

Teknik Not / Technical Note

DİKEY PİNLİ KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE ARMUTÇUK KÖMÜRÜNÜN KURU ÖĞÜTÜLMESİ VE BİLYA BOYUTUNUN ÜRÜN İNCELİĞİNE ETKİSİ

Dry Grinding of Armutçuk Coal in a Pin-Type Vertical Stirred Mill and the Effect of Bead Size on Product Fineness

ÖZET

Bu çalışmada, ortalama tane boyutu 1 mm olan Armutçuk kömürünün laboratuvar ölçekli dikey pinli bir karıştırmalı değirmende kuru olarak öğütülmesi araştırılmıştır. Öğütücü ortam olarak 4 farklı çapta (6.5, 5.5, 4.5, 3.5 mm) granüle çelik bilyalar kullanılmış ve değişik sürelerde (2.5, 5, 10, 20, 40, 60, 120, 240 saniye) öğütmeler yapılmıştır. Daha sonra bilya boyutunun ve öğütme süresinin ürün inceliği üzerine etkisi incelenmiştir. Çapları 6.5, 5.5, 4.5 ve 3.5 mm olan bilyalarla 60 saniye öğütme sonucunda elde edilen ürünlerin d_{50} boyutları sırasıyla 19, 18, 16 ve 11 μm bulunmuştur. Öğütme süresi 60 saniyenin üzerine çıkarıldığı zaman öğütme verimi dramatik şekilde azalmış ve özellikle 120 saniyeden sonra tanelerin neredeyse hiç öğütülmediği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Karıştırmalı Değirmen, Bilya, Kömür, Öğütme

ABSTRACT

In this study, dry grinding of Armutçuk coal ($d_{50} \sim 1$ mm) were investigated in a laboratory scale pin-type vertical stirred mill. Grinding experiments were carried out with various diameter steel beads (6.5, 5.5, 4.5, 3.5 mm) at various grinding times (2.5, 5, 10, 20, 40, 60, 120, 240 s). Then, the results were plotted to see the effect of grinding time and bead size on the product fineness. The results showed that the products' median size (d_{50}) became finer (19, 18, 16, 11 μm) as the media sizes decreases (6.5, 5.5, 4.5, 3.5 mm) in 60 s grinding time. The efficiency of the stirred mill reduced dramatically after the 60 s grinding time and the fine particles were hardly ground after the 120 s grinding time.

Keywords: Stirred Mill, Bead, Coal, Grinding

1. GİRİŞ

Günümüzde kömürün mikronize boyuta öğütülmesinin başlıca üç amacı vardır. Bunlar;

1. Termik santrallerin ve sanayinin ihtiyacı olan toz kömürü sağlamak,
2. Super veya ultra temiz kömür üretmek,
3. Kömür-su veya kömür-yağ karışımı yakıtlar hazırlamak.

Termik santrallerde ve bazı fırınlarda kömür toz halinde ($<100 \mu\text{m}$) püskürtme yada başka bir deyişle pülverize enjeksiyon yöntemiyle yakılmaktadır. Öğütmenin istenilen düzeyde gerçekleştirilememesi durumunda ise yanma verimi düşmekte ve bir miktar kömür yanmadan cürufa geçmektedir. Nitekim, konvansiyonel değirmenlerle öğütme yapılan Soma Termik Santralinde cüruflar üzerinde yapılan bir araştırmada tanelerin %36'sının 1 mm 'nin üstünde olduğu ve %20 civarında yanmamış kömür içerikleri saptanmıştır (Güven vd., 1992).

Süper ve ultra temiz kömür üretimi için kömürün çok ince boyutlara öğütülerek mineral maddelerinden serbestleşmesi gerekmektedir. Bu boyut genellikle bir kaç mikronla 20 mikron arasında değişmektedir (Mankosa vd., 1986; Özbayoğlu ve Mamurekli, 1988; Mankosa vd., 1989).

Kömür-su veya kömür-yağ karışımı yakıtlar günümüzde petrolün alternatifi olarak görülmekte ve ısınmadan motor yakıtına kadar bir çok değişik alanda kullanılabilir. Bu yakıtların hazırlanması aşamasında da kömürün çok ince boyutlara kadar ($d_{50}<30 \mu\text{m}$) öğütülmesi gerekmektedir (Yavuz ve Küçükbayrak, 1998).

Bilindiği gibi, konvansiyonel tambur (çubuklu ve bilyalı gibi) değirmenlerde harcanan enerjinin bir kısmı doğrudan boyut küçültmede kullanılmakta, önemli bir bölümü ise faydalı bir iş yapmadan (boyut küçültme) ısı enerjisine dönüşerek kaybolmaktadır. Ayrıca, $75 \mu\text{m}$ 'nin altındaki öğütmelerde tambur değirmenlerin verimi çok azalmakta ve öğütme ekonomik olmaktan çıkmaktadır (Jankovic, 2003). Oysa günümüzde karıştırmalı değirmenlerin kullanılmasıyla $10 \mu\text{m}$ 'nin altında bile ekonomik öğütmeler yapmak mümkün olmaktadır. Bunun arkasında yatan temel neden, karıştırmalı değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle, enerji tüketiminin tamburlu değirmenlerle

karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmasıdır (Kwade,1996). Temel tasarımı 1920'li yıllara kadar uzanan karıştırmalı değirmenler, ilk kez 1960'lı yıllarda kaolin'in öğütülmesi için kullanılmıştır (Kwade, 1999; Conway-Baker et al., 1999). Karıştırmalı değirmen temelde sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir ekseninde dönen bir rotordan oluşmaktadır. Zamanla çeşitli ekipmanları değiştirilerek çeşitli tiplerde karıştırmalı değirmenler dizayn edilmiştir. Bunlardan bazıları Tower mill, Verti mill, Isa mill, Svedala detritör, Sala agitated mill ve ANI-Metsoprotech SVM mills'dir (Jankovic, 2003). Maxmill olarak adlandırılan karıştırmalı değirmen tipinde ise değirmenin gövdesi de dönmekte ve gövde içinde bulunan bir plaka yardımıyla malzemenin akışı değiştirilebilmektedir (Wang, 2004).

Karıştırmalı değirmenler, karıştırıcı (stirrer) geometrisine göre de adlandırılabilir. Karıştırıcılar; diskli, pinli ve halkalı (annular gap) olmak üzere temelde üç şekilden oluşur. Bu değirmenler yatay veya dikey olarak kullanılabilirler gibi yaş ve kuru öğütme de yapabilmektedirler (Kwade, 1999)

Bu çalışmada, dikey pinli bir karıştırmalı değirmen kullanılarak Armutçuk kömürü mikronize boyuta öğütülmüştür. Deneyler kuru olarak, 4 farklı boyuttaki bilyalar ile değişik öğütme sürelerinde yapılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Dikey Pinli Karıştırmalı Değirmen

Şekil 1' de deneysel çalışmalarda kullanılan laboratuvar ölçekli, kesikli (batch) tipi dikey pinli bir karıştırmalı değirmen gösterilmektedir. Donanım; değirmen gövdesi, AC motor , frekans inverteri (farklı karıştırma hızları için) 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 $9.6 \times 34 \text{ mm}$ boyutlarında silindirik karıştırıcı pinlerden oluşmaktadır. Karıştırıcı maksimum devri 1400 dev/dak. olan, 2.2 kW'lik güce sahip bir motorla karıştırılmaktadır. Deneylerde gerekli olan akım şiddetini ve tork okumalarını yapabilmek, karıştırma hızını ve deney süresini hassas ayarlayabilmek için PC bağlantısı yapılmıştır. Öğütmelerde enerji sarfiyatları 3 fazlı bir elektrik sayacından okunmuştur.



(a)

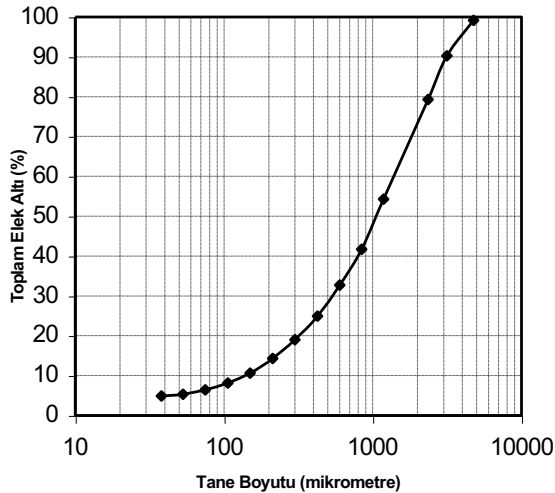


(b)

Şekil 1. (a) Öğütme donanımı (b) Değirmen gövdesi, karıştırıcı (stirrer) ve öğütücü bilyalar

2.2 Malzeme ve Yöntem

Öğütme deneylerinde kömürleşme derecesi yüksek, Zonguldak Armutçuk yıkama tesisinden alınan zenginleştirme ürünü bitümlü kömürler kullanılmıştır. Kömür numunesi deneysel çalışmalar öncesinde önce çeneli daha sonra konik kırıcıdan geçirilerek öğütme için uygun boyuta (-5 mm) getirilmiştir. Elde edilen besleme malına ait boyut dağılımı eğrisi Şekil 2'de, numunenin kuru bazda yapılan kısa kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Öğütme deneylerinde kullanılan numunenin boyut dağılımı

Çizelge 1. Numunenin kuru bazda kimyasal analiz sonuçları

Analiz	Değeri
Kül (%)	7.86
Uçucu Madde (%)	33.25
Sabit Karbon (%)	58.89
Toplam Kükürt (%)	0.52
Üst Isıl Değer (kcal/kg)	7110

Deneysel çalışmalarda kullanılan Armutçuk taşkömürü örneğinin Hardgrove öğütülebilirlik indeksi değeri 70 olarak bulunmuştur. Değirmene beslenen kömür örneğinin nem içeriği ise yaklaşık olarak %1 civarındadır. Deneyler süresince boyut analizleri; ASTM standart elek serisi ($850 \mu\text{m}$ ve üstü) ve Malvern Mastersizer S ($850 \mu\text{m}$ 'nin altı) lazer boyut analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra her iki sonuç ortak bir tabloda birleştirilmiştir.

Öğütme deneylerinde öğütücü ortam olarak ortalama çapları 6.5, 5.5, 4.5 ve 3.5 mm olan düşük karbonlu granüle çelik bilyalar kullanılmıştır. Bilyaların ortalama yoğunlukları 7 g/cm^3 olup, sertlikleri 40-50 HRC arasında değişmektedir. Bilya şarj miktarları değirmen gövde efektif hacminin %60'ı kadar seçilmiştir. Beslenen kömür miktarları ise bu bilyalar arasındaki boşluğu %100 oranında dolduracak kadar alınmıştır. Karıştırıcının hızı ise deneyler süresince sabit olup 1400 dev./dak.'dır.

Deneylerde 4 farklı boyutta değirmen gövdesi kullanılmıştır. En büyük çaplı değirmen gövdesine en büyük çaplı bilyalar beslenmiştir. Her bilya boyut grubu ile 2.5, 5, 10, 20, 40, 60,

120 ve 240 saniye olmak üzere 8 farklı öğütme süresinde deneyler yapılmıştır (Çizelge 2). Daha sonra bilya boyutunun ve öğütme süresinin ürün inceliği üzerine etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 2. Karıştırmalı değirmen öğütme deneylerinde kullanılan çalışma koşulları

Karıştırıcı devri (dev./dak.)	Bilya şarj oranı (%)	Değirmen gövde çapları (mm)	Efektif değirmen hacmi (cm ³)	Bilya çapları (mm)	Bilya miktarları (g)	Beslenen kömür miktarı (g)	Öğütme süresi aralığı (sn)
1400	60	118x200	2010	3.5	5268	429	2.5 - 240
		125x204	2326	4.5	5988	497	2.5 - 240
		130x206	2557	5.5	5884	546	2.5 - 240
		136x209	2858	6.5	6177	611	2.5 - 240

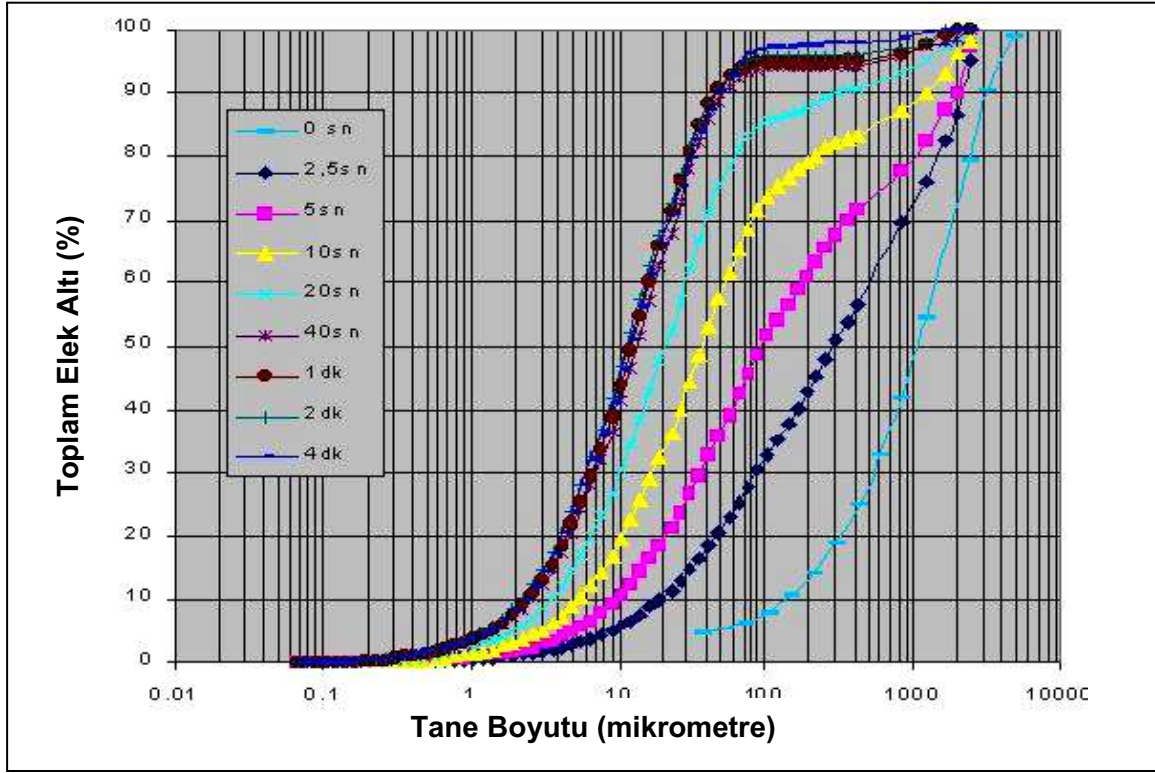
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Karıştırmalı değirmenlerde kullanılan bilya boyutu ürünün inceliğini etkileyen önemli bir işletim parametredir. Bilya boyutunun öğütme verimliliğine etkisinin incelendiği çalışmaların çoğunda, ince bilya kullanılması ile ürün tane boyutunun incelendiği görülmektedir. 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 içerisindeki iri taneleri parçalaması zorlaşmaktadır. Çoğu araştırmacıya göre optimum "bilya/tane boyutu" oranının 5-20 aralığında olduğu belirtilmektedir (Mankosa vd., 1986; Orumwense vd., 1992; Zheng vd, 1996; Dikmen ve Ergün, 2004).

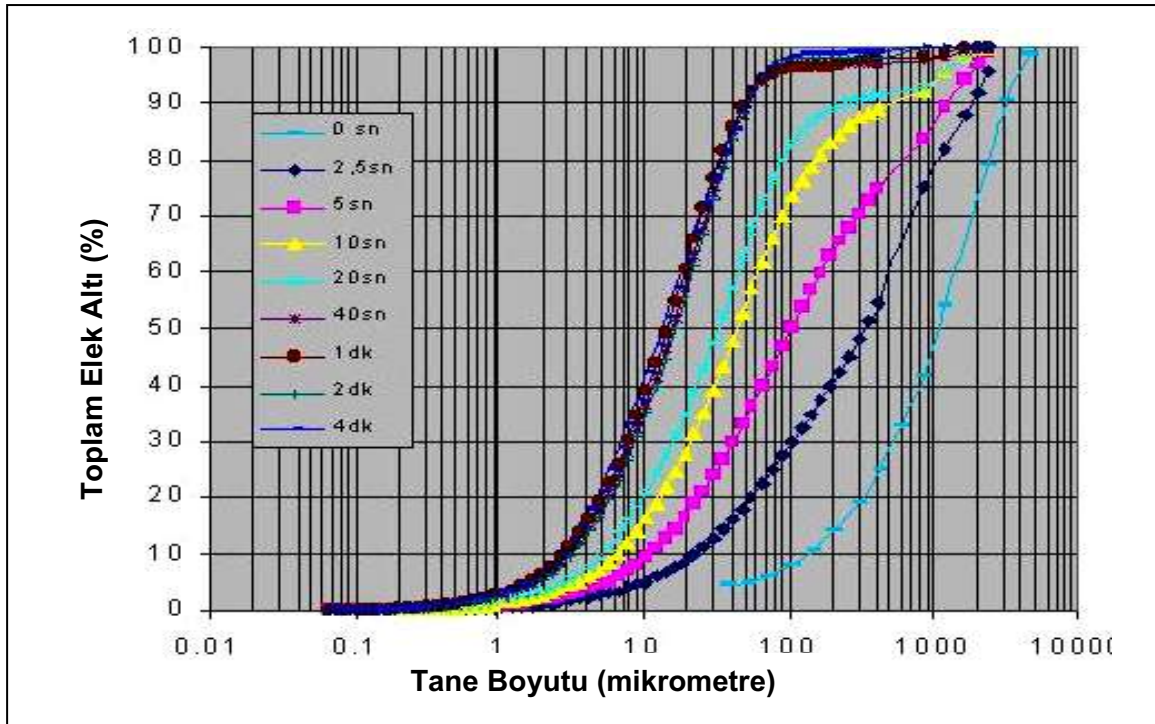
Her bir bilya boyutu (6.5, 5.5, 4.5 ve 3.5 mm) ile farklı zaman aralıklarında (2.5, 5, 10, 20, 40, 60, 120 ve 240 saniye), 1400 dev./dak. karıştırma hızında yapılan öğütmeler sonucunda elde edilen ürünlerin boyut dağılımları Şekil 3-4-5 ve 6'da gösterilmektedir. Şekil 7'de ise öğütme süresine bağlı olarak değişik boyutlu bilyaların kullanılmasıyla elde edilen ürünlerin d_{50} boyutlarının değişimi gösterilmektedir. Şekil 7'den de görülebileceği gibi; 6.5, 5.5, 4.5 ve 3.5 mm çaplı bilyalar ile 60 saniye öğütme sonucunda elde edilen ürünlerin d_{50} boyutları sırasıyla 19, 18, 16 ve 11 μm olmaktadır. 20 saniyelik öğütme sonucunda ise ürünlerin d_{50} boyutları sırasıyla 43, 36, 33 ve 21 μm olmuştur. Buna göre sabit bir öğütme süresinde bilya boyutunun incelenmesiyle elde edilen ürünün tane boyutu da incelenmektedir. Ancak, 60 saniyenin üzerindeki öğütme sürelerinde öğütme verimi dramatik şekilde azalmakta ve özellikle 120 saniyeden sonra taneler neredeyse hiç

öğütülmemektedir. 120 ve 240 saniyelik öğütmeler için elde edilen ürünlerin d_{50} boyutları hemen hemen aynı kalıp, 6.5, 5.5, 4.5 ve 3.5 mm çaplı bilyalar için sırasıyla 18, 17, 15 ve 11 μm bulunmuştur. Bunun nedeni gözleme dayalı olarak açıklanacak olursa, öğütme süresinin artmasıyla (yada tanelerin boyutunun incelenmesiyle) tanelerin birbirine bağlanarak topraklar oluşturması ve öğütme yapan ortamla teması engellemesidir (yastıklama etkisi). Shönert'in (1985) sözünü ettiği diğer bir nedeni de 2.5 μm 'den ince tanelerin elastik davranıştan (molekül bağlarının kopması), plastik davranışa geçmesi (moleküler yapıda yer değiştirme) olarak düşünülebilir. Sonuç olarak, Hardgrove öğütülebilirlik indeks değeri 70 olan bitümlü kömürün karıştırmalı değirmende 3.5 mm çaplı bilyalar ile öğütülmesi durumunda ulaşılabilecek en ince d_{50} boyutu 11 μm , d_{90} boyutu ise 40 μm 'dir. Daha ince boyutlarda öğütme yapabilmek ve öğütme verimliliğini arttırmak için NSF (Naftalin sülfonat formaldehit kondensat) ve PSS (Sodyum poli styrene sülfonat) gibi bazı dağıtıcı kimyasalların öğütme esnasında kullanılması gerekmektedir (Ateşok, vd., 2005).

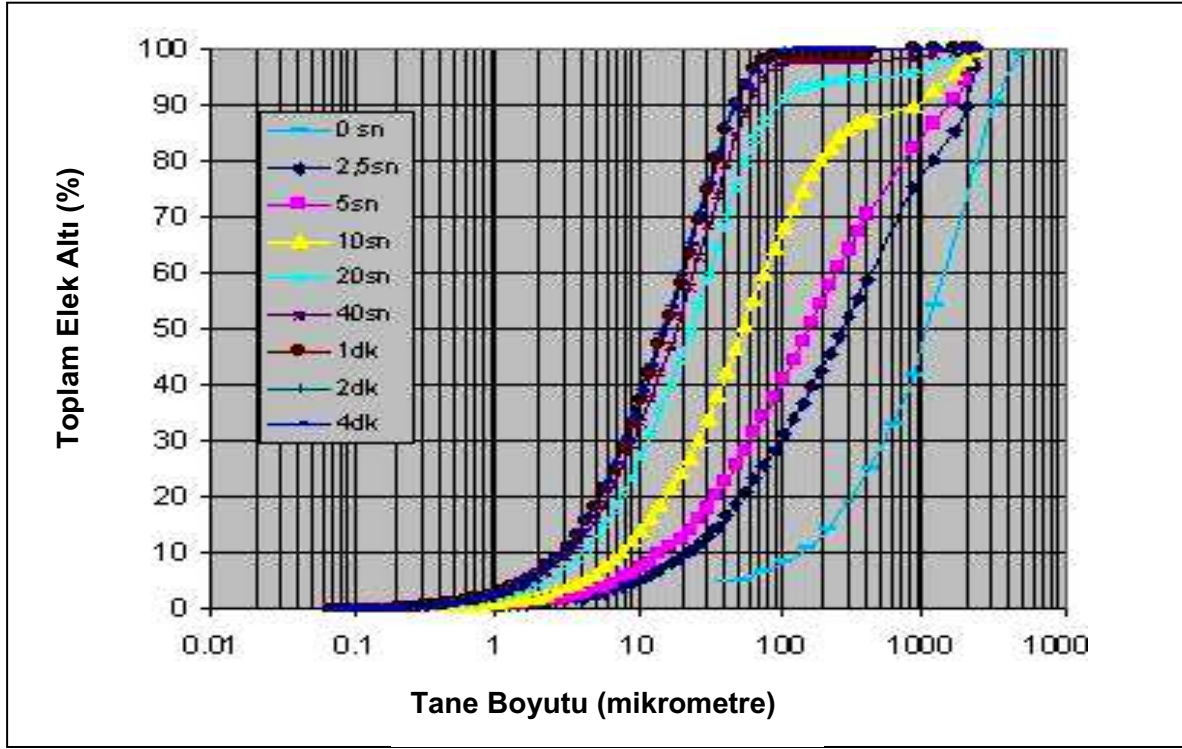
Dikey pinli karıştırmalı değirmenlerde harcanan enerjinin büyük bir bölümü bilya yükünü hareket ettirmek için kullanılır. Buna göre bilya yükü (yada ağırlığı) arttıkça tüketilen enerji miktarı da artacaktır. Ayrıca, iri bilyaların değirmen içerisindeki hareketi ince bilyalara göre daha zor olmaktadır. Başka bir deyişle karıştırıcının hareketi, hareket ettirilen bilya boyutunun artırılmasıyla zorlaşmaktadır. Şekil 8'de bilya boyutuna bağlı olarak değişik öğütme sürelerinde harcanan enerji miktarları gösterilmiştir. Buna



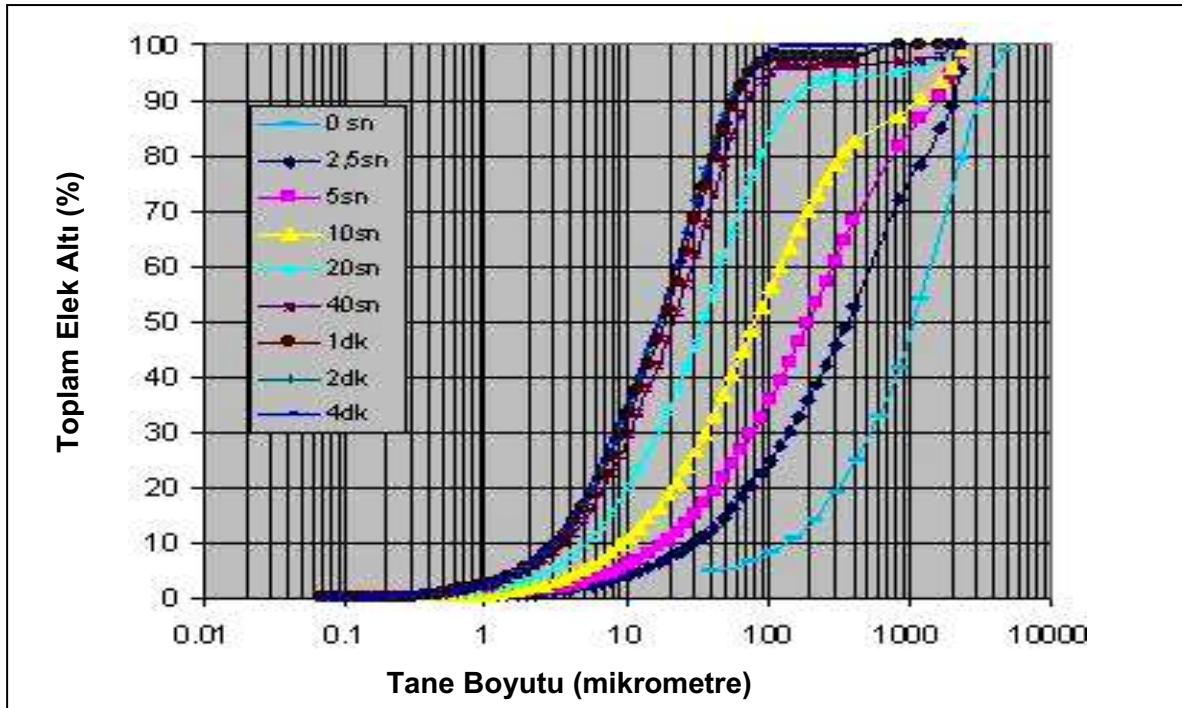
Şekil 3. Öğütücü ortam olarak 3.5 mm'lik bilyaların kullanılması durumunda elde edilen ürünlerin boyut dağılımları (Bilya şarj oranı:%60, Doluluk oranı:%100, Karıştırıcı hızı 1400 dev./dak.)



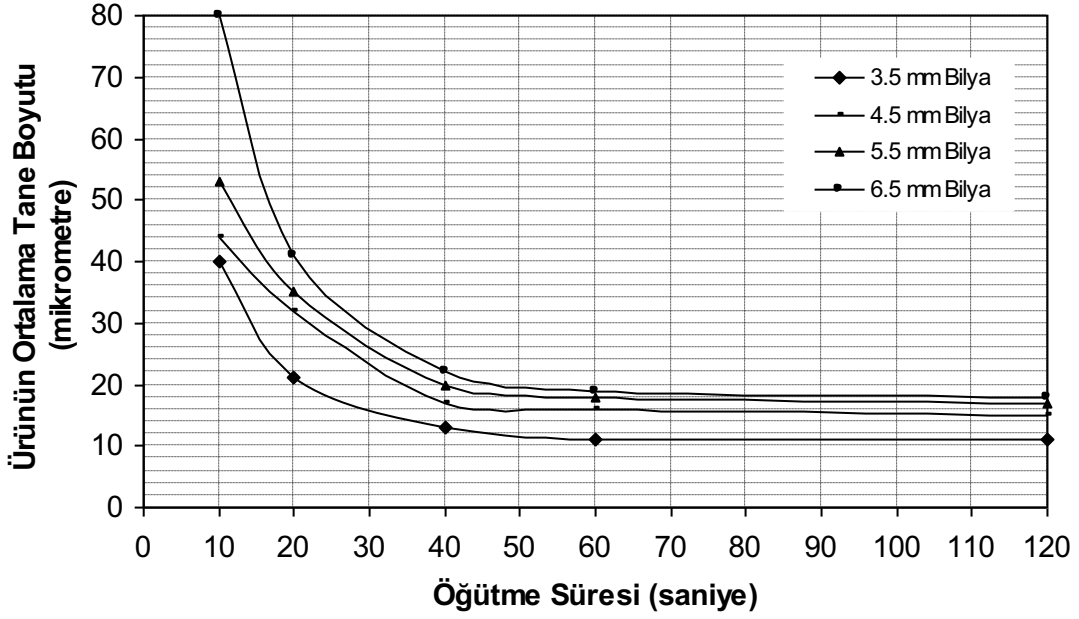
Şekil 4. Öğütücü ortam olarak 4.5 mm'lik bilyaların kullanılması durumunda elde edilen ürünlerin boyut dağılımları (Bilya şarj oranı:%60, Doluluk oranı:%100, Karıştırıcı hızı 1400 dev./dak.)



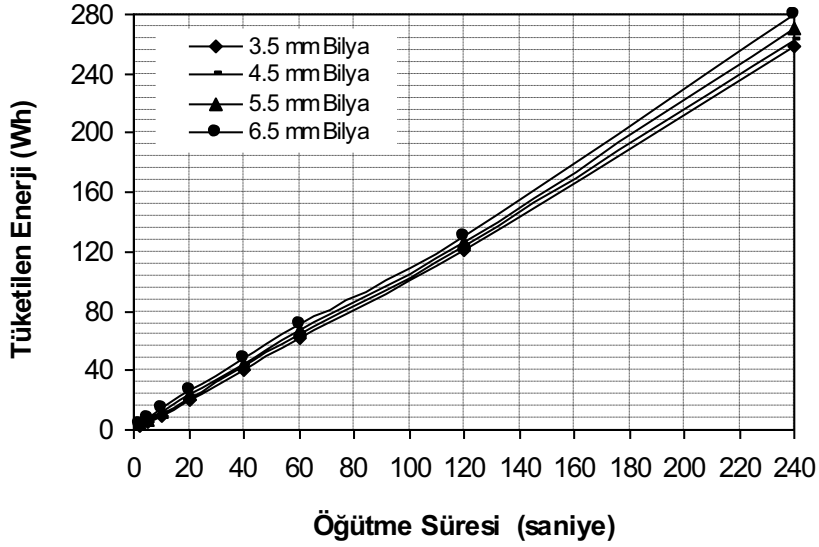
Şekil 5. Öğütücü ortam olarak 5.5 mm'lik bilyaların kullanılması durumunda elde edilen ürünlerin boyut dağılımları (Bilya şarj oranı:%60, Doluluk oranı:%100, Karıştırıcı hızı 1400 dev./dak.)



Şekil 6. Öğütücü ortam olarak 6.5 mm'lik bilyaların kullanılması durumunda elde edilen ürünlerin boyut dağılımları (Bilya şarj oranı:%60, Doluluk oranı:%100, Karıştırıcı hızı 1400 dev./dak.)



Şekil 7. Öğütme süresine bağlı olarak ürünlerin ortalama tane boyutlarının değişimi



Şekil 8. Karıştırmalı değirmende zamana bağlı olarak tüketilen enerji miktarları

göre; 6.5, 5.5, 4.5 ve 3.5 mm çaplı bilyalarla yapılan 60 saniyelik öğütme işlemi sonucunda, tüketilen enerji miktarları sırasıyla 71.2, 67.4, 65.0 ve 62.1 Wh olmaktadır. Yani bilya boyutunun incilmesiyle birim zamanda harcanan enerji miktarı da azalmaktadır. Bu azalmanın nedeni; yukarıda bahsedildiği gibi ince bilyaların değirmen içerisindeki hareketinin iri bilyalara göre daha kolay ve ince bilya yükünün iri bilya yüküne göre daha az olmasıdır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ortalama tane boyutu (d_{50}) 1mm olan Armutçuk bitümlü kömürünün dikey pinli bir karıştırmalı değirmende farklı boyuttaki bilyalarla kuru olarak öğütülmesi araştırılmıştır. Farklı öğütme sürelerinde yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Ortalama boyutları 6.5, 5.5, 4.5 ve 3.5 mm olan çelik bilyalarla yapılan 60 saniyelik öğütme işlemi sonucunda elde edilen ürünlerin ortalama tane boyutları sırasıyla 19, 18, 16 ve 11 µm bulunmuştur. Yani, kullanılan bilya boyutunun inceliğiyle elde edilen ürünün tane boyutu da incelmıştır.

2. En ince ürünü veren 3.5 mm çaplı bilyalar ile yapılan 2.5, 5, 10, 20, 40, 60, 120 ve 240 saniyelik öğütmeler sonucunda, sırasıyla ürünlerin d_{50} boyutları 300, 95, 36, 21, 13, 11, 11, ve 11 µm olmaktadır.

3. Öğütme süresinin 60 saniyeden daha fazla olması durumunda, değirmenin verimi her bilya boyutunda dramatik şekilde azalmıştır. Hatta, 3.5 mm çaplı bilyalar ile 60, 120 ve 240 saniyelik öğütmelerde benzer ürün inceliği ($d_{50} \sim 11 \mu\text{m}$) elde edilmiştir. Bu durumda yastıklama etkisini bertaraf etmek ve daha ince boyutlara öğütme yapabilmek için bazı dağıtıcı kimyasalların kullanılması faydalı olacaktır.

4. Karıştırmalı değirmende yapılan öğütme deneylerinden elde edilen en ince ürünün d_{50} boyutu 11 µm, d_{80} boyutu ise 31 µm'dir. Bu incelik 3.5 mm'lik çelik bilyalarla 60 saniyelik öğütme süresi sonunda elde edilmiş olup, harcanan özgül enerji miktarı 144 kWh/t'a isabet etmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmadaki yardım ve katkılarından dolayı Maden Yüksek Mühendisi Öykü Bilgin'e çok teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Ateşok, G., Mütevelioğlu, N.A., Dinçer, H. ve Boylu, F., 2005; "Bazı Dağıtıcı Kimyasalların Kömürlerin Öğütülebilirliğine Etkisi", Madencilik, **44**, (2), 25-35.

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.

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

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.

Önal, G., Doğan, Z. ve Yüce, H., 1992; "Kömür Tüketimi ve Termik Santraller" Türkiye 8. Kömür Kongresi, 501-508, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Zonguldak.

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

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

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

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.

Orumwense, O.A. 1992; "The Kinetics of Fine Grinding in an Annular Ball Mill", **73**, 101-108.

Özbayoğlu, G. ve Mamurekli, M., 1988; "Zonguldak Kömürlerinden Süper Temiz Kömür Üretimi" Türkiye 6. Kömür Kongresi, 159-169, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Zonguldak.

Schönert, K., 1986; "Advances in the Physical Fundamentals of Comminution, Advances in Mineral Processing" Proceeding of a Symposium Honoring Nathaniel Arbiter on His 75th Birthday, Ed. P.Somasundaran, Littleton, 28.

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

Yavuz, R. ve Küçükbayrak, S., 1998; "Kömür-Su Karışımlarının Hazırlanması ve Yakılması", Kömür Kitabı, Editör: O. Kural, 435-451.

Zheng, J., Harris, C.C. ve Somasundaran, P., 1996; "A Study on Grinding and Energy Input in Stirred Media Mills", Powder Technology, **86**, 171-1