

Laboratuvar Ölçekli Karıştırmalı Değirmende Seramik Atıklarının Kırılma Davranışı

Erdal KARA *1, A. Dilek CUHADAROĞLU¹, İhsan TOROĞLU²

*1Bülent Ecevit Üniversitesi, Gökçebey MMÇ MYO, El Sanatları Bölümü, Zonguldak

¹Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

²Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

(Alınış / Received: 20.06.2018, Kabul / Accepted: 13.02.2019)

Anahtar Kelimeler

Öğütme,
kırılma davranışı,
seramik atığı,
karıştırmalı değirmen

Özet: Bu çalışmada, seramik atıklarının karıştırmalı değirmende öğütülmesinde karıştırma hızına, öğütme süresine ve numunenin tane boyutuna bağlı olarak kırılma davranışı incelenmiştir. Seramik atıklarının karıştırmalı değirmende öğütülmesinde; çalışılan iri dar tane boyut aralıklarında seramik atığının kırılma hızı, tane boyutuna bağlı olarak farklılık sergilemiştir. Tane boyutu büyüdükçe kırılma hızının yavaşladığı, iri dar tane boyut aralıklarında ilk 1 dakika içinde hızlı başlayan kırılma olayının, öğütme süresindeki artışla değişerek kırılma hızının azaldığı belirlenmiştir. Yaklaşık 1 dakikalık öğütme süresi sonunda kırılma hızlarının yavaşladığı belirlenen -2360+1700 µm ve -1180+850 µm boyut aralığında kırılma davranışı doğrusal değildir. -425+300 µm boyut grubunda kırılma davranışı doğrusal olup, bu tane boyutunda diğer iki boyut grubuna göre daha hızlı bir kırılma olayı gerçekleşmiştir.

Breakage Behavior of Ceramic Waste in a Laboratory Scale Stirred Media Mill

Keywords

Grinding, breakage
behavior, ceramic waste,
stirred media mill

Abstract: In this study, the effect of grinding time, stirring speed and breakage behavior depending on the particle size of the sample was investigated on ceramic wastes ground in stirred mill. Grinding ceramic wastes in stirred mill; In the narrow particle size groups studied, the breakage speeds of the ceramic wastes were size dependent. Slowing breakage rate was observed by increasing feed size, in the first 1 minute in coarser size fractions fast rates of breakages at beginning of grinding gradually decrease by increasing time. At the end of about 1 minute of grinding time, the breakage behavior was not linear in the -2360 + 1700 µm and -1180 + 850 µm size groups, which determined that the breakage rates slow down. The breakage behavior was linear in the -425 + 300 µm size group and in this particle size breakage rates faster than the other two size groups.

1. Giriş

Seramik, inorganik malzemelerin sinterlenmesi sonucu elde edilen mukavemetli yapılara verilen genel isimdir. Seramik sağlık gereçleri; istenilen kalitedeki kil, kaolen, kuvars ve feldspat gibi inorganik maddelerin belirli oranlarda karıştırılarak öğütülmesi, akışkan bir çamur haline getirilmesi ve daha sonra bu çamurun uygun yöntemlerle şekillendirilip, 1200-1250°C'de pişirilerek sertleştirilmesi suretiyle elde edilen ve su emme değeri %0,5'in altında olan ürünlerdir [1]. Seramik sektöründe, üretim süreci sonunda elde edilen nihai ürünlerden kalite kontrolünden geçemeyen üretim hatalı/defolu olanlar, kabaca kırılmış halde ıskarta olarak depolanmaktadır. Bu ıskarta ürünlerin, bertarafı ya da geri kazanılması gerekmektedir.

Türlerine göre ayrıldıktan sonra seramik malzemeler, kullanılacağı sektörde boyut küçültme (kıırma ve öğütme) işlemlerinin ardından değişik oranlarda üretim reçetesine dâhil edilmektedir. Sektörde öğütme işlemleri için bilyalı değirmenler kullanılmaktadır. Bilyalı değirmende % 95'i -75 µm boyutuna indirilen malzeme istenilen oranda reçeteye dâhil edilerek kullanılır [2].

Gelişen teknoloji ile beraber seramik, boya, gıda, plastik ve kozmetik gibi farklı endüstri kollarında çok ince (<10 µm) veya süper ince (<1 µm) olarak adlandırılan boyutlardaki malzemeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır [3]. Çünkü günlük yaşamda kullandığımız plastik, boya, mürekkep, diş macunu, tıbbi ürünler, kağıt, beton ve kompozit malzemelerin, kozmetik ürünlerin vb. pek çok ürünün üretiminde

inorganik mineral dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Bu noktada yaklaşık %30 oranında dolgu minerali (kalsit) içeren fotokopi kağıdı örnek verilebilir. Sektöre bağlı olarak mineral dolgu maddelerinin hazırlanmasında mikron altı ve nano boyutlu tanelerin hazırlanmasında malzemelerin çok ince boyutlara kadar öğütülmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak da boyut küçüldükçe artan özgül yüzey alanı ve dayanım dolayısıyla, boyut küçültmede yeni uygulamalara yönelik çalışmalar artmaktadır [4].

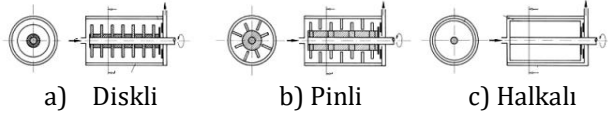
Madencilik sektöründe ise tenörü yüksek cevher yataklarının tükenmesi nedeniyle düşük tenörlü ve serbestleşme boyutu çok küçük olan cevherler ve de tesis atıkları ekonomik değer kazanmaya başlamıştır. Bunların değerlendirilebilmesi için çok ince boyutlara öğütme yapmak gerekmektedir. Buna karşın öğütme, enerjinin en yoğun ve verimsiz olarak tüketildiği birim işlemdir. Bir cevher hazırlama tesisinde mineral tanelerinin serbestleşmesini sağlamak için uygulanacak kırma ve öğütme işlemleri için gerekli enerji, işletme maliyetlerinin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır.

Boyut küçültme işlemlerinde tane boyutu küçüldükçe, toplam yüzey alanının artmasına bağlı olarak toplam yüzey enerjisi de arttığından, boyutun küçültülebilmesi için bu enerjiyi yenecek miktarda enerji harcanması gerekmektedir. Ayrıca, küçük taneler içinde bulunan süreksizlikler, tabakalanma gibi zayıflıklarla karşılaşma olasılığının çok azalmasına bağlı olarak tanelerin kırılmaya karşı mukavemetlerindeki artış, boyut küçültmede ton başına tüketilen enerji miktarlarında aşırı artışlara neden olmaktadır. Basınç ve kesme kuvvetleri, küçük tanelerin ufanmasında gereklidir. Çarpma ve aşınma kuvvetlerinin baskın olduğu bilyalı değirmenlerde öğütme iri boyutta kalmakta [5], ince öğütme için konvansiyonel bilyalı değirmenlerin kullanımında problemler ortaya çıkmaktadır. Bilyalı değirmenlerde öğütmede değirmen dönüş hızı kritik hızından daha düşük olmak zorundadır. Kritik hızın üzerindeki hızlarda çalıştırılması durumunda öğütülecek cevher ve öğütücü ortamdan oluşan tüm şarj değirmen gövdesiyle birlikte dönmekte ve öğünme işlemi tam manasıyla gerçekleşmemektedir. Diğer taraftan düşük değirmen hızları değirmende düşük güç yoğunluğu ile sonuçlanmaktadır. İnce öğütme uygulamaları için düşük güç yoğunlukları ise mineral endüstrisinin gerektirdiği yüksek üretim kapasitelerini karşılayamamaktadır. Bilyalı değirmenlerde malzemenin 75 µm altına öğütülmesinde enerji tüketimi hızla yükselirken, 30 µm altı öğütmede bilyalı değirmen kullanımı artık ekonomik olmaktan çıkmaktadır. Bilyalı değirmenlerde, 75-100 µm altındaki boyutlara yapılan öğütme işleminde öğütme verimi oldukça azalmakta ve öğütmede harcanan enerjinin önemli bir bölümü boyut küçültme işinde kullanılmadan ısı ve ses olarak kaybedilmektedir [6, 7, 8, 9, 10]. Aktarılan ortam tipi bilyalı değirmenlerde kullanılan en küçük bilya boyutunun 20-25 mm olmasından

dolayı, değirmen içindeki çarpma hareketlerinden öğütülen cevhere aktarılabilecek enerji, küçük boyutlarda küçültme için yeterli olmamaktadır. Ekonomik öğütme boyutunun 100 mikron kadar olduğu belirtilen bilyalı değirmenlerde 100 mikron altına yapılan öğütme işlemlerinde spesifik enerjinin üstel olarak artış gösterdiği [5] ve öğütme verimliliklerinin çok düşük olduğu belirtilmesine rağmen, çok sayıda cevher hazırlama tesisinin yeniden öğütme devresinde halen kullanılmaktadır.

Karıştırmalı değirmen, sabit bir silindirik gövde içerisinde dönerek karıştırma işini yapan bir rotor ve öğütücü ortam olarak kullanılan bilyalardan oluşmaktadır. Aşırı ısınmayı önlemek için etrafında bir su ceketii bulunmaktadır. Rotor üzerine belirli aralıklarla yerleştirilmiş çubuk veya diskler yardımıyla, değirmen içinde bulunan öğütücü ortam hareket ettirilerek öğütme işlemi gerçekleştirilmekte, yaş veya kuru öğütme yapılabilmektedir. Öğütülecek malzemenin tane boyutu dağılımı ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak farklı tipte ve boyutta öğütücü ortam kullanılmaktadır. Kullanılabilecek öğütücü ortam, çelik veya seramik bilya, kum, çakıl taşı, izabe cürufu, veya otojen öğütme malzemesi olabilirken, boyutu 0,2 ile 8 mm arasında değişmektedir [6]. Karıştırmalı değirmenlerde öğütücü ortam, aktarılan ortam tip değirmenlerdeki değirmen gövdesinin dönüşü ile belirli yüksekliğe taşınan öğütücü ortamın yaptığı serbest düşme hareketini (katarakt hareket) yapmadığı için etki oluşmaz [11]. Bilyalar, değirmen hacminin %50-85'ini dolduracak kadar şarj edilmektedir [12, 13, 14]. Karıştırmalı değirmenlerde kullanılan öğütücü ortam boyutunun etkisinin incelendiği çalışmalarda küçük bilya kullanılması durumunda elde edilen ürünün tane boyutunun incelendiği, bu eğilimin besleme tane boyutu ile orantılı olarak belli bir bilya boyutuna kadar devam ettiği, daha küçük boyutlu bilya kullanımı durumunda, çarpışma anındaki açığa çıkan enerjideki azalma nedeniyle bu küçük boyutlu bilyaların beslenen cevherdeki iri taneleri kavraması ve parçalamasındaki zorlaşma nedeniyle verimin düştüğü belirtilmektedir [15]. Diğer bir çalışmada karıştırma hızındaki artışla kırılma hızının önemli ölçüde arttığı fakat, bilya boyutuna bağlı olarak kırılma hızındaki artışın daha sınırlı olduğu belirtilmekte ve büyük bilya kullanımında enerji tüketiminin önemli ölçüde arttığı, belirli bir bilya boyutundan daha büyük bilyaların kullanımı durumunda öğütme veriminin düştüğü vurgulanmaktadır [16]. Karıştırmalı değirmenlerde kullanılan öğütücü ortam şeklinin öğütme üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada [17] küresel olmayan öğütücü ortamların öğütme performansı olumsuz olduğu, karıştırıcıdaki aşınmaların daha fazla olduğu belirtilmektedir. Karıştırmalı değirmenler, karıştırıcı tipine göre; diskli, pinli ve halkalı olmak üzere üç şekilde adlandırılır Şekil 1. Bunlarda enerji, öğütme ortamı ya da ürün üzerine diskli ve halkalı karıştırıcılarda çekme kuvveti (adhezyon) ile pinli

karıştırıcıda ise yer değiştirme kuvveti ile aktarılır. Pinli karıştırıcıda oluşan güç yoğunluğu diskli karıştırıcıdan daha fazla iken, en büyük güç yoğunluğu halkalı karıştırıcıda elde edilmektedir.



Şekil 1. Farklı karıştırıcı geometrileri [18].

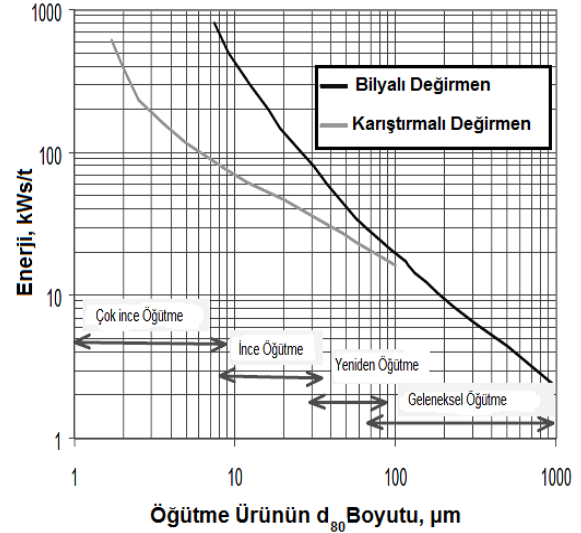
Süreç içerisinde çeşitli ekipmanları değiştirilerek farklı tiplerde karıştırma değirmenleri dizayn edilmiştir. Karıştırma değirmenleri gövdenin yatay (Yatay ISAMill) veya dikey (Dikey Sala Agitated Mill-SAM) konumlanmış olmasına göre sınıflandırılmaktadır. Svedala detritör, ANI-Metsoprotech SVM değirmeni diğer karıştırma değirmen örnekleridir. Maxmill olarak adlandırılan değirmen tipinde ise gövde de dönmekte ve gövde içinde bulunan bir plaka yardımıyla malzemenin akışı değiştirilmektedir [19]. Bu değirmenlerde ortak özellik ince ve ultra ince öğütmede gerekli enerjiyi sağlamak için yüksek hızlı karıştırma değildir. Karıştırma değirmenleri içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarı çok yüksek olup, bu değirmenlerde aktarma hareketi için değirmen içinde büyük hacimde boş zon gerekmez, değirmen hacminin büyük kısmına öğütücü ortam ve öğünecek malzeme şarj edilir [20]. Bu nedenle de özgül enerji tüketimi bilyalı değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça düşüktür [3]. Tablo 1’de farklı değirmenlerde birim hacimde açığa çıkan enerji yoğunlukları (kW/m^3) ve öğütücü ortam yüzey alanlarının karşılaştırması yer almaktadır [21].

Tablo 1. Birim hacimde açığa çıkan enerji yoğunlukları (kW/m^3) ve öğütücü ortam yüzey alanlarının karşılaştırılması.

Değirmen	Enerji (kW/m^3)	Bilya Boyutu (mm)	Yüzey Alanı (m^2/m^3)
Bilyalı	20	20	120
Kule Değ.	40	12	200
IsaMill	300	1	3600

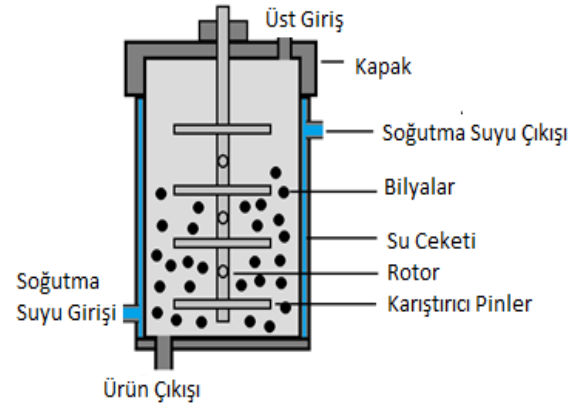
Not: Bilyalı Değirmen: 5,6 m(çap)x6,4 m(uzunluk)
Kule Değirmen: 2,5 m(çap)x2,5 m (yükseklik)
IsaMill: M2000 mill, 1,1 MW motor gücü

Bu karşılaştırmada da görülmektedir ki; karıştırma değirmeninde açığa çıkan enerji yoğunluğu bilyalı değirmenden çok daha yüksektir ve sabit değirmen gövdesi içinde dönerek karıştırma işi yapan rotor, enerjiyi direkt ve etkili bir şekilde kırılması için tanelere aktarır [20]. Minimum enerji tüketimiyle maksimum boyut küçültmeye ulaşım hedeflenerek yapılan çalışmalarda, öğütme işleminde boyuta bağlı olarak enerji tüketimindeki ilişki araştırılmıştır. Karıştırma değirmenleri ve bilyalı değirmenlerde, tane boyutu ile enerji tüketimi ilişkisi Şekil 2’de verilmektedir [8].



Şekil 2. Karıştırma değirmenleri ve bilyalı değirmenlerde tane boyutu ile enerji tüketiminin değişimi.

Şekil 2’de görüleceği üzere, bilyalı değirmenlerle 100 μm altına yapılan öğütme işlemlerinde aşırı enerji tüketimi nedeniyle öğütme işlemi ekonomik olmaktan çıkmaktadır. İlk endüstriyel karıştırma değirmenleri, ince öğütme yapan değirmenlere ihtiyacın artmasıyla birlikte 1950’lerde kullanılmaya başlanmıştır [8]. Bu ekipmanlar, düşük hızlarda çalışmakta ($<6 \text{ m/sn}$) ve aşındırıcı (atritör) olarak adlandırılmakta ve çoğunlukla, flotasyon öncesinde mineral yüzeylerinin temizlenmesi amacıyla kullanılmaktaydılar. Süreç içerisinde yüksek karıştırma hızına sahip değirmenler geliştirilmiştir [3, 22, 12]. Şekil 3’de dikey karıştırma değirmeni kesiti yer verilmiştir.



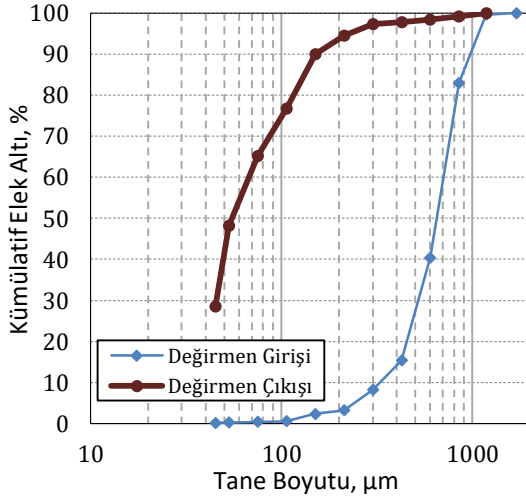
Şekil 3. Dikey karıştırma değirmeni kesiti.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme

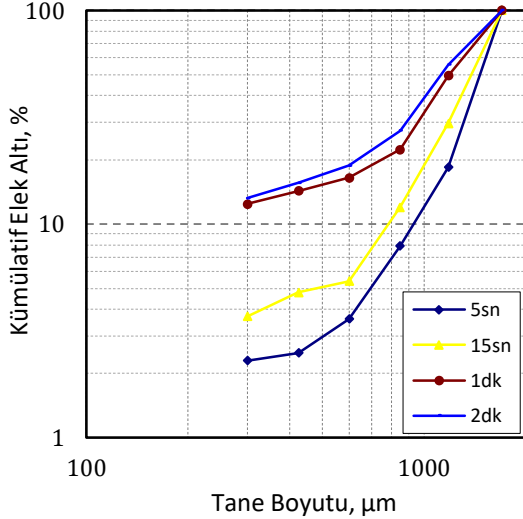
Seramik sağlık gereçleri üreten fabrikalarda kırık ya da defolu ürünler, ıskarta olarak stoklanmakta ve talep olması durumunda atık olarak pazarlanmaktadır. Bu atıklar, ilgili üretim yapan sektörde öğütülerek belirli oranlarda hammadde yerine ikame edilebilmektedir. Bu atıklar, çeneli kırıcıda kırılarak stoklanmakta, kullanım aşamasında

bilyalı değirmende öğütülerek, belirli oranlarda üretim reçetelerine ilave edilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin alındığı fabrikada, mevcut bulunan bilyalı değirmen kesikli çalışmakta, bilyalı değirmende yaklaşık olarak 2-2,5 saat öğütme sonrası boyut kontrolü yapılarak öğütme ürününün %60-65'i 75 µm altına geçecek şekilde öğütülmektedir. Fabrikada bilyalı değirmene beslenen ve öğütme sonrası değirmen çıkışından alınan numunelerin boyut dağılımları Şekil 4'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere bilyalı değirmene beslenen malzemenin d_{50} boyutu 655 µm, değirmen çıkışından alınan öğütülmüş ürünün d_{50} boyutu 56 µm dur.

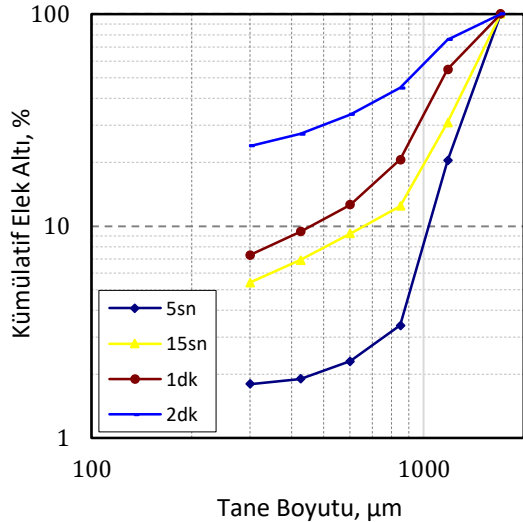


mümkün olmayacağına karar verilerek, 1496 dev/dak karıştırma hızı ile çalışmaya son verilmiştir. 373 dev/dak ve 598 dev/dak karıştırma hızları ile yapılan öğütme deneylerinde farklı öğütme süreleri sonunda alınan ürünlerinin boyut dağılımları Şekil 5 ve 6'da yer almaktadır.

Öğütmede, karıştırma hızı arttıkça harcanan enerji miktarı artmakta, alınan ürünün d_{50} boyutu küçülmektedir. Deneylerde; 373 dev/dak karıştırma hızı ve 2 dakika öğütme süresi sonunda 17,8 kWs/t, 598 dev/dak karıştırma hızı ve 2 dakika öğütme süresi sonunda 23,5 kWs/t enerji tükettiği hesaplanmıştır.



Şekil 5. 373 dev/dak karıştırma hızında alınan ürünlerin elek altı grafikleri.



Şekil 6. 598 dev/dak karıştırma hızında alınan ürünlerin elek altı grafikleri.

Değirmenin birim hacminde harcanan enerjinin artması, istenilen ürün boyutuna ulaşmak için gerekli öğütme süresinin azalmasına neden olmaktadır.

- 373 dev/dak karıştırma hızıyla yapılan öğütmede alınan ürünün d_{50} boyutu; 1 dakika öğütme süresi sonunda 1185 µm, 2 dakika öğütme süresi sonunda 1115 µm iken,

- 598 dev/dak karıştırma hızıyla yapılan öğütmede alınan ürünün d_{50} boyutu; 1 dakika öğütme süresi sonunda 1135 µm, 2 dakika öğütme süresi sonunda 905 µm'dir.

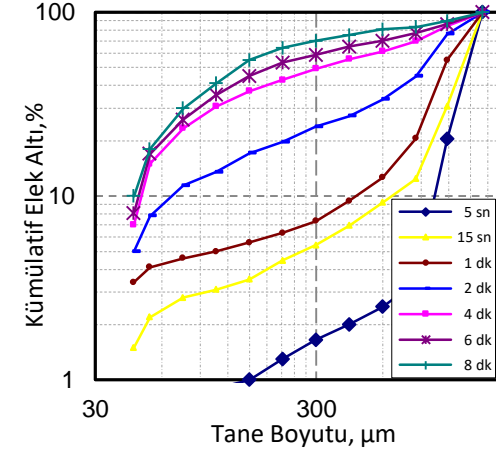
Bu durum, 598 dev/dak karıştırma hızıyla 2 dakika öğütme süresi sonunda ulaşılan 905 µm boyutuna, 373 dev/dak karıştırma hızı ile ulaşabilmek için daha fazla öğütme süresine ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

3.2. Öğütme Süresinin Kırılma Davranışına Etkisi

Öğütme süresinin kırılma davranışı üzerindeki etkilerinin incelendiği deneyler, aşağıda belirtilen koşullarda yapılmış, 5 sn, 15 sn, 1, 2, 4, 6 ve 8 dakika olmak üzere toplam 8 farklı süre sonunda alınan ürünlerin boyut dağılımları belirlenerek elek altı grafikleri (Şekil 7) çizilmiştir.

Koşullar:

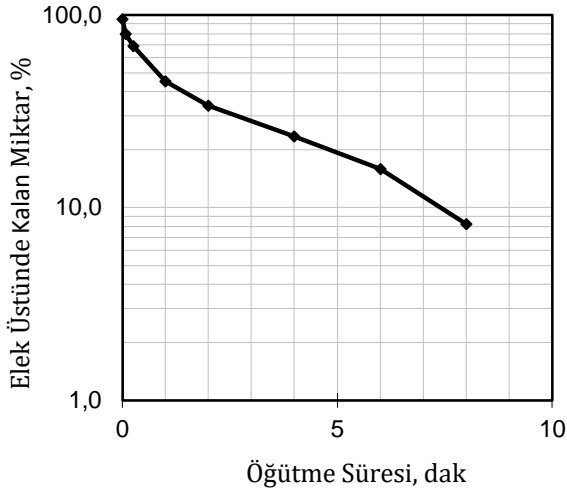
- Numune Boyutu : -2360+1700 µm
- Numune Miktarı : 507,5 gr
- Öğütücü Ortam Boyutu : 6 mm
- Öğütücü Ortam Miktarı : 5590 gr
- Karıştırma Hızı : 598 dev/dak



Şekil 7. Farklı öğütme süresi sonunda alınan ürünlerin elek altı grafikleri.

Şekil 7'de öğütme süresinin artışına bağlı olarak elde edilen ürünlerin tane boyutunun incelendiği görülmektedir. d_{50} boyutu; 1 dakika öğütme süresi sonunda 1135 µm, 4 dakika öğütme süresi sonunda 315 µm, 8 dakika sonunda 132 µm'dir.

Farklı sürelerde yapılan öğütme işlemlerinde kırılma davranışının incelenebilmesi için; öğütme süresine karşın tane boyut grubunun tutan elek üzerinde kalan miktarı grafik halde çizilmiş ve Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Öğütme süresine bağlı olarak kırılma davranışı.

-2360+1700 μm dar tane boyut grubu ile farklı öğütme süreleri sonunda elde edilen sonuçlara göre, kırılma davranışı yaklaşık 1 dakika sonunda doğrusallıktan uzaklaşarak sapma göstermekte, kırılma hızı azalmaktadır. Bu duruma öğütme süresinin artışı ile ince tanelerin yastıklama etkisi oluşturarak, iri tanelerin etrafını sarması ve öğütmeyi olumsuz yönde etkilemiş olmasının neden olduğu düşünülmektedir. Bu olumsuzluk nedeniyle 1 dakika sonunda birinci dereceden doğrusal kırılma davranışından uzaklaşmakta, kırılma hızı azalmaktadır.

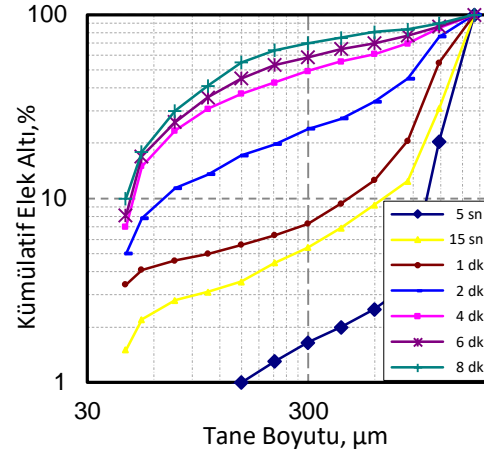
3.3. Tane Boyutunun Kırılma Davranışına Etkisi

Seramik atığının karıştırmalı değirmende öğütülmesinde tane boyutunun etkisini incelemek için atık numunesi; -2360+1700 μm , -1180+850 μm ve -425+300 μm dar tane boyut aralıklarında olmak üzere üç farklı boyut grubunda hazırlanmıştır. Deney koşulları aşağıda verilmektedir. Her bir öğütme süresi sonunda alınan ürünlerin boyut dağılımları belirlenerek Şekil 9, 10 ve 11'de sunulmuştur.

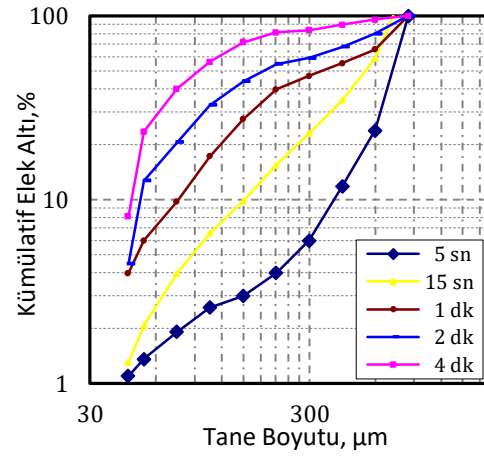
Koşullar:

Numune Boyutu : -2360+1700 μm
 -1180+850 μm
 -425+300 μm

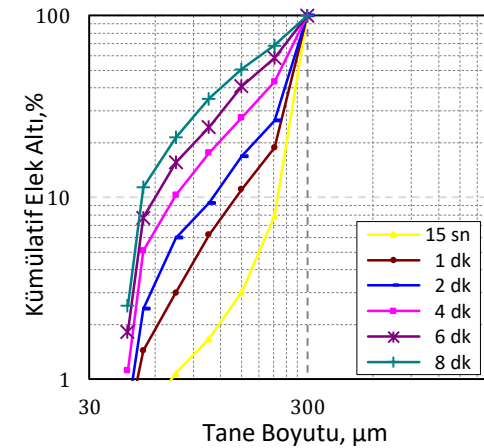
Numune Miktarı : 475 gr
 Öğütücü Ortam Boyutu : 6 mm
 Öğütücü Ortam Miktarı : 5590 gr
 Karıştırma Hızı : 598 dev/dek



Şekil 9. -2360+1170 μm dar tane boyut grubu öğütme ürünlerinin elek altı grafikleri.



Şekil 10. -1180+850 μm dar tane boyut grubu öğütme ürünlerinin elek altı grafikleri.



Şekil 11. -425+300 μm dar tane boyut grubu öğütme ürünlerinin elek altı grafikleri.

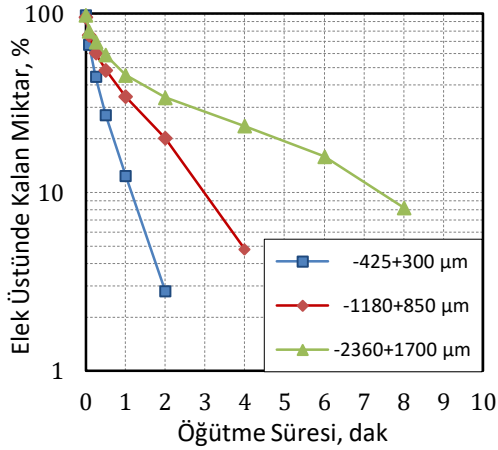
Farklı boyut gruplarının, öğütme sürelerine ait d_{50} değerleri Tablo 2 de verilmektedir.

Tablo 2. Boyut gruplarına ait ürünlerin d_{50} değerleri

Boyut	d_{50}		
	1 dak	2 dak	4 dak
-2360+1170 μm	1135 μm	905 μm	330 μm
-1180+850 μm	368 μm	300 μm	95 μm
-425+300 μm	270 μm	240 μm	220 μm

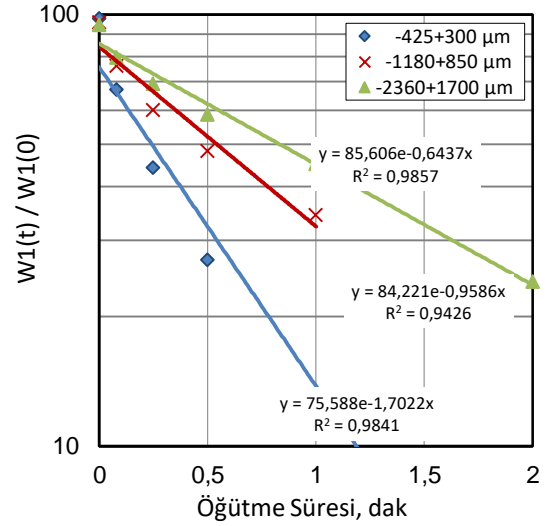
Tablo 2 incelendiğinde -425+300 μm dar tane boyut grubu ile 1 dakika öğütme süresi sonunda ulaşılan d_{50} boyutuna (270 μm 'a), -1180+850 μm boyut grubunda yaklaşık 2 dakikalık öğütme sonunda, -2360+1170 μm boyut grubunda ise 4 dakikadan daha uzun süreli bir öğütme sonunda ulaşılabileceği görülmektedir.

Tane boyutunun kırılma davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacı ile yapılan öğütme işlemlerinde kırılma davranışının incelenmesi için; her bir öğütme süresine karşın, tane boyut grubunun tutan elek üzerinde kalan miktarları grafik halde çizilmiş ve kırılma davranışı grafikleri olarak Şekil 12'de sunulmuştur.

**Şekil 12.** İri dar tane boyut aralığına bağlı olarak kırılma davranışları.

Şekil 12'de çalışılan tane boyutu büyüdükçe kırılma hızının yavaşladığı görülmektedir. -2360 +1700 μm ve -1180+850 μm boyut aralıklarında kırılma davranışı doğrusal değildir. Şekilde görüldüğü üzere bu iki boyut grubunda yaklaşık 1 dakikalık öğütme süresi sonunda kırılma hızları yavaşlamaktadır. Değirmen koşulları veya malzemenin özelliklerinden dolayı, bazı malzemeler için birinci derece öğütme kinetiğinden sapmalar olabilmektedir. Bunun iki nedeni olabilir. Birincisi, öğütme zamanı arttıkça değirmende biriken ince malzemelerin yastıklama yaparak iri malzemelerin kırılmasını engellemesidir. Genellikle ince kuru öğütmede ve viskozitesi yüksek yaş öğütmede görülen bu olaya ortam etkisi denilmektedir. İkincisi ise, öğütülecek malzeme tane boyunun bilya çapından çok büyük olması durumunda normal olmayan kırılma bölgesinde oluşan sapmalardır. Bu durumda iri taneler bilyalar tarafından kavranamamakta ve malzemenin bir

miktarı nispeten daha zayıf, bir miktarı da daha dayanıklı malzeme gibi davranmaktadır [25, 26, 27, 28, 29]. -2360+1700 μm boyut grubunda gerçekleşen kırılma hızı, -1180+850 μm boyut grubunun kırılma hızından daha küçüktür. -425+300 μm boyut grubu kırılma davranışı doğrusal olup, diğer iki boyut grubuna göre daha hızlı bir kırılma olayı gerçekleşmiştir. Kırılma davranışının değerlendirilmesi için kırılmanın doğrusal formda gerçekleştiği süreler dikkate alınarak çizilen birinci derece kırılma davranışı grafiği Şekil 13'de verilmiştir.

**Şekil 13.** Tane boyutuna bağlı olarak birinci derece kırılma davranışı.

Şekil 13'da görüldüğü üzere özgül kırılma hızları;

- -2360+1700 μm boyut grubunda: 0,6437
- -1180+850 μm boyut grubunda: 0,9586
- -425+300 μm boyut grubunda: 1,7022

olarak gerçekleşmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Seramik atıklarının karıştırmalı değirmende öğütülmesinde; karıştırma hızı, öğütme süresi ve tane boyutunun kırılma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Karıştırma hızının artırılması, tanelerin ve öğütücü ortam olarak kullanılan bilyaların çarpışma hızlarının artmasına neden olmakta bunun sonucunda da doğal olarak ürünün inceliği artmaktadır. Belirli bir karıştırma hızı ile belirli bir öğütme süresi sonunda ulaşılan ürün boyutuna, daha düşük karıştırma hızı ile daha uzun süreli öğütme ile ulaşılmaktadır.

Öğütme süresinin kırılma davranışı üzerindeki etkilerinin incelendiği deneyler sonucunda boyuta bağlı olarak, kırılma hızının yaklaşık 1 dakika sonunda doğrusallıktan uzaklaşarak sapma gösterdiği, kırılma hızının yavaşladığı görülmüştür. Öğütme süresindeki artış ile artan ince tanelerin yastıklama etkisi oluşturduğu ve iri tanelerin etrafını sararak öğütmeyi olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir.

Tane boyutunun kırılma davranışı üzerindeki etkisinin incelendiği deneyler sonucunda, tane boyutu büyüdükçe kırılma hızının yavaşladığı, iri dar tane boyut aralıklarında ilk 1 dakika içinde hızlı başlayan kırılma olayında hızın, öğütme süresindeki artışla birlikte değişerek azaldığı belirlenmiştir. Yaklaşık 1 dakikalık öğütme süresi sonunda kırılma hızlarının yavaşladığı belirlenen -2360+1700 µm ve -1180+850 µm boyut aralıklarında kırılma davranışı doğrusal değildir. -425+300 µm boyut grubu kırılma davranışı doğrusal olup, bu tane boyutunda diğer iki boyut grubuna göre daha hızlı kırılma gerçekleşmiştir.

Kaynakça

- [1] Kafalı, M.A., 2005. Seramik Yer ve Duvar Kaplamaları, Türkiye Kalkınma Bankası A.Ş. Sektörel Araştırmalar Müdürlüğü, Ankara, S. 1-60.
- [2] Kara E., 2011. Refrakter Atıklarının ve Vitrikiye Iskartalarının Öğütülebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi. Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 139 s, Zonguldak.
- [3] Dikmen, S. ve Ergün, Ş.L., 2004. Karıştırılmalı Bilyalı Değirmenler. Madencilik Dergisi, (43) 4, 3-15.
- [4] Ohenoja, K., Saari, J., Ilkanien, M., Breitung-Faes, S., Kwade, A., Niinimäki, J., 2014. Effect of Polidispersity Index on the Grinding Limits of Highly Concentrated Limestone Suspensions, Chem. Eng. Technol. 37: 5, 833-839.
- [5] 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.
- [6] Kwade A., 1999. Wet Comminution in Stirred Media Mills-Research and Its Practical Application. Powder Technology, 105, 14-20.
- [7] Wang, Y. ve Forssberg E., 2000. Product Size Distribution in Stirred Media Mills. Minerals Engineering, 13, 459-465.
- [8] Jankovic, A., 2003. Variables Affecting the Fine Grinding of Minerals Using Stirred Mills. Minerals Engineering, 16, 337-345.
- [9] Bilgili E., Hamey R., Scarlett B., 2006. Nanomilling of Pigment Agglomerates Using a Wet Stirred Media Mill: Elucidation of The Kinetics and Breakage Mechanism Chemical Engineering Science, 61, 149-157.
- [10] Ding Z., Yin Z., Liu L. Ve Chen Q., 2007. Effect of Grinding Parameters on The Rheology of Pyritehaptane Slurry in a Laboratory Stirred Media Mill, Minerals Engineering, 20, 701-709.
- [11] Roitto, H. Lehto, A Paz ve M. Astholm, 2013. Stirred Milling Technology-A New Concept in Fine Grinding. Metalurgical Plant Design and Operating Strategies (Metplant 2013) 190-201.
- [12] Tüzün, M. A., Loveday B. K., 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.
- [13] Blecher ve Schwedes, J., 1996. Energy Distribution and Particle Trajectories in a Grinding Chamber of a Stirred Ball Mill. International Journal of Mineral Processing, 44-45: 617-627.
- [14] Karbstein H, Müler F ve Polke R., 1996. Scale-Up for Grinding in Stirred Ball Mills. Aufbereitungs-Technick, 37 (10): 469-479.
- [15] Zheng, J. , Harris , C.C. ve Somasundaran, P., 1996. A Study on Grinding and Energy Input in Stirred Media Mills, Powder Technology, 86, 171-178.
- [16] C.T. Jayasundara, R.Y. Yang, A.B. Yu, 2012. Effect of the Size of Media on Grinding Performance in Stirred Mills”, Minerals Engineering, Volume 33, Pages 66-71.
- [17] M.D. Sinnott, P.W. Cleary, R.D. Morrison, 2011. Is Media Shape Important for Grinding Performance in Stirred Mills., Miner Eng. 24, 138-151.
- [18] Celep, O., 2009. Öğütme Teknolojisinde Karıştırılmalı Ortam Değirmenleri ve Uygulamaları. İstanbul Yerbilimleri Dergisi, C.21, S.2, SS. 61-73.
- [19] Hacifazhoğlu, H., Pilevneli, C.C. ve Toroğlu, İ., 2007. Dikey Pinli Karıştırılmalı Değirmende Armutçuk Kömürünün Kuru Öğütülmesi ve Bilya Boyutunun Ürün İnceliğine Etkisi. Madencilik Dergisi, 46 (1), 33-41.
- [20] Shi, F., Morrison, R., Cervellin, A., Burns, F., Musa, F., 2009. Comparison of Energy Efficiency Between Ball Mills and Stirred Mills in Coarse Grinding. Minerals Engineering, 22(7-8): 673-680.
- [21] Pease, J., Anderson, G., Curry, D., Kazakoff, F., Musa, F., Shi, F., Rule, C., 2006. Autogenous and Inert Milling at Fine Sizes – The Isamill. in: SAG 2006 Conference, UBC/CIM, Vancouver, Canada.
- [22] Sepulveda, J. L., 1981. A Detail Study on Stirred Ball Mill Grinding. Doktora Tezi . Department of Metallurgy and Metallurgical Engineering, The University of Utah.

- [23] Pilevneli, C. C., 2003. Bilyalı Bir Karıştırmalı Değirmende İnce Boyutlu Klinker Öğütmesinin İncelenmesi, Doktora Tezi. ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 159 S.
- [24] Orumwense, O. A., 1992. The Kinetics of Fine Grinding in an Annular Ball Mill. Powder Technology, 73, 101-108.
- [25] Austin, L.G., Shoji, K., ve Bell, D., 1982a. Rate Equations for Non-Linear Breakage in Mills Due to Material Effects. Powder Technology, 31: 127-133.
- [26] Austin, L. G.,, 1984. Size Reduction of Solids: Crushing and Grinding Equipment,.
- [27] 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.,
- [28] Austin, L.G., ve Bahatia, V.K., 1971. Experimental Methods for Grinding Studies in Laboratory Mills. Powder Technology, 5: 261-266.
- [29] Austin, L.G., ve Luckie, P.T., 1971. Methods For Determination of Breakage Distribution Parameters. Powder Technology, 5: 215-222.