J., Kostuch J.A. ve Parker D.J., 1999; "Investigation and Model Validation of Media Motion in a Vertical Stirred", 1st World Congress on Industrial Process Tomography, 244-248.

Demir, C., Abramov, A.A. and Çelik, M.S., 2001; "Flotation Separation of Na-Feldspar from K-Feldspar by Monovalent Salts, Minerals Engineering, **14(7)**, 733-740,.

Ding, Z., Yin, Z., Liu, L. and 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.

Dikmen, S. ve Ergün, Ş.L., 2004; "Karıştırmalı Bilyalı Değirmenler", Madencilik, **43(4)**, 3-15.

Fadhel, H. and Frances, C., 2001; "Wet batch grinding of alumina in a stirred bead mill, Powder Technology, **119**, 257-268.

Gao, M.W. and Forssberg, E., 1993; "A Study on The Effect of Parameters in Stirred Ball Milling", International Journal of Mineral Processing, **37**, 45-59.

Jankovic, A., 2003; "Variables Affecting the Fine Grinding of Minerals Using Stirred Mills", Minerals Engineering, **16**, 337-345.

Jankovic, A. and Sinclair, S., 2006; "The shape of product size distributions in stirred mills", Minerals Engineering, **19**, 1528-1536.

Johnson, N. W., Gao, M., Young, M. F. and Cronin, B., 1998; "Application of the ISAMILL (a horizontal stirred mill) to the lead-zinc concentrator (Mount Isa Mines Ltd.), and the mining cycle", Australian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series (AusIMM 1998), No. 2, 291-297.

Kwade, A., 1999; "Wet Comminution in Stirred Media Mills-Research and Its Practical Application", Powder Technology, **105**, 14-20.

Kwade, A., Blecher, L. and Schwedes, J., 1996; "Motion and Stress Intensity of Grinding Beads in a Stirred Media Mill:Part 2" Powder Technology, **86**, 69-76.

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.

Mankosa, M. J., Adel, G.T. and 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. and Yoon, R.H., 1989; "Effect of Operating Parameters in Stirred Ball Mill Grinding of Coal", Powder Technology, **59**, 255-260.

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

Orumwense, O.A., 1992; The kinetics of fine grinding in an annular ball mill”, Powder Technology; **73**, 101-108.

Orumwense, O. A. and Forsberg, E., 1992; “Super-fine and ultra-fine grinding - a literature survey”, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, **11(1-2)**, 107-127.

Pilevneli, C.C., 2003; “Bilyalı Bir Karıştırmalı Değirmende İnce Boyutlu Klinker Öęütmesinin İncelenmesi”, ZKÜ Maden Müh. Böl., Doktora Tezi.

Sinnott, M., Clearly, P. W. and 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

Tüzün, M.A. and Loveday, B.K., 1994; “Fine milling of chromite sand in a 5-litre stirred ball mill”, Minerals Engineering, **7(5/6)**, 551-560.

Wang, Y., Forsberg, E. and Sachweh, J. 2004; “Dry Fine Comminution in a Stirred Media Mill-MaxxMill”, International Journal of Mineral Processing, **745**, 65-74.

Weller, K. R., Gao, M. And Bowen, P. , 2000; “Scaling-up horizontal stirred mills from a 4 litre test mill to a 4000 litre “ISAMILL”, Mount Isa Mines Ltd.,

Young, M. F. and Gao, M., 2000; “Performance of the Isa Mills in the George Fisher Flowsheet”, Proceedings of AusIMMM Seventh Mill Operators’ Conference, Kalgoorlie, Australia, 12-14 October, pp. 75-81.

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

Zheng, J., Harris, C.C. and Somasundaran, P., 1996; “A Study on Grinding and Energy Input in Stirred Media Mills”, Powder Technology, **86**, 171-177.