

**ZONGULDAK-ÇATALAĞZI TERMİK SANTRALİ KATI FOSİL YAKITI
ÖĞÜTME KİNETİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Selçuk SAMANLI

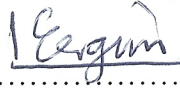
**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**ZONGULDAK
Haziran 2008**

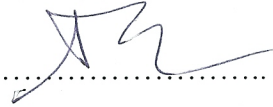
KABUL:

Selçuk SAMANLI tarafından hazırlanan "ZONGULDAK-ÇATALAĞZI TERMİK SANTRALI KATI FOSİL YAKITI ÖĞÜTME KİNETİĞİNİN ARAŞTIRILMASI" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 09/06/2008

Başkan : Prof. Dr. Levent ERGÜN (HÜ)


.....

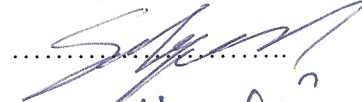
Üye : Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ (OÜ)
(2. Danışman)


.....

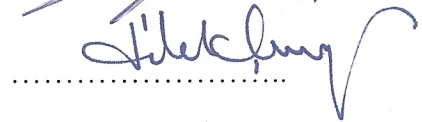
Üye : Prof. Dr. İhsan TOROĞLU (ZKÜ)


.....

Üye : Doç. Dr. Sait KIZGUT (ZKÜ)

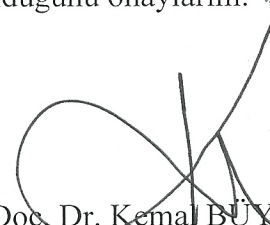

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Dilek ÇUHADAROĞLU (ZKÜ)
(Tez Danışmanı)


.....

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. 14/07/2008


Doç. Dr. Kemal BÜYÜKGÜZEL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Selçuk SAMANLI

ÖZET

Doktora Tezi

ZONGULDAK-ÇATALAĞZI TERMİK SANTRALİ KATI FOSİL YAKITI ÖĞÜTME KİNETİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Selçuk SAMANLI

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları

Yrd. Doç. Dr. Dilek ÇUHADAROĞLU

Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ

Haziran 2008, 177 sayfa

Bu çalışmada, Çatalağzı Termik Santrali'nden (ÇATES) alınan, Kozlu, Üzülmaz ve Çatalağzı lavvarlarından ve özel sahalardan temin edilen kül oranı yüksek yıkama artıklarının, istenilen kül ve kalori değerini karşılayacak şekilde harmanlanmasından oluşan katı fosil yakıt kullanılmıştır. Malzemenin tamamı 3350 µm boyutu altına konik kırıcı ile kontrollü olarak kırılmıştır. Homojen olmayan yapının ortaya konulabilmesi için yıkama testleri yapılmıştır. Yüksek küllü şist ağırlıklı yapı içinde yer alan nispeten düşük küllü kömür-taş karışımından oluşan bir katı fosil yakıt olduğu belirlenmiştir. Laboratuvarında yapılan kısa analiz deneyleri sonrasında malzemenin kuru bazda %47,58 kül ve 3825 Kkal/kg üst ısı değer ve piknometre ile yapılan yoğunluk belirleme testleri sonucunda da 1,8 gr/cm³ yoğunluğa sahip olduğu belirlenmiştir. ÇATES numunesinin Bond iş indeksinin 16,93 kWs/t ve Hardgrove indeksinin de 77,45 olduğu belirlenmiştir.

ÖZET (devam ediyor)

ÇATES numunesi elenerek -3350+2360 μm , -2360+1700 μm , -1180+850 μm , -425+300 μm , -212+150 μm dar tane boyut gruplarında sınıflandırılmıştır. Tamamı 3350 μm olan malzeme ve dar tane boyut gruplarında hazırlanmış olan malzemeler, laboratuvar ölçekli dikey pinli karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmen ile öğütülmüşlerdir. Karıştırmalı değirmen çalışmalarında 6 mm bilya çapı ve 360 dev/dk karıştırma hızının ideal olduğu belirlenmiştir. İdeal şartlarda yapılan çalışmalarda, -425+300 μm ve -212+150 μm dar tane boyut gruplarında birinci derece kırılma davranışı, diğer dar tane boyut gruplarında ise doğrusal olmayan kırılma davranışı elde edilmiştir. Karıştırmalı değirmende özgül kırılma hızı 425 μm tane boyutunda maksimuma ulaşmıştır. Bilyalı değirmende ise birinci derece kırılma davranışı -1180+850 μm , -425+300 μm ve -212+150 μm dar tane boyut gruplarında gerçekleşmiştir. Diğer dar tane boyut gruplarında ise doğrusal kırılma davranışından uzaklaşmıştır. Bilyalı değirmende özgül kırılma hızı 2360 μm tane boyutunda maksimuma ulaşmıştır. Karıştırmalı değirmende ve bilyalı değirmende kırılma dağılım parametreleri normalize edilememiş ve malzemenin başlangıç boyutlarına bağlı olduğu belirlenmiştir.

3350 μm ($d_{80} \approx 2100 \mu\text{m}$) altında olan ÇATES numunesinin, karıştırmalı değirmende 0,25 dk, 0,50 dk, 1 dk ve 4 dk öğütülmesi ile elde edilen d_{80} boyutları sırasıyla 190 μm , 102 μm , 78 μm ve 28 μm olarak belirlenmiştir. Aynı numune, bilyalı değirmende 1 dk, 4 dk, 8 dk, 12 dk ve 24 dk öğütülmüştür. Sonuçta, elde edilen d_{80} boyutları sırasıyla 1802 μm , 1130 μm , 324 μm , 167 μm ve 81 μm olarak belirlenmiştir. Karıştırmalı değirmende $d_{80} \approx 78 \mu\text{m}$ 'ye 1 dk öğütme süresi sonunda 10,53 kW/t enerji harcanarak, bilyalı değirmende ise $d_{80} \approx 81 \mu\text{m}$ 'ye 24 dk öğütme süresi sonunda 72,73 kW/t enerji harcanarak ulaşılmıştır. Karıştırmalı değirmende, bilyalı değirmenden daha ince ürün çok daha ekonomik elde edilmiştir. Öğütme ürünleri JKSImMet simulasyon programı yardımıyla simule edilmiştir. Bilyalı değirmenin öğütme ürünlerinde, deneysel sonuçlar ile simulasyon sonuçları oldukça iyi benzeşim göstermiştir. Karıştırmalı değirmende ise deneysel sonuçlar ile simulasyon eğrilerinin çok uyumlu olmadıkları görülmüştür. Sunulan deneysel çalışma sonuçları, karıştırmalı değirmenin mikronize öğütmede diğer konvansiyonel değirmenlere üstünlük sağlayacağını ortaya koymuştur.

Anahtar Sözcükler: Karıştırmalı değirmen, Bilyalı değirmen, Kırılma davranışı, Simulasyon.

Bilim Kodu : 607.02.02

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

THE INVESTIGATION OF GRINDING KINETICS OF ZONGULDAK-CATALAGZI POWER PLANT SOLID FOSSIL FUEL

Selçuk SAMANLI

**Zonguldak Karaelmas University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Department**

Thesis Advisors

Asst. Prof. Dilek ÇUHADAROĞLU

Prof. Yaşar UÇBAŞ

June 2008, 177 pages

In this study solid fossil fuel taken from Catalagzi Power Plant (CATES) and formed by blending of high-ash wastes of Kozlu, Uzulmez, Catalagzi washeries and private fields to meet desired ash and calorific value were used. The whole sample was crushed to 3350 μm below by a cone crusher. Washing tests were done to show heterogeneous structure. It was determined that the solid fossil fuel is composed of low-ash coal-rock mixture within high-ash shale. After proximate analysis it was determined that the sample has an ash of 47.58% (dry basis) and a maximum calorific value of 3825 Kcal/kg and also it was determined by a picnometer that the sample has a density of 1.8 g/cm³.

As a result of tests performed in Bond ball mill and Hardgrove device to determine the grindability characteristics of CATES sample it was found that Bond Work Index and

ABSTRACT (continued)

Hardgrove index were 16.93 kWh/t and 77.45, respectively. CATES sample was dry screened and classified in narrow size groups of -3350+2360 μm , -2360+1700 μm , -1180+850 μm , -425+300 μm and -212+150 μm . The sample was exposed to grinding tests in a laboratory scale vertical pinned stirred mill and ball mill. After grinding tests in stirred mill 6 mm ball diameter and 360 rev/min stirring speed was found to be ideal in the determination of breakage behavior. In studies performed at ideal conditions first degree breakage behavior was obtained for 425+300 μm and -212+150 μm size groups and a nonlinear breakage behavior was obtained for the others. Specific rate of breakage was reached to the maximum in 425 μm particle size in the stirred mill and then it started to decrease. In ball mill first degree breakage behavior was realized in -1180+850 μm , -425+300 μm and -212+150 μm size groups. For other narrow size groups, however, as in ball mill, linear breakage behavior was totally diminished. Specific rate of breakage was reached to the maximum in 2360 μm particle size in ball mill and then it started to decrease. Breakage distribution parameters for both stirred and ball mill couldn't be normalized and it was determined that these parameters depends on the initial size of material.

d_{80} values obtained by grinding of CATES sample all was -3350 μm ($d_{80}\approx 2100$ μm) for 0.25, 0.50, 1 and 4 minutes were determined as 190 μm , 102 μm , 78 μm and 28 μm , respectively. Same sample was ground in ball mill for 1, 4, 8, 12 and 24 minutes. Obtained d_{80} values were 1802 μm , 1130 μm , 324 μm , 167 μm and 81 μm . $d_{80}\approx 78$ μm was reached after by energy consumption of 10.53 kWh/t for 1 minute of grinding period for stirred mill, and $d_{80}\approx 81$ μm was reached by energy consumption of 72.73 kWh/t for 24 minutes of grinding period for ball mill. These results showed that the stirred mill is superior to ball mill revealing shorter grinding period and lower energy consumption. In addition, grinding products were simulated by JKSimMet simulation software. A very good match was obtained between experimental and simulation results for ball mill products. Since the model used in simulation was developed for ball mills experimental results and simulation curves for the stirred mill didn't reveal a nice fit. The results of the experimental work presented in this study displayed that the stirred mill is superior to other conventional mills in micronized grinding.

Key Words : Stirred mill, Ball mill, Breakage behavior, Simulation.

Science Code: 607.02.02

TEŞEKKÜR

"Zonguldak-Çatalağzı Termik Santralı Katı Fosil Yakıtı Öğütme Kinetiğinin Araştırılması" başlıklı bu doktora çalışmasında Tez danışmanlığımı üstlenerek, çalışma konusunun seçimi ve yürütülmesi sırasında, öneri ve uyarılarından yararlanma imkânı sağlayan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Dilek ÇUHADAROĞLU'na (ZKÜ) ve ikinci danışmanlık görevini kabul etme inceliği gösteren ve tez çalışmamda önemli katkılar sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ'a (OÜ) teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Tez izleme jürisinde yer alan ve sağladığı önemli değerlendirme, uyarı ve düzeltmeler ile çalışmam sırasında karşılaştığım sorunları aşmamda ve tezin gelişmesi, sonuçlanmasında katkı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Levent ERGÜN'e (HÜ) teşekkür ederim.

Doktora çalışmamın genelinde ve özellikle kırılma kinetiği kısmında karşılaştığım sorunlarda sağlamış olduğu bilgi paylaşımı ve yapmış olduğu yönlendirmeler ile çalışmamın gelişmesini sağlayan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Halil İPEK'e (OÜ) teşekkür ederim.

Tez çalışmamda kullanılan cihazların yaptırılması, deneysel çalışma sonuçlarının simulasyonu'nun yapılabilmesi için gerekli olan JKSImMet programı'nın yurtdışından teminindeki değerli yardımlarından ve tez çalışma konumun gelişiminde sağladığı katkılardan dolayı değerli hocam Doç. Dr. Sait KIZGUT'a (ZKÜ) teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda kullandığım laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmeni bölümümüz laboratuvarına kazandıran değerli hocam Prof. Dr. İhsan TOROĞLU'na (ZKÜ) ve meslektaşım Dr. Cengiz PİLEVNELİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvar imkânlarını kullanmamı sağlayan Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na değerli hocam Prof. Dr. Hasan GERÇEK'in şahsında teşekkür ederim.

TEŞEKKÜR (devam ediyor)

Doktora çalışmamın yürütülmesi sırasında hazırlamış olduğumuz Bilimsel Araştırma Projesinin kabulündeki katkılarından dolayı da değerli hocam Prof. Dr. Yadigar MÜFTÜOĞLU'na (ZKÜ) teşekkürü borç bilirim.

JKSimMet simulasyon programının deneysel sonuçlara uygulanmasında sağlamış olduğu katkılardan dolayı meslektaşım Dr. Serkan DİKMEN'e teşekkür ederim.

Malzemenin ÇATES'den temininde sağlamış oldukları imkânlar için ÇATES Müdürü Elektrik Mühendisi Muzaffer GENÇOĞLU'na (ÇATES) ve Teknik Müdür Yardımcısı Makine Mühendisi Muzaffer GÜHER'e (ÇATES) teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları sırasındaki katkılarından dolayı şimdi genç meslektaşlarım diye bahsetmek istediğim Sırrıhan YAŞA'ya, Gökhan ÖZDEMİREL'e, Gökhan AKTAŞ'a, Ersan ÖZBUDAKLAR'a ve ayrıca Kimya Mühendisi Fevzi NURAK'a (TTK) teşekkür ederim.

Arkadaşlarım ve meslektaşlarım Uzm. Serdar YILMAZ'a (ZKÜ), Arş. Gör. Kemal BARIŞ'a (ZKÜ) ve Arş. Gör. Okan SU'ya (ZKÜ) desteklerinden dolayı teşekkürü borç bilirim.

Bu günlere gelmemde büyük özveri gösteren aileme teşekkür ve minnettarlığımı sunarım. Her zaman bana destek olan eşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxiii
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
 BÖLÜM 2 BOYUT KÜÇÜLTME	 5
2.1 BOYUT KÜÇÜLTMENİN TEMEL PRENSİPLERİ	5
2.2 BOYUT KÜÇÜLTME MAKİNELERİNDEKİ ZORLAMA ÇEŞİTLERİ	6
2.3 BOYUT KÜÇÜLTME TEORİSİ VE BOYUT KÜÇÜLTME KANUNLARI	8
2.3.1 Rittinger Kanunu (Yüzey Teorisi).....	9
2.3.2 Kick Kanunu (Hacim Teorisi).....	10
2.3.3 Bond Kanunu.....	11
2.4 ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK	13
2.4.1 Bond Öğütülebilirlik Deney Yöntemi	13
2.4.2 Hardgrove Öğütülebilirlik Deney Yöntemi.....	15
2.5 KIRMA	16
2.5.1 Çeneli Kırıcılar	16
2.5.2 Konili Kırıcılar	18
2.5.2.1 Sabit Milli Konili Kırıcı.....	19
2.5.2.2 Oynar Milli Konili Kırıcı.....	20

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.5.3 Merdaneli Kırıcı	20
2.5.4 Çekiçli Kırıcı	21
2.5.5 Barmak Kırıcı	22
2.5.6 Bradford Tipi Döner Kırıcı	23
2.6 ÖĞÜTME	23
2.6.1 Aktarılan Ortam Değirmenleri	25
2.6.1.1 Çubuklu Değirmen	25
2.6.1.2 Bilyalı Değirmen	26
2.6.1.3 Otojen Değirmen	27
2.6.2 Aktarılan Ortam Değirmenleri Yapı Unsurları	28
2.6.2.1 Gövde	28
2.6.2.2 Yan Kapaklar ve Silindirik Uzantıları	28
2.6.2.3 Yataklar	29
2.6.2.4 Astarlar	29
2.6.2.5 Değirmen Girişi ve Besleme	29
2.6.2.6 Değirmen Çıkışı	30
2.6.2.7 Aktarılan Ortam (Öğütücü Ortam)	32
2.6.3 Değirmen Kritik Dönüş Hızı ve Hıza Bağlı Olarak Ortam Hareketi	32
2.6.4 Değirmenlerde Kapasite	34
2.6.4.1 Cevher özellikleri	34
2.6.4.2 Değirmen Yapısı	34
2.6.4.3 Değirmen Çalışma Şekli	35
2.6.5 Aktarılan Ortam Değirmenleri Dışındaki Değirmenler	35
2.6.5.1 Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen	35
2.6.5.2 Valsli Değirmen (Ring-Roll Mill)	37
2.7 MİKRONİZE ÖĞÜTME	38
2.7.1 Karıştırmalı Değirmen	38
 BÖLÜM 3 ÖĞÜTMENİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ	 41
 3.1 ÖĞÜTME MODELLERİ	 42
3.1.1 Matris Model	42

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.1.2 Mükemmel Karışım Modeli	43
3.1.3 Çok Bölmeli Model	43
3.1.4 Kinetik Model	44
3.2 KIRILMA FONKSİYONLARININ BELİRLENMESİ	49
3.2.1 Doğrudan Belirleme Yöntemi	50
3.2.1.1 Dar Tane Boyut Gruplarında Hazırlanmış Besleme Malzemesinin Kullanımı	50
3.2.2 Doğrudan Olmayan Belirleme Yöntemi (Geri Hesaplama)	53
3.2.2.1 Optimizasyon Yöntemi	53
3.3 KIRILMA HIZI PARAMETRELERİNİN TASARIM VE İŞLETME ŞARTLARI İLE DEĞİŞİMİ	55
3.3.1 Kırılma Hızının Tane Boyu İle Değişimi	55
3.3.2 Kırılma Hızının Değirmen Dönüş Hızı ile Değişimi	56
3.3.3 Kırılma Hızının Değirmen Geometrisi ile Değişimi	57
3.3.3.1 Değirmen Çapı ile Değişim	57
3.3.3.2 Değirmen Boyu ile Değişim	57
3.3.3.3 Astar Şekli ile Değişim	57
3.3.4 Kırılma Hızının Öğütücü Ortam ile Değişimi	58
3.3.4.1 Bilya Çapı ve Şekli ile Değişim	58
3.3.4.2 Bilya Yoğunluğu ile Değişim	59
3.3.4.3 Bilya Sertliği ile Değişim	59
3.3.5 Kırılma Hızının Bilya ve Malzeme Doldurma Oranı ile Değişimi	59
3.4 KIRILMA DAĞILIM PARAMETRELERİNİN TASARIM VE İŞLETME ŞARTLARI İLE DEĞİŞİMİ	61
3.4.1 Kırılma Dağılımının Tane Boyu İle Değişimi	61
3.4.2 Kırılma Dağılımının Bilya Çapı ile Değişimi	62
3.4.3 Kırılma Dağılımının Değirmen Parametreleri ile Değişimi	63
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	65
4.1 DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TANITILMASI	65

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.2 ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK DENEYLERİ	66
4.2.1 Bond Öğütülebilirlik Deneyleri.....	66
4.2.2 Hardgrove Öğütülebilirlik Deneyleri	68
4.3 ÖĞÜTME DENEYLERİ	68
4.3.1 Laboratuvar Ölçekli Karıştırmalı Değirmen ile Yapılan Öğütme Deneyleri	69
4.3.1.1 Dar Tane Boyut Gruplarında Hazırlanan Malzemenin Kırılma Davranışının Belirlenmesi	70
4.3.2 Laboratuvar Ölçekli Bilyalı Değirmen ile Yapılan Öğütme Deneyleri	86
4.3.2.1 Dar Tane Boyut Gruplarında Hazırlanan Malzemenin Kırılma Davranışının Belirlenmesi.....	86
4.3.3 Karıştırmalı Değirmende ve Bilyalı Değirmende Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması.....	95
4.3.3.1 -212+150 µm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması	96
4.3.3.2 -425+300 µm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması	96
4.3.3.3 -1180+850 µm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması	97
4.3.3.4 -2360+1700 µm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması	98
4.3.3.5 -3350+2360 µm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması	98
4.3.4 Öğütme Sonuçlarının Kinetik Açidan Değerlendirilmesi	100
4.3.4.1 Karıştırmalı Değirmende Özgül Kırılma Hızı ve Kırılma Dağılım Fonksiyonlarının Değerlendirilmesi	100
4.3.4.2 Bilyalı Değirmende Özgül Kırılma Hızı ve Kırılma Dağılım Fonksiyonlarının Değerlendirilmesi	105
4.4 JKSİMMET SİMULASYON PROGRAMI İLE ÖĞÜTME ÜRÜNLERİNİN BOYUT DAĞILIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	109
4.4.1 JKSImMet Simulasyon Programı Hakkında Genel Bilgiler.....	109
4.4.2 Bilyalı Değirmende Öğütme-Simulasyon Çalışmaları.....	113

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

4.4.3 Karıştırmalı Değirmende Öğütme-Simulasyon Çalışmaları	115
4.5 LABORATUVAR ÖLÇEKLİ BİLYALI DEĞİRMEN VE KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE ENERJİ HARCAMALARI	117
BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	119
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	127
KAYNAKLAR.....	129
EK AÇIKLAMALAR A YIKAMA (YÜZDÜRME-BATIRMA) TEST SONUÇLARI	137
EK AÇIKLAMALAR B BİLYALI DEĞİRMENDE BOND TESTLERİ	145
EK AÇIKLAMALAR C KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE DAR TANE BOYUT GRUPLARINDA KIRILMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ	149
EK AÇIKLAMALAR D BİLYALI DEĞİRMENDE DAR TANE BOYUT GRUPLARINDA KIRILMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ	157
EK AÇIKLAMALAR E KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE VE BİLYALI DEĞİRMENDE KIRILMA DAĞILIM DEĞERLERİNİN TANE BOYU İLE DEĞİŞİMİ.....	161
EK AÇIKLAMALAR F BİLYALI DEĞİRMEN VE KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE SİMULASYON ÇALIŞMALARI	165
EK AÇIKLAMALAR G LABORATUVAR ÖLÇEKLİ BİLYALI DEĞİRMEN VE KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE ENERJİ HARCAMALARI.....	173
ÖZGEÇMİŞ	177

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Basma ve çekme kuvvetlerinin şematik gösterimi	6
2.2 Çatlak etrafında oluşan gerilmelerin şematik gösterimi.....	6
2.3 Baskı ve kesme kuvvetleriyle zorlamanın şematik gösterimi	7
2.4. Darbe yoluyla zorlamanın şematik gösterimi.....	7
2.5 Boyut küçültme makinelerinde oluşan çarpma şekilleri	8
2.6 Boyut küçültmede tane boyutuna karşılık harcanan net enerji	12
2.7 Hareketli çenenin bağlantı noktasına göre çeneli kırıcılar	16
2.8 Blake tipi çift salgı kollu bir çeneli kırıcının çalışma mekanizması	17
2.9 Konili kırıcı kesit görünümü	18
2.10 Birincil kırma ve ikincil kırma yapan konili kırıcı kesitleri.....	18
2.11 Sabit ve döner eksenli kırıcılarda kırıcı kafanın hareketi.....	19
2.12 Merdanelerde kavrama açısı.....	21
2.13 Sabit çekiçli çarpmalı kırıcı.....	21
2.14 Barmak kırıcı.....	22
2.15 Bradford tipi döner kırıcı.....	23
2.16 Cevher öğütme mekanizmaları	24
2.17 Çubuklu değirmen kesiti	25
2.18 Çubuklu değirmen ve bilyalı değirmende öğütme ürünü boyut dağılımı	26
2.19 Kamaralı bilyalı değirmene ait kesit görünüş	26
2.20 Otojen değirmene ait kesit görünüş.....	27
2.21 Düz taşmalı değirmen.....	30
2.22 Çevreden boşalmalı değirmenler.....	31
2.23 Izgaralı taşmalı değirmen	31
2.24 Değirmen dönüş hızı	32
2.25 Bilyalı değirmende öğütme ortamının hareketi.....	34
2.26 Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerin genel görünümü.....	36
2.27 Valsli değirmen (Ring-roll mill)	37
2.28 Yatay bir karıştırırmalı değirmenin şematik gösterimi.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
3.1 Birinci derece kırılma davranışı	46
3.2 Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmende kırılma hızının değişimi	60
3.3 Kırılma dağılım fonksiyonlarının tane boyu ile değişimi	61
4.1 Bond bilyalı değirmen, (a) Gövde-motor-kayış kasnak, (b) Öğütücü bilyalar	67
4.2 ÇATES numunesi ve Bond deney ürünü elek altı eğrileri	68
4.3 Laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmen	69
4.4 1440 dev/dk karıştırma hızında elek altı eğrileri	71
4.5 720 dev/dk karıştırma hızında elek altı eğrileri	71
4.6 360 dev/dk karıştırma hızında elek altı eğrileri	72
4.7 Öğütme süresinin kırılma davranışına etkisinin incelendiği deneylerden alınan ürünlerin elek altı eğrileri	73
4.8 Karıştırmalı değirmende -2360+1700 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı ..	74
4.9 4 mm boyutlu bilya ile yapılan deneylerden alınan ürünlerin elek altı eğrileri	75
4.10 2,36 mm boyutlu bilya ile yapılan deneylerden alınan ürünlerin elek altı eğrileri	76
4.11 1/3 ağırlıksal oranlı bilya karışımları (2,36-4-6 mm) ile yapılan deneylerden alınan ürünlerin elek altı eğrileri	77
4.12 Farklı boyutlu bilyalar ile yapılan öğütme deneylerinde kırılma davranışları	77
4.13 Karıştırmalı değirmende -212+150 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri	79
4.14 Karıştırmalı değirmende -212+150 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı	79
4.15 Karıştırmalı değirmende -425+300 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri	80
4.16 Karıştırmalı değirmende -425+300 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı	81
4.17 Karıştırmalı değirmende -1180+850 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri	82
4.18 Karıştırmalı değirmende -1180+850 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı	82
4.19 Karıştırmalı değirmende -3350+2360 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri	83
4.20 Karıştırmalı değirmende -3350+2360 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı ...	84
4.21 Karıştırmalı değirmende -3350+2360 µm ve -2360+1700 µm dar tane boyut gruplarında kırılma davranışları	85
4.22 Karıştırmalı değirmende -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında kırılma davranışları	85
4.23 Bilyalı değirmende -212+150 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri	87
4.24 Bilyalı değirmende -212+150 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı	88
4.25 Bilyalı değirmende -425+300 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri	89
4.26 Bilyalı değirmende -425+300 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı	89
4.27 Bilyalı değirmende -1180+850 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri	90

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
4.28 Bilyalı değirmende -1180+850 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı boyut grubu elek altı eğrisel gösterimleri.....	91
4.29 Bilyalı değirmende -2360+1700 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrisel gösterimleri.....	92
4.30 Bilyalı değirmende -2360+1700 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.....	92
4.31 Bilyalı değirmende -3350+2360 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri.....	93
4.32 Bilyalı değirmende -3350+2360 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.....	94
4.33 Bilyalı değirmende -3350+2360 µm ve -2360+1700 µm dar tane boyut gruplarında kırılma davranışları.....	94
4.34 Bilyalı değirmende 425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında kırılma davranışları.....	95
4.35 -212+150 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.....	96
4.36 -425+300 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.....	97
4.37 -1180+850 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.....	97
4.38 -2360+1700 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.....	98
4.39 -3350+2360 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.....	99
4.40 Karıştırmalı değirmende dar tane boyut gruplarında kırılma davranışı.....	101
4.41 Karıştırmalı değirmende birinci derece kırılma davranışı.....	101
4.42 Karıştırmalı değirmende kırılma hızlarının tane boyutu ile değişimi.....	102
4.43 Karıştırmalı değirmende kırılma dağılım değerlerinin tane boyu ile değişimi.....	103
4.44 Bilyalı değirmende dar tane boyut gruplarında kırılma davranışı.....	105
4.45 Bilyalı değirmende birinci derece kırılma davranışı.....	106
4.46 Bilyalı değirmende kırılma hızlarının tane boyutu ile değişimi.....	107
4.47 Bilyalı değirmende kırılma dağılım değerlerinin tane boyu ile değişimi.....	108
4.48 (r/d*) eğri fonksiyonu gösterimi.....	110
4.49 Morrell ve Man ölçek büyütme yönteminin şematik gösterimi.....	112
4.50 Bilyalı değirmende deneysel ve simulasyon elek altı eğrileri.....	114
4.51 Bilyalı değirmen Ln (Tane Boyutu)'na karşı Ln (r/d*) eğrileri.....	114
4.52 Karıştırmalı değirmende deneysel ve simulasyon elek altı eğrileri.....	116
4.53 Karıştırmalı değirmen Ln (Tane Boyutu)'na karşı Ln (r/d*) eğrileri.....	116
4.54 Ln (Tane Boyutu)'na karşılık Ln (r/d*) eğrilerinin karşılaştırılması.....	117
4.55 Öğütmede harcanan enerjilerin karşılaştırılması.....	118
5.1 Karıştırmalı değirmende öğütme ürünü dağılım eğrisi.....	124
A.1 -3350+500 µm yıkama sonuçlarını değerlendirme eğrileri.....	142

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
A.2 -500 µm yıkama sonuçlarını değerlendirme eğrileri	142
A.3 -3350 µm yıkama sonuçlarını değerlendirme eğrileri	143
F.1 Bond Bilyalı değirmen ÇATES numunesinin 24 dk öğütülmesi sonrası, JKSimMet simulasyon programı ile değerlendirilmesini gösterir ekran çıktısı.	167

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 ÇATES numunesi kısa analiz sonuçları	65
4.2 Bond bilyalı değirmen ve öğütücü ortam karakteristik özellikleri.....	67
4.3 Bilyalı değirmen deneylerinde kullanılan malzeme özellikleri.....	86
4.4 Karıştırmalı değirmende özgül kırılma hızları	102
4.5 Karıştırmalı değirmende kırılma dağılım parametreleri.....	104
4.6 Bilyalı değirmende özgül kırılma hızları	106
4.7 Bilyalı değirmende kırılma dağılım parametreleri	108
4.8 Bilyalı değirmende knot'lara karşı r/d^* değerleri	113
4.9 Karıştırmalı değirmende knot'lara karşı r/d^* değerleri	115
5.1 Özgül kırılma hızlarının karşılaştırılması.....	121
5.2 Kırılma dağılım parametrelerinin karşılaştırılması	121
5.3 Boyuttan bağımsız hesaplanmış kırılma dağılım değerleri	122
5.4 Karıştırmalı değirmende 30 sn öğütme sonuçları	123
A.1 ÇATES numunesi -3350+500 μm yıkama sonuçları	139
A.2 ÇATES numunesi -500 μm yıkama sonuçları.....	140
A.3 ÇATES numunesi -3350 μm (birleştirilmiş) yıkama sonuçları	141
B.1 ÇATES numunesi elek analiz sonuçları.....	147
B.2 Bond deney ürünü elek analiz sonuçları	147
B.3 ÇATES numunesi Bond öğütülebilirlik deney sonuçları.....	148
C.1 1440 dev/dak karıştırma hızında yapılan deneylerin sonuçları.....	151
C.2 720 dev/dak karıştırma hızında yapılan deneylerin sonuçları.....	151
C.3 360 dev/dak karıştırma hızında yapılan deneylerin sonuçları.....	151
C.4 Öğütme süresinin kırılma davranışına etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları ..	152
C.5 4 mm boyutlu bilya ile yapılan deneylerin sonuçları	153
C.6 2,36 mm boyutlu bilya ile yapılan deneylerin sonuçları	154
C.7 1/3 ağırlıksal oranlı bilya karışımları (2,36-4-6 mm) ile yapılan deneylerin sonuçları	154
C.8 -212+150 mikron dar tane boyut grubu öğütme sonuçları.....	155
C.9 -425+300 mikron dar tane boyut grubu öğütme sonuçları.....	155

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
C.10 -1180+850 mikron dar tane boyut grubu öğütme sonuçları	155
C.11 -3350+2360 mikron dar tane boyut grubu öğütme sonuçları	156
D.1 -212+150 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları	159
D.2 -425+300 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları	159
D.3 -1180+850 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları	159
D.4 -2360+1700 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları	160
D.5 -3350+2360 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları	160
E.1 Karıştırmalı değirmende, deneysel ve hesaplanan kırılma dağılım değerleri	163
E.2 Bilyalı değirmende, deneysel ve hesaplanan kırılma dağılım değerleri.....	164
F.1 Bond Bilyalı değirmeninde ÇATES numunesi ve öğütme ürünlerine ait deneysel ve simulasyon boyut dağılımları	168
F.2 Karıştırmalı değirmende ÇATES numunesi ve öğütme ürünlerine ait deneysel ve simulasyon boyut dağılımları	170
G.1 Enerji tüketim değerleri.....	175

EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
A YIKAMA (YÜZDÜRME-BATIRMA) TEST SONUÇLARI	137
B BİLYALI DEĞİRMENDE BOND TESTLERİ	145
C KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE DAR TANE BOYUT GRUPLARINDA KIRILMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ	149
D BİLYALI DEĞİRMENDE DAR TANE BOYUT GRUPLARINDA KIRILMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ	157
E KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE VE BİLYALI DEĞİRMENDE KIRILMA DAĞILIM DEĞERLERİNİN TANE BOYU İLE DEĞİŞİMİ	161
F BİLYALI DEĞİRMEN VE KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE SİMULASYON ÇALIŞMALARI	165
G LABORATUVAR ÖLÇEKLİ BİLYALI DEĞİRMEN VE KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE ENERJİ HARCAMALARI	173

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

x	: tane boyutu
P	: % 80'nin geçtiği ürün boyutu
F	: % 80'nin geçtiği besleme boyutu
W_i	: iş indeksi
t	: öğütme süresi
S_i	: i tane boyu aralığındaki malzemenin birim kütlesinin birim zamanda kırılma hızı
w_i	: i tane boyu aralığındaki malzeme fraksiyonu
W	: değirmende öğütülen malzemenin toplam ağırlığı
S_l	: özgül kırılma hızı
a_T	: değirmen koşullarına bağlı parametre
α	: malzemeye özgü parametre
Φ	: kırılma dağılım parametresi
β	: kırılma dağılım parametresi
γ	: kırılma dağılım parametresi
x_i	: tane boyutu
d	: bilya çapı
Q_i	: düzeltme faktörü
μ	: düzeltme faktörünün 0,5 olduğu tane boyuna bağlı değişen parametre
Λ	: tane boyunun büyümesiyle kırılma hızının azalmasını gösteren bir parametre
J	: bilya doldurma oranı
m_p	: motor gücü
f_c	: malzeme doldurma oranı
U	: bilyalar arasındaki boşluğun doldurma oranı

KISALTMALAR

OÜ	: osmangazi üniversitesi
HÜ	: hacettepe üniversitesi
ZKÜ	: zonguldak karaelmas üniversitesi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Katı fosil yakıt tüketimi, dünya enerji üretiminde gün geçtikçe artan bir öneme sahiptir. Petrole alternatif yüksek rezerve sahip enerji kaynağı olması, kömürle ilgili çalışmaların artmasına neden olmuştur. Kömüre dayalı termik santrallerde yüksek ısıl kapasite ve yüksek yanma verimliliği elde etmek için, pülvarize enjeksiyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, kömür mikronize boyutta öğütüldükten sonra yakma kazanlarına gönderilmektedir.

Öğütme, enerjinin en yaygın ve en verimsiz olarak kullanıldığı işlem birimidir. Özellikle, tane boyutu küçüldükçe tanelerin kırılmaya karşı olan dirençlerinin artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarları da aşırı bir şekilde artmaktadır. 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 et al. 1989, Gao and Forssberg 1993, Yang et al. 2006). Konvansiyonel değirmenlerde, öğütme verimi 75 μm altındaki boyutlarda çok azalmakta ve öğütmede harcanan enerjinin önemli bir bölümü faydalı bir iş yapmadan (boyut küçültme) ısı ve ses olarak kaybedilmektedir. 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 μm 'ye kadardır. Bu sınırların altına inildiğinde bilyalı değirmenlerin spesifik enerjileri üstel olarak artış gösterir (Liddell 1986, Jankovic 2003, Ozkan and Yekeler 2003, Deniz 2004, Fuerstenau et al. 2004, Makokha et al. 2006).

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 μm altında öğütme yapmak neredeyse imkânsız iken, karıştırmalı değirmenlerde bu olasıdır (Bilgili et al. 2006, Ding et al. 2007). Karıştırmalı değirmende aşındırma ve kesme kuvvetleri etkilidir. Özellikle ince tanelerin öğütülmesinde kesme kuvvetinin diğer kuvvetlere göre daha etkili olduğu bilinmektedir.

Karıştırma değirmeni, sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir ekseninde dönen bir rotordan oluşmaktadır. 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 et al. 1995, Kwade 1999, Bilgili et al. 2004, Jankovic and Sinclair 2006, Sinnott et al. 2006, Ding et al. 2007). Öğütücü ortam olarak birkaç yüz mikrondan birkaç milimetreye kadar değişebilen bilyalar kullanılmaktadır.

Karıştırma değirmeni içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması, konvansiyonel değirmenlerle karşılaştırıldığında enerji tüketimlerinin oldukça düşük kalmasını sağlamaktadır (Kwade et al. 1996, Sinnott et al. 2006). Endüstriyel uygulamada, 20 t/s kapasiteli bir karıştırma değirmeni ile 6 µm'ye yapılan öğütme sonucunda harcanan enerjinin konvansiyonel değirmenlere göre %60 daha az olduğu kaydedilmektedir (Mankosa et al. 1986). Karıştırma değirmenleri 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 and Forssberg 2000).

Bu çalışmada, Çatalağzı Termik Santralinden (ÇATES) alınan ve tamamı 3350 µm altına kırılmış olan katı fosil yakıtı (ÇATES numunesi) ve bu malzemeden hazırlanan dar tane boyut gruplarında, laboratuvar ölçekli dikey pinli karıştırma değirmeni ve Bond bilyalı değirmende kuru olarak öğütme testleri yapılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirilerek her iki değirmenin öğütme performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ÇATES numunesinin bilyalı değirmende ve karıştırma değirmende değişen sürelerde öğütülmesi sonucu elde edilen öğütme ürünlerinin JKSİM simülasyon programı ile simülasyonu yapılmıştır.

ÇATES 2x150 MW gücündedir. Santralin elektrik üretimi tam yükte 2×10^9 kWh/yıl olarak planlanmıştır. ÇATES'de enerji, TTK Genel Müdürlüğü'nün Kozlu, Üzülmüş ve Çatalağzı lavvarlarından ve rödevans karşılığı üretim yapan özel sektöre ait sahalardan temin edilen yakıtın istenilen boyutun altına öğütülerek yakılması ile üretilmektedir.

Çatalağzı Termik Santralinde kullanılan katı fosil yakıt 3100 ± 100 Kkal/kg ısı değeri olup, 46 ± 2 kül içeriklidir. Kullanılan yakıt miktarı 5000–5500 t/gün olup, yıllık tüketilen miktar 1,5–1,7 milyon tondur. Katı fosil yakıt, Çatalağzı lavvarından demiryolu ve bantlar ile Kozlu, Üzülmüş ve rödevans sahalarından ise demiryolu ve kamyonlarla ÇATES stok sahasına

aktarılır. Toplam 170.000 ton kapasiteli stok sahasından park makineleri ile alınan katı fosil yakıt, taşıyıcı bantlar üzerinden değirmen bunkerlerine gönderilir. Bunkerlerden değirmen gaz kanalına aktarılaraq nemi alınan yakıt değirmenlerde öğütölür. Santralde 2 ünite mevcut olup, her bir ünite 6 adet değirmen vardır. Bunlardan bir tanesi yedektir. %100 yük, 5 değirmenle karşılanır. Değirmen motoru 740 kW gücündedir. ÇATES’de kullanılan değirmenler çarpmalı tiptir. Değirmenin gövdesi fan (rotor), stator ve vagon olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Fan, değirmenin hareketli kısmıdır. Değirmenlerde kömürün öğütölmesi için 2750 mm çapında fanlardan yararlanılmaktadır. Stator, fanın içerisinde çalıştığı sabit dış muhafazadır. Salyangoz formunda olup, fan çevresine bakan yüzeylerin tamamı aşınma zırhlarıyla kaplanmıştır. Vagon, statorun ön tarafında bulunan, sıcak gaz ve kömürün sıcak gaz kanalından değirmene akışını sağlayan bölümdür. Değirmen fanı kömürün kurutulması için gerekli olan 900–950⁰C civarındaki sıcaklıktaki gazı kazandan emer. Emilen gaz, kömür akış oluklarından sıcak gaz kanalına dökülen kömürün değirmene gelinceye kadar ve değirmende öğütölmesi esnasında kurutulmasını sağlar. Değirmen boğazı çıkışında bulunan separatör damperleri pulverize kömürün tane iriliğini ayarlamaktadır. Seçilen damper açısına uygun irilikteki toz kömür yakıcılara gitmekte, separatörden geçemeyen iri taneli kömür ise tekrar öğütölme üzere geri dönüş menfezinden değirmen vagonuna dökülmektedir. Çatalağzı Termik Santralı değirmen çıkışı öğütölmiş üründe 125 µm’den iri malzeme miktarı %12–19 arasındadır. Her bir değirmen saatte 32 ton kömür öğütme kapasitesine sahiptir. Fakat hali hazırda mevcut çarpmalı değirmenler saatte 26 ton kömür öğütmeaktadır. Alınan öğütölmiş üründe d₈₀ yaklaşık 100 µm’dir. Öğütme sırasında çarpmalı değirmen 470 kW’s enerji çekmektedir. Yani tesis ölçekte, öğütmede harcanan enerji yaklaşık olarak 18 kW’s/t olarak hesaplanabilir.

Değirmenlerden fanın savurmasıyla yakıcılara basılan pulverize kömür sıcaklığı yaklaşık 170 ⁰C’dir. Kazanda yanma sonucu elde edilen ısıyla, kazan çeperlerindeki boru demetleri içerisinde geçirilen saf su, buhara dönüştürölür. Elde edilen kızgın buhar, buhar sevk boruları üzerinden türbine ulaşır ve türbin kanatlarına çarparak türbin milinin dönmesini sağlar. Türbin miline akuple edilmiş jeneratör rotoruna dönme hızı 3000 dev/dk’ya ulaştığında ikaz verilerek jeneratör çıkışından elektrik enerjisi elde edilir (Güher 2007, ÇATES 2007).

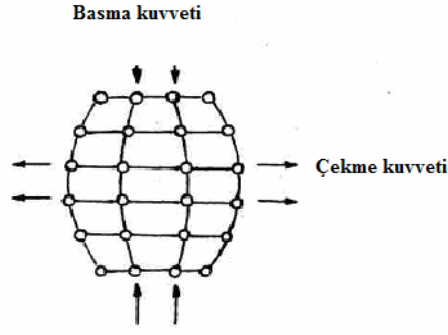
BÖLÜM 2

BOYUT KÜÇÜLTME

Boyut küçültme katı maddelerin kendinden küçük parçalara ayrılması işlemidir Boyut küçültmenin gerçekleşmesi için, dışardan uygulanacak kuvvetle katı cisim parçalarını bağlı tutan iç kuvvetlerin yenilmesi gerekir. Genel olarak madencilikte, cevherin ocakta patlatılmasından değirmen içinde toz haline gelinceye kadar geçirdiği işlemlere "boyut küçültme" denilmektedir. Cevher hazırlamada boyut küçültme için uygulanan işlemler için "kıрма" ve "öğütme" deyimleri kullanılmaktadır. Bunlar arasındaki fark, kırmada elde edilen ürünün öğütmeye nazaran daha iri olmasıdır. İstenilen boyuta kıрма yapılırken besleme boyutu kırıcının ağız açıklığına ve ürün boyutu ise kırıcının boğaz açıklığına uygun olacak şekilde kıрма yapılır. Boyut küçültme işlemleri, kimya endüstrisi, cevher hazırlama tesisleri, çimento endüstrisi, seramik endüstrisi gibi çeşitli endüstri dalları içinde büyük önem taşımaktadır. Bu sektörlerde öğütmeden ziyade "mikronize öğütme" deyimini kullanılmaktadır.

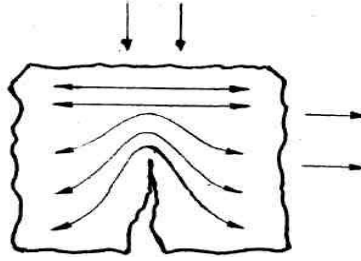
2.1 BOYUT KÜÇÜLTMENİN TEMEL PRENSİPLERİ

Boyut küçültmeyi tam olarak ifade eden temel prensipler henüz bulunamamıştır. Bunun nedeni, konunun atom veya molekülleri birleştirici kuvvetler altında belirli bir düzen içinde olan katı haldeki cisimlerle ilgili olmasıdır. Katılar genellikle farklı eksenler boyunca farklı özellikler gösteren homojen olmayan bir yapıda, kristal veya amorf fazın karışmasından meydana gelirler. Kristal yapıda metal veya minerallerin pek çoğu bulunur. Kristal yapı kendi içinde atomik ve moleküler kristal olmak üzere ikiye ayrılır. Kristal yapıda atom veya moleküllerin dizilişleri onları birlikte tutan fiziksel ve kimyasal bağların büyüklük ve tiplerine bağlıdır. Bu bağlar; iyonik bağ, kovalent bağ, hidrojen bağ, metalik bağ, Van der Waals bağ olarak ifade edilebilir. Katı cisimleri meydana getiren kristal kafesleri içindeki atomik bağlar küçük mesafelerde etkili olabilmekte ve gerilme kuvvetine tabi olduklarında kırılabilir. Gerilme ve bunun sonucu olan uzama pratikte çekme veya basma kuvveti ile elde edilmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Basma ve çekme kuvvetlerinin şematik gösterimi.

Kayaçlar genel olarak homojen olmayan çok kristalli bir yapıya sahiptir. Eş dağılımlı bir yüke maruz kaldıkları zaman bile, kayacı oluşturan minerallerin mekanik özelliklerine bağlı olan bir dağılıma söz konusu olup kayaç içindeki gerilmeler her yere eşit olarak dağılmamaktadır. Çatlak ucuna konsantre olan gerilme, bu noktadaki atomik bağı koparmak için yeterli olmakta ve bu kopma yarık boyunu uzatmaktadır (Şekil 2.2.).



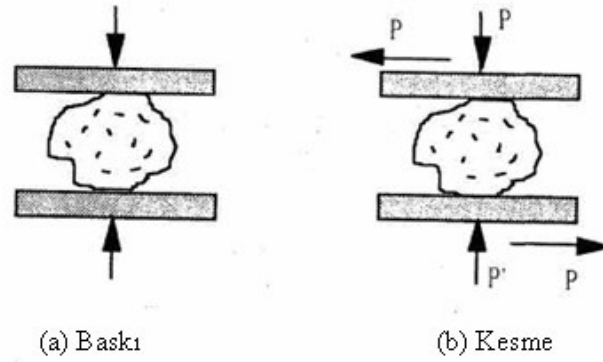
Şekil 2.2 Çatlak etrafında oluşan gerilmelerin şematik gösterimi.

Böylece bu civardaki gerilmeler artmakta ve devam eden çatlama hızlı şekilde kayaç içinde dağılmaktadır. İri tanelerden meydana gelen kayaçlarda çatlak bulma ihtimali daha fazla olduğundan bunlar daha düşük gerilme kuvvetleri altında kırılabilmektedir (İpekoğlu ve Tanrıverdi 2002).

2.2 BOYUT KÜÇÜLTME MAKİNELERİNDEKİ ZORLAMA ÇEŞİTLERİ

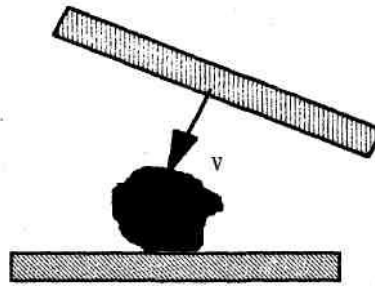
Boyut küçültme işleminde harcanan enerji genellikle bir motorla hareket ettirilen makine parçası vasıtası ile tane üzerine geçer. Boyut küçültme makinelerinde çalışan yüzeylerin taneyi zorlama şekilleri genellikle baskı, kesme, darbe, çarpma veya vurma zorlaması şeklinde olabilir. Çok defa bir kaç cins kuvvet bir arada etki edebilir (Wills 1985, Ergin 1999).

Baskı; bu tip zorlamaya birçok boyut küçültme makinesinde rastlanır (Şekil 2.3a). Biri sabit, diğeri hareketli ve zorlamayı ileten iki çalışan yüzey arasında taneler gidip gelme hareketi sırasında basınca tabi tutulurlar. Örneğin; çeneli kırıcılarda merdaneli ufalayıcılarda asıl ufalayan kuvvet baskı zorlamasıdır. Kesme; bu tip zorlama, nispeten küçük olan baskı kuvvetlerinin yanı sıra genellikle daha büyük ters yönlü kesme kuvvetlerinin etkisi altında olur (Şekil 2.3b). Kesme zorlamasının hızı, çarpma ve darbe zorlamalarının hızları yanında küçüktür. Kesme zorlaması ile boyut küçültmeye maruz kalan taneler, birbirlerine göre ters yönlü hareket eden iki yüzey arasında bir gerilmeye tabi tutulurlar. Un değirmeni, kahve değirmeni gibi ufalayıcılar bu tip boyut küçültmeye örnektir. Ayrıca bilyalı veya çubuklu değirmenlerde kesme zorlaması özellikle kaskat çalışma koşullarında etkilidir.



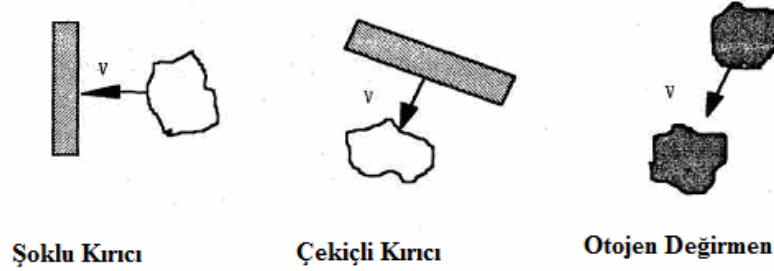
Şekil 2.3 Baskı ve kesme kuvvetleriyle zorlamanın şematik gösterimi.

Darbe; darbe yoluyla zorlama önemlidir ve birçok boyut küçültme makinesinde etkindir (Şekil 2.4). Bunlarda çalışan yüzey, ya konik kırıcılarda olduğu gibi kırıcı koniler vasıtası ile zorlamayı yapmaktadır veya aktarmalı değirmenlerdeki öğütücü ortam gibi hareketlidir (katarakt etki). Oldukça yüksek hızla hareket eden bir eleman tane üzerine çarparak boyut küçültmeyi meydana getirir (İpekoğlu ve Tanrıverdi 2002).



Şekil 2.4 Darbe yoluyla zorlamanın şematik gösterimi.

Çarpma; bu tip zorlama, yüksek hızdaki serbest hareket eden tanelerin sabit bir çarpma elemanına veya bir diğerine çarpması halinde söz konusudur (Şekil 2.5). Çarpma zorlamaları şekil değiştirme zorlaması şeklinde değildir ve buraya kadar özetlenen zorlama cinslerinden başkadır. Çalışma şekli nedeniyle çarpma ile boyut küçültmede, parçalanma öncelikle zayıf olan tane sınırları boyunca olur. Dolayısı ile selektif bir boyut küçültme söz konusudur. Çarpma hızları iri ve orta boyut küçültmede genellikle 20–40 m/sn civarındadır. Öğütmede ise oldukça yüksektir (Önal ve Ateşok 1994).



Şekil 2.5 Boyut küçültme makinelerinde oluşan çarpma şekilleri.

2.3 BOYUT KÜÇÜLTME TEORİSİ VE BOYUT KÜÇÜLTME KANUNLARI

Boyut küçültme, katı tanelerin daha küçük boyutlara indirgenmesi ile yeni yüzeylerin oluşturulması işlemi olup, bilim ve teknolojiye çok fazla uygulama alanı bulmaktadır. Boyut küçültme işleminde kullanılan enerji oldukça büyük olup, ancak bu enerjinin küçük bir kısmı gerçek anlamda boyut küçültmede kullanılır, günümüzde üretilen enerjinin %5'inin boyut küçültmede harcandığı tahmin edilmektedir. Endüstrinin boya, ilaç, çimento, pigment vb. gibi kollarında da ince öğütülmüş tane gereksinimi giderek artmaktadır. Bunun sonucu boyut küçültmede harcanan enerjinin önümüzdeki yıllarda daha da artacağı söylenebilir. Böylece boyut küçültme olayını açıklamanın, kırma ve öğütme makinelerinde meydana gelen enerji kaybının nedenini araştırmanın önemi ortadadır.

Bir boyut küçültme işlemi için verilen enerji ile boyut küçültmede sarf edilen enerji miktarı arasındaki ilişkileri ortaya çıkarabilmek amacı ile bugüne kadar pek çok hipotezler ortaya çıkarılmıştır. Bu hipotezler daha ziyade deneysel yollarla ispatlanmaya çalışılmıştır ve henüz teori olan boyut küçültme kanunları çıkarılmıştır. Bunlar içinde önemli olanlar Rittinger (1867), Kick (1885) ve Bond (1951) kanunlarıdır.

2.3.1 Rittinger Kanunu (Yüzey Teorisi)

Rittinger boyut küçültmede harcanan enerjinin, oluşan yeni tane yüzey alanları ile orantılı olduğunu savunmaktadır. Rittinger kanunu yüzey alanı üzerinden basit olarak aşağıda verilen Eşitlik 2.1 ile ifade edilir.

$$E = C_r(S_2 - S_1) \quad (2.1)$$

Burada;

E: Verilen enerji (kWs/t)

S₁: Besleme malzemesinin yüzey alanı (cm²/cm³)

S₂: Ufalanmış malzemenin yüzey alanı (cm²/cm³)

C_r: Rittinger sabiti

Rittinger, taneleri küp şeklinde kabul etmiştir. D boyutlu kübün yüzey alanı 6D²'dir. Boyut küçültme kademesinde D boyutlu küp yarıya bölünürse, 8 adet D/2 boyutlu küp meydana gelecektir. Böylece yeni yüzey alanı, 8x6(D/2)²=12D²'dir. Boyut küçültme kademesinde D boyutlu kübün boyut küçültme oranı 4 olacak şekilde D/4 boyutuna ufalandığını düşünürsek meydana gelen yeni küp sayısı 64 ve elde edilen yeni yüzey alanı, 64x6(D/4)²=24D² olacaktır. D/2 boyut küçültmeden sonra yüzey alanı artışı, 12D²-6D² = 6D² olarak gerçekleşirken, D/4 boyut küçültmeden sonra yüzey alanı artışı, 24D²-6D²=18D² olmaktadır. Birim hacimdeki malzemenin yüzey alanı, x²/x³=1/x olarak düşünülürse; Rittinger kanununu aşağıdaki Eşitlik 2.2 ile ifade etmek mümkündür.

$$E = C_r \left[\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right] \quad (2.2)$$

Burada;

x₁: Besleme malı tane iriliği

x₂: Ufalanmış malın tane iriliği olmaktadır.

Yapılan çeşitli enerji hesaplamaları ve deneysel veriler, boyut küçültmede Rittinger'in öngördüğünden çok daha fazla enerji harcandığını, bu enerjinin ancak %1 kadarının yeni yüzeylerin oluşması için yeterli olduğunu göstermiştir. Geri kalan enerji ise, önemli ölçüde ısı enerjisi şekline dönüşmektedir.

2.3.2 Kick Kanunu (Hacim Teorisi)

Kick, olayı tane hacmi küçülmesi yönünden ele almakta ve homojen kayaçların kırılmasında hacim küçülmesi ile orantılı bir enerji sarfı gerektiğini iddia etmektedir. Kanunun ifadesi; "Geometrik olarak birbirine benzer iki cisimde aynı derecede boyut küçültme elde etmek için gerekli enerji, bu cisimlerin hacimleri (veya ağırlıkları) ile orantılıdır. Diğer bir deyişle; belirli hacimsel değişmeler için aynı enerji sarfıyatı gereklidir" demektedir.

Kick, hipotezinde tanelerin küp şeklinde olduğunu kabul ederek boyut küçültmede sarf edilecek enerjiyi boyut küçültme oranı ile ilişkilendirmiştir. Aynı boyut küçültme oranları için aynı miktarda enerji harcanacağını savunmaktadır. Örneğin; D boyutlu bir küp D/2 olarak ufalandığında, boyut küçültme oranı 2'dir. Bu boyut küçültme için E enerjisine gerek varsa, D/2 boyutundan D/4 boyutuna ufalandığında da, boyut küçültme oranı 2 olacağından, aynı enerjiye gerek vardır şeklinde ifade etmektedir. Yani 1 ton malzeme 10 cm'den 5 cm'ye indirildiğinde, boyut küçültme oranı 2 olup, gerekli enerji E'dir. Aynı şekilde, 5 cm'den 2,5 cm'ye ufalanınca boyut küçültme oranı 2 olup gerekli enerji yine E'dir tezini savunmuştur.

Boyut küçültmenin kollektif karakterini de göz önünde bulundurarak Kick, kanununu matematiksel olarak aşağıdaki Eşitlik 2.3 ile ifade etmiştir.

$$E = C_k \log \frac{x_1}{x_2} \quad (2.3)$$

Burada;

x_1/x_2 : Boyut küçültme oranı

C_k : Kick sabitidir.

Ancak, yapılan pratik ölçümler Kick kanununun gerçekte elde edilen sonuçlara Rittinger teorisinden daha çok uyumsuzluk gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Kayaç kırılması, homojen bir işlem olmayıp kayaç içindeki pek çok sayıda düzensizlikler tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar çeşitli çatlaklar, kristal düzlemleri, dislokasyonlar ve farklı tane boyutlarında oluşan çok çeşitli zayıflık bölgeleridir. Bu çok değişken zayıflık bölgeleri nedeniyle kayaç, hesaplanan teorik homojen elastik limitinin çok altında bir gerilme kuvveti ile kırılabilir. Ayrıca bu kanunun tersine boyut küçültmenin, Rittinger teorisinde olduğu gibi, malzeme incelidikçe zorlaştığı bilinmektedir. Her boyut küçültme adımı (x_1/x_2) için gerekli enerji miktarı artmaktadır. Hâlbuki Kick teorisinde aynı boyut küçültme oranları için enerji sabit kalmaktadır.

2.3.3 Bond Kanunu

Bond, Rittinger ve Kick teorilerine karşı çıkmış ve "Boyut küçültmede faydalı iş meydana getirilen çatlak uzunluklarıyla orantılıdır" görüşünü savunmuştur. Çatlak uzunluklarının ise kırılma sonunda yeniden meydana gelen yüzeylerin karekökü ile ters orantılı olduğu bulunmuştur.

Boyutu x olan bir kübü kırmak için gerekli enerji kübün hacmi, x^3 ile orantılıdır. Çatlak meydana gelince gerilme nedeniyle enerji yüzeye çıkar ve x^2 ile orantılı olur. Düzensiz parçalar kırılınca enerji kayaç içinde eş dağılımlı olarak dağılmadığından x^2 ile x^3 arasında orantılı olarak değişir. Ortalama değeri ise $x^{2.5}$ ile orantılı olmaktadır (Rittinger ile Kick teorileri arasında bir değer). Birim hacimdeki düzenli tanelerin sayısı $1/x^3$ ile orantılı değiştiğinden, birim hacimdeki parçayı kırmak için gerekli enerji $x^{2.5}/x^3 = 1/\sqrt{x}$ ile orantılıdır. Böylece x_1 : kırılacak tane ebadı, x_2 : kırılmış tane ebadı ise, lüzumlu enerji: $1/\sqrt{x_2} - 1/\sqrt{x_1}$ ile orantılıdır.

Bond teorisinin genel matematiksel ifadesi aşağıda Eşitlik 2.4 ile verilmektedir.

$$E = 2C_B \left[\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right] \quad (2.4)$$

Pratik amaçlar için, x_1 yerine kırılacak malın %80 'inin geçtiği elek açıklığı, x_2 yerine kırılmış malın %80 'inin geçtiği elek açıklığı alınabilir. Her malzemenin boyut küçültme için ihtiyaç göstereceği enerji miktarı farklıdır. Bond "İş Endeksi" (malzemelerin kırılma ve öğütmeye karşı gösterdikleri direnci ifade eden bir parametre) diye bir değer tanımlamış ve bunu "Sınırsız büyüklükteki parçalardan meydana gelmiş bir malzemenin birim ağırlığının (örneğin; 1 ton) %80'i 100 μ m altına geçecek şekilde boyut küçültülmesi için gerekli enerji" olarak tarif etmiştir. Söz konusu teori aşağıda Eşitlik 2.5 ile ifade edilir,

$$E = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{x_2}} - \frac{10}{\sqrt{x_1}} \right) \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5’de;

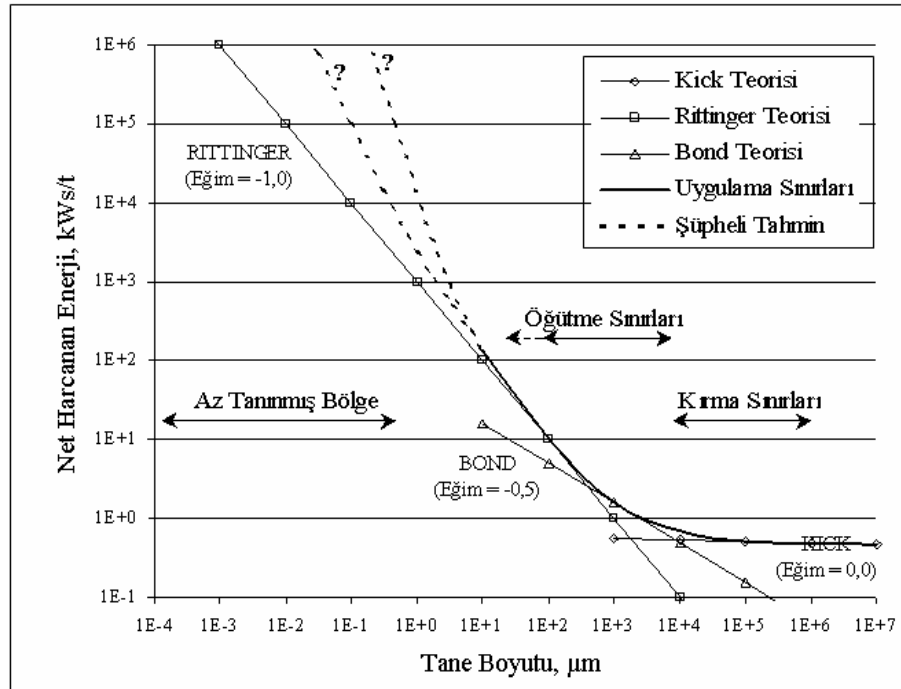
E : Birim ağırlığı kırmak için gerekli enerji, (kWs/t)

W : İş endeksi, (kWs/t)

x_1 : Kırılacak malzemenin %80’inin geçtiği elek ebadı (μm)

x_2 : Kırılmış malın %80’inin geçtiği elek ebadı (μm)

Cevher hazırlamada çoğunlukla heterojen cisimler söz konusudur. Bu nedenle W_i , farklı yataktan alınan aynı cevher için dahi değişmektedir. Minerallerin doğal hallerinde bir tane büyüklüğü vardır. Bu büyüklükten daha iri ve daha ince boyutlara boyut küçültme işlemlerinde iş endeksi değişir. Ayrıca kırıcı aletin randımanı da iş indeksini etkiler. Bazı maddelerin iş indeksleri literatürde tablolar halinde verilmektedir. Ancak tam doğru sonuç için her malzemenin iş indeksini laboratuvarlarda, uygulamada kırılacak boyuta yakın bir boyutta tayin etmek gerekir. Bu üç teorinin yorumunu yapan Hukki (1961) teorilerin belirli boyut sınırlarında geçerli olduğunu göstermiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Boyut küçültmede tane boyutuna karşılık harcanan net enerji (Lynch 1977).

2.4 ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK

Bir malzemenin öğütülmesine birçok faktör etki eder. Bunlardan ikisi malzeme karakterine bağlı olan sertliği ve öğütülebilirliğidir. Sertliği çok yüksek olan (mesela kuvars) bir malzemenin öğütülebilirliği çok kolay olabilir. Veya tersi olarak sertliği düşük (mesela linyit) bir malzemenin öğütülebilirliği daha zor olabilir. Çeşitli araştırmacılar sertlik ve öğütülebilirlik için çeşitli tarifler yapmışlardır. Bunların içinde en çok kullanılanları, sertlik için “Hardgrove indeksi” ve öğütülebilirlik içinse “Bond iş indeksi”dir. Öğütülebilirlik, malzemenin öğütme işlemine karşı gösterdiği direnç olarak adlandırılır. İş indeksi, cevherin öğütülebilirlik özelliklerine bağlı olup değirmenlerin boyutlandırılmasında enerji tüketimi hesaplamalarında, öğütme devrelerinin verimliliğinin belirlenmesinde kullanılan bir üretim parametresidir. Öğütülebilirlik deneyleri iki kategoride incelenirler. Birincisi, Bond iş indeksi deneyleri ile belirlenir ve belli bir boyuttan daha ince olan malzeme miktarının üretimi için gerekli olan enerjiyi ölçer (Bond and Maxon 1938, Bond 1947, 1961). İkinci kategori deneyleri ise, Hardgrove indeksi (Hardgrove 1938) ile belirlenir. Standart bir besleme boyut aralığı ve miktarı ile öğütülebilirliği değerlendirmek için uygulanır (Mcintyre and Plitt 1980).

2.4.1 Bond Öğütülebilirlik Deney Yöntemi

Bond öğütülebilirlik testinde, numunenin tamamı 6 mesh’in altına geçecek şekilde kademeli olarak kırılır. Fakat gerekli durumlarda malzeme daha da küçük boyutlara kırılabilir. Kırılan malzemedan 8–10 kg alınarak teste tabi tutulur. Genel olarak 65–100 mesh’lik elekler kullanılır. Besleme malzemesinin göreceli olarak daha ince malzeme içermesi elemeyi zorlaştırırken, iri malzemede son ürün düzeneğinden dengeye ulaşmak zor olmaktadır.

Test için, 6 mesh altına kırılan malzemedan konileme dörtlleme yardımıyla yaklaşık 1000 gram örnek alınır ve bu örneğin boyut analizi yapılır. Logaritmik düzende tane boyuna karşılık birikimli elek altı grafiği çizilerek, beslemenin %80’inin geçtiği boyut (F , μm) belirlenir. Deney numunesinden konileme dörtlleme yardımıyla alınan numune 1000 cm^3 lük dereceli mezüre 700 cm^3 lük standart hacim elde edilinceye kadar doldurulur. 700 cm^3 lük hacim tartılır (w). Elde edilen malzeme değirmene beslenecek miktar olup test süresince bu miktar sabit tutulur.

Bond öğütülebilirlik deneyinde $30,5 \times 30,5\text{ cm}$ boyutlarında, kenarları yuvarlatılmış, içerisinde kaldırıncı plakaları bulunmayan, üzerinde $10,2 \times 20,4\text{ cm}$ ebatlarında bir boşaltma kapağı

bulunan, 70 dev/dk de çalışan ve “Bond değirmeni” olarak adlandırılan bir bilyalı değirmen kullanılır. Şarj malzemeleri olarak çapları 38,1–12,7 mm arasında değişen, 285 adet, toplam 20125 gram ağırlığında çelik bilya beslenir. Standart test’te bilya dağılımları sırasıyla 43 adet 38,1 mm, 67 adet 31,75 mm, 10 adet 25,40 mm, 71 adet 19,05 mm, 94 adet 12,70 mm’ dir (TSE 7700, 1989). Değirmenin hacmi $22272,5 \text{ cm}^3$, bilyaların hacmi boşluksuz olarak 2810 cm^3 , bilyalar arası boşluğun hacmi 1920 cm^3 ve bilya yükünün boşluk hacmi ise 4730 cm^3 ’dür. Bu ölçümler suyun yer değiştirmesiyle ölçülmüştür.

Standart 700 cm^3 ’lük hacimdeki ve kütlesi tespit edilmiş numune değirmene bilyalarla birlikte tek tabaka oluşturulacak şekilde beslenir. Değirmen ilk dönüş (N_1) sayısı seçiminde şayet benzer cevher veya maddeler için daha önce çalışma yapılmış ise bu çalışmadan faydalanılır. Çalışma olmaması durumunda 100 devir ile denemeye başlanır. Değirmen, seçilen devir sayısını tamamladıktan sonra öğütme testinde numunenin tamamen öğütülmesi istenen tane boyutuna eşdeğer göz açıklıklı (P_1) referans eleğinden numune elenir. Elek üstü tartılır ve bulunan kütle değirmene konan kütleden çıkartılarak elek altının kütlesi (a) tespit edilir. Başlangıçta yapılan elek analizi ya da birikimli elek altı grafiğinden faydalanarak değirmene konan yükteki P_1 referans eleğinin altına geçecek olan numunenin kütlesi (b) bulunur. Bulunan miktar, elde edilen elek altı kütlesinden çıkarılarak net kütle (a-b) bulunur. Öğütülen net kütle değirmen dönüş sayısına bölünerek bu periyottaki öğütebilirlik (G_{bp1} , gr/dev) tespit edilir. İkinci periyotta değirmenden çıkan miktara (a) eşit miktarda malzeme değirmene beslenir. Değirmene uygulanacak dönüş sayısı, eklenen miktardaki (a) P_1 referans eleği boyutundan ince malzeme (c) daha önce yapılan elek analizinden faydalanılarak tespit edilir. Bu periyotta değirmendeki malzemenin kütlece %28,6’sının öğütülmesi beklenir. Dolayısıyla değirmendeki numunenin %28,6’sına tekabül eden kütle (d) gram olarak tespit edilir. Bu şekilde elde edilen d ve c kütleleri arasındaki fark bulunur ve bulunan değer 1. periyotta elde edilen G_{bp1} ’e bölünerek 2. periyottaki dönüş sayısı (N_2) tespit edilir. Bulunan devir sayısı uygulanarak işlem devam ettirilir. Değirmendeki yükün kütlece %28,6’sının öğütülmesi standart denge şartlarında kütlece %250 dönüş yükü verir. Bu andan itibaren yukarıdaki adımlar öğütebilirlik değerleri (G_{bp}) dengeye gelinceye kadar tekrar edilir. Yapılan işlemde dengeye ulaşıldığında, elde edilen son üç teste ait değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak ortalama öğütme değeri (G_{bp}) bulunur. Son üç periyottaki P_1 referans eleği boyutundan ince malzemeler birleştirilerek elde edilen malzemenin elek analizi ile tane boyut dağılımı bulunur. Bulunan sonuçlardan numunenin kütlece %80’inin geçtiği tane boyutu (P , μm) tespit edilir.

İşlemden elde edilen değerlerle öğütme iş indeksi (W_i) aşağıdaki Eşitlik 2.6 ile hesaplanır (Bond 1961, TSE 7700, İpek 2003).

$$W_i = \frac{44,5}{P_1^{0,23} \times (G_{bp})^{0,82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \times 1,10 \quad , \text{ kWs/t} \quad (2.6)$$

Değirmen içindeki bilya dağılımının homojen olmaması nedeni ile kuru öğütme için gerekli iş miktarı, yaş öğütmeye göre 1,3 kat fazladır (Bond 1961). Referans enerji gerekliliğine etki eden altı farklı faktör vardır. Bu faktörler, kuru öğütme, açık devre öğütme, besleme boyutu, çap etkisi, %80'i 70 μm 'den daha ince ürün boyutları için bilyalı değirmendeki ince öğütme ve bilyalı değirmenin boyut küçültme oranıdır. Böylece, bir öğütme işi için gerekli olan özgül enerji gereksinimi hesaplanabilir.

2.4.2 Hardgrove Öğütülebilirlik Deney Yöntemi

Her biri 25,4 $\pm$ 0,13 mm çapında olan 8 adet bilyanın hareket ettiği bilya yuvasından oluşan bir değirmen kullanılır. Bilyalar 20 $\pm$ 1 dev/dk hız ile döndürülür ve 29 $\pm$ 0,2 kg toplam basınçta güç sarf ederler. Deneyde kullanılacak numune boyutu -1190+590 μm 'dir. Bu boyut aralığına kırılmış, 100°C'de nemi uzaklaştırarak desikatörde soğutulmuş malzemeden 50 $\pm$ 0,01 gram alınarak değirmen 60 tur döndürülür ve 74 μm 'lik elekten elenir. Öğütülebilirlik değeri Eşitlik 2.7 ile hesaplanır.

$$\text{HGI} = 13 + 6,93D_{74} \quad (2.7)$$

D_{74} : 74 μm elek altı miktarı (gr).

Deney esnasındaki malzeme kaybı 0,4 gramdan fazla olduğunda deney tekrar edilmelidir. Hardgrove değirmeni kömürlerin öğütülebilirliğini ölçebilen bir cihazdır. ASTM D-409 standartlara uygun hale getirilmiş kömürlerin relatif öğütülebilirliği veya kömürlerin toz haline getirilmesindeki kolaylığı saptama işlemini kapsar. Hardgrove öğütülebilirlik indeksi (HGI) ile Bond iş indeksi (W_i) arasındaki ilişki Eşitlik 2.8 ile verilmiştir (Bond 1961).

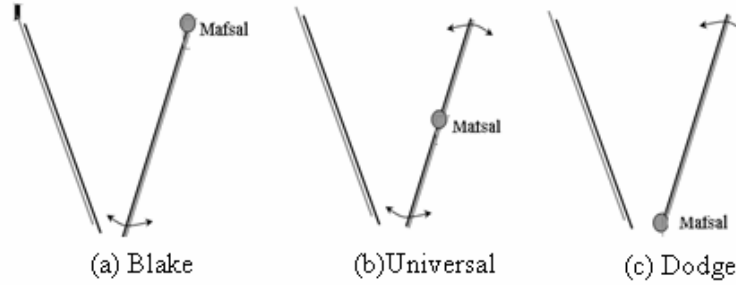
$$W_i = \frac{435}{\text{HGI}^{0,5}} \quad (2.8)$$

2.5 KIRMA

Boyut küçültme işleminde kullanılan kırıcılar, birincil, ikincil ve üçüncül olmak üzere üç grupta incelenebilir (Horst 1985). Birincil kırıcılar iri, ikincil kırıcılar orta ve üçüncül kırıcılar ise ince kırma yaparlar. Çeneli ve jirator kırıcılar genellikle iri kırmada kullanılır. Orta kırma yapan kırıcılar ise, konili ve çekiçli kırıcılardır. İnce kırma yapan kırıcılarda, merdaneli, çekiçli, kısa-kafa konili kırıcılardır. Ayrıca bu kısımda, kömür kırmada da yaygın olarak kullanılan Barmak kırıcı ve Bradford tipi döner kırıcıdan temel özellikleri ile bahsedilmiştir.

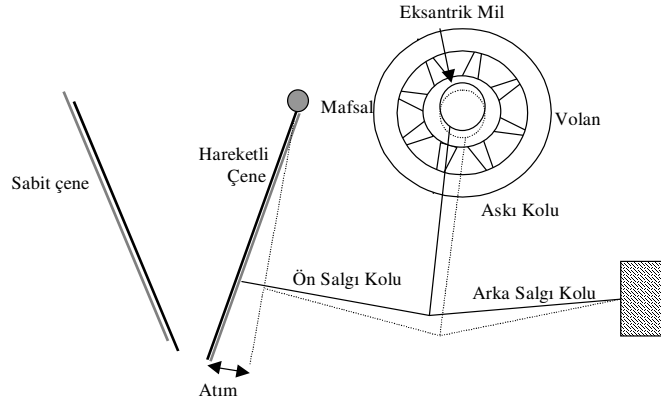
2.5.1 Çeneli Kırıcılar

Bu kırıcılarda V şeklinde karşılıklı yerleştirilmiş biri sabit diğeri hareketli iki çene bulunur. Sabit çene üzerine doğru yaklaşma-uzaklaşma hareketi yapan karşıt çene, kırılacak tanenin iki çene arasına sıkışmasına yardım eder. Hareketli çenenin bu hareketini sağlayan mekanizmaya göre çeneli kırıcılar çeşitli adlar alırlar (Şekil 2.7). Hareketli çenenin bağlantı (mafsal) noktası çenenin üst ve alt ucundan olmak üzere üç tarzda yapılmaktadır (Wills 1985).



Şekil 2.7 Hareketli çenenin bağlantı noktasına göre çeneli kırıcılar.

Blake tipi çift salgı kollu çeneli kırıcı Şekil 2.8’de verilmiştir. Eksantrik bir mil asılı bir plaka, milin dönüşü ile aşağı yukarı doğru harekete geçer. Plakanın alt ucu boyunca açılı yerleştirilmiş iki destek kolu, aşağı yukarı hareket eden kolun itme ve çekmesi ile açının değişmesine neden olur bu da destek kollarının yatay yönde ileri geri hareketini meydana getirir. Hareketli çenenin hareketi en fazla alt çıkış ucunda gözlenir. Kırıcının kırma sırasında hacimce genişleyen cevher tarafından durdurulmaması için ağır dökümden yapılmış bir volan kırıcı kafasının hareketini kuvvetlendirir.



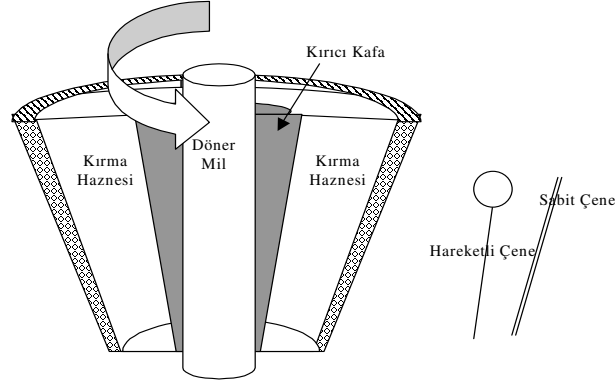
Şekil 2.8 Blake tipi çift salgı kollu bir çeneli kırıcının çalışma mekanizması.

Blake tipi tek salgı kollu kırıcılarda, askı kolu eksantrik mile bağlanmadığı için bu kırıcılar daha hafif ve hacimce daha küçük makinelerdir. Bu aletlerin çift salgı kolludan bir parça farklı yanı, kırma hareketi yapan çenenin yatay git-gel hareketinin yanı sıra dikey hareket de yapmasıdır. Bu iki hareketin birleşmesi ile eliptik bir yörünge içinde kırılan taneler çıkış açıklığına doğru itilmeye maruz kalır. Yatırım maliyeti çift salgı kolluya nazaran %50 daha fazladır ve sert aşındırıcı cevherlerin ufalanmasında tercih edilirler. Boyut küçültme oranları 4-7 arasında değişir ve kırma yaptıkları aralık 55–0,5 cm arasındadır (Kaytaç 1990). Dodge tipi çeneli kırıcılarda hareketli çene çıkış ağzındaki sabit bir mile bağlıdır. Bu yüzden çıkış açıklığı sabit olup ürünün tane büyüklüğü daha iyi kontrol edilir. Buna karşılık çıkış açıklığında çene ucunun çok az bir hareketi söz konusu olduğu için, boğulmaları ve tıkanmaları önleyecek çenenin aşağı yukarı bir hareketi hemen-hemen hiç yoktur (Weiss 1985).

Çeneli kırıcılar ağız boyutlarına göre tanımlanırlar. Örneğin ağız boyutları 2000x1400 mm'lik bir çeneli kırıcının çenelerinin boyu 2000 mm ve çenelerinin arası ise 1400 mm'dir (Yiğit 1997). Çeneler açılırken motor üzerine yük binmez. Çenelerin kapanma hareketi esnasında, tanelere önce az bir kuvvet daha sonra dönüşün tamamlanmasıyla büyük bir kuvvet biner. Taneler kavranıp kırıldıkça, çene ağızlarının açılmasıyla aşağı doğru düşerek kırıcıdan ayrılırlar. Küçük çeneli kırıcılar orta sertlikteki bir malzeme için 6:1 boyut küçültme oranında (BKO) ton başına saatte 1,0–1,1 kW's enerji harcarken, aynı BKO için büyük kırıcılar 0,26 ile 0,30 kW's enerji harcamaktadırlar. Kırma işlerinde harcanan enerji ton başına 0,2 ile 2 kW's arasında değişir (Ergin 1999).

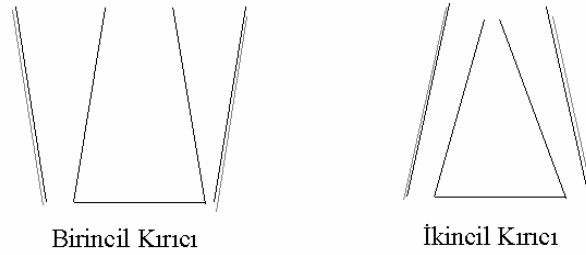
2.5.2 Konili Kırıcılar

Konili kırıcılar bir tür çeneli kırıcı olarak tanımlanabilir. Sonsuz sayıda çeneli kırıcıların bir nokta etrafında daire oluşturacak şekilde yan yana getirilmesinden oluşan bir kırıcı olarak düşünülebilir (Lynch 1977). Kırma işlemi konik bir çanak içine oturtulan konik merdanelerle yapılır (Şekil 2.9).



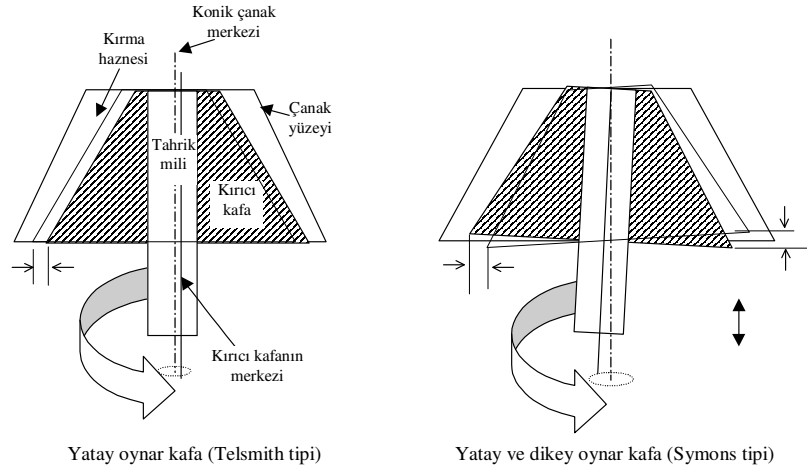
Şekil 2.9 Konili kırıcı kesit görünümü.

Çanak kısım ile konik göbek arasında kalan bölgeye kırma haznesi denilir. Konili kırıcılarda kavrama açısı 21° – 24° arasındadır. Çalıştığı tane boyutu 200–1 cm arasındadır. BKO 6–9 arasında değişir. Çanak kısmın iç yüzeyi düz veya kavisli astarlarla kaplanır. Bu astarlar aşındıkça değiştirilir. Birincil kırma yapan döner kırıcılarda hız 100–300 dev/dk arasında değişmektedir. İri kırma yapanlarında kırıcı göbek yukarıdan asılıdır ve kırıcı gövde (çanak) ile kırıcı kafa arasındaki açıklık cevherin serbest düşmesine elverişlidir. İkincil kırma yapanlarda ise kırıcı kafa alttaki tahrik mekanizmasına oturmakta ve serbest olarak beslenen cevherin kırıcı hazneye girebilmesi için hem yatay hem de dikey doğrultuda hareket etmek durumundadır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Birincil kırma ve ikincil kırma yapan konili kırıcı kesitleri.

İkincil kırma işleminde kullanılan konili kırıcılar çalışma şekline göre; oynar milli konili kırıcı (Symons tipi) ve sabit milli konili kırıcı (Telsmith tipi) olarak sınıflandırılırlar. Sabit millide kırma işini yapan göbek kısmı, dikey doğrultuda eksantrik bir mil etrafında dönerken yalnızca yatay doğrultuda cevheri sıkıştırır. Oynar millide ise, göbek açisal olarak dik eksenenden kaçık döner. Bu nedenle hem yatay hem de dikey doğrultuda bir sıkıştırma yapmış olur. Şekil 2.11’de bu iki tip kırıcı kafanın çalışması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Sabit ve döner eksenli kırıcılarda kırıcı kafanın hareketi.

Beslenen malzeme boyutu, çanak ile göbek merdane arasındaki boşluğun %80’i kadardır. Kapasite 0,5 ile 350 t/s arasında değişim gösterir. Göbekteki merdanenin bağlı olduğu milin dönüş hızı 175–700 dev/dk olabilmektedir. Ayarlanabilen çalışma parametreleri; dönüş hızı, ürünün alındığı çanak ile merdane arasında alt uçtaki boşluk yani boğaz açıklığı ayarı ve merdane ile çanak arasındaki boşluk, yani atım miktarıdır. Konili kırıcılar sert ve aşındırıcı cevherler için elverişlidir, yapışkan ve killi malzemede çalışamazlar. Hızlı boşalma ve tıkanmama özellikleriyle konili kırıcılar 3-7 arasında BKO verebilir.

2.5.2.1 Sabit Milli Konili Kırıcı

Bu kırıcıda merdane denilen kırıcı kafa eksantrik bir yatakta kendi etrafında döner. Kafa bu eksantrik mil hareketiyle konkav çanak yüzeylerine doğru yaklaşır ve uzaklaşır. Bu hareket etkisi altında tane ezilir. Kırılan parçalar ufalandıkça daha aşağıdaki bölgeye iner ve çıkış açıklığından ürün alınır. Kırma işleminde uygulanan boyut 55–2,5 cm arasındadır. BKO, 4–8 arasında değişir.

2.5.2.2 Oynar Milli Konili Kırıcı

İkincil kırma işlemlerinde kullanılır. Çıkış çapı giriş çapından daha büyüktür. Kırıcı merdanenin boyu alt çapından küçüktür. Bu kırıcılar çıkış açıklığı ile tanımlanır. 30–0,3 cm arası malzemelerin kırılması için elverişlidir. BKO 4–28 arasında değişir.

2.5.3 Merdaneli Kırıcı

Bu kırıcılarda kırma işlemi, merdane adı verilen iki döner silindir yüzeyi arasında yapılır. Merdaneler birbirlerine ters yönde dönerler. Genellikle biri sabit diğeri bir yatak üzerinde hareket edebilir durumdadır ve hareketli merdaneye baskı veren bir sistem mevcuttur. Silindir yüzeyleri düz, dişli veya kanallı olabilmektedir. Merdane çapı taneyi yakalayacak kadar büyük olmalıdır. Tane ile merdane arasındaki sürtünme katsayısı da önemlidir. Kırılacak en büyük tane çapı ($d_{\max}$) ile merdane çapı (D) ve merdaneler arasındaki uzaklık (S) arasındaki ilişki Eşitlik 2.9 ile verilmektedir.

$$d_{\max} = S + \frac{D}{40} \quad (2.9)$$

Merdanelerde malzemenin tutulup kırılması kavrama açısına bağlıdır. Kavrama açısı malzeme ile merdane tamburu arasındaki sürtünme katsayısının bir fonksiyonu olarak 25° ile 30° arasında değişir. Kavrama açısı aynı zamanda merdanenin geometrik boyutlarının da bir fonksiyonudur. Bu açısal ilişki Eşitlik 2.10 ile verilmiş ve Şekil 2.12 ile de resmedilmiştir.

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{2R + D}{2(R + r)} \quad (2.10)$$

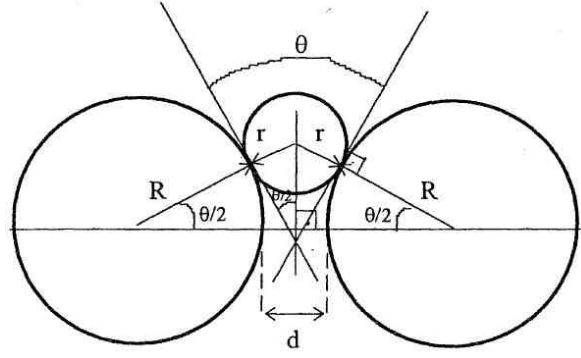
Burada;

R = Merdane tambur yarıçapı.

D = Merdane tamburları arasındaki aralık.

R = Kırılacak parça yarıçapı.

Merdaneler arasında tanenin yakalanabilmesi için, tanenin merdaneye değdiği noktalardaki teğetler arası açısı (kavrama açısı) 25° 'den az olmalıdır.

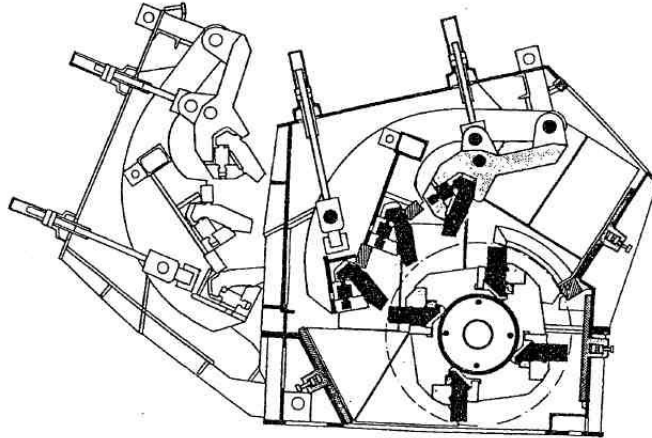


Şekil 2.12 Merdanelerde kavrama açısı.

Merdane hızı malzeme özelliklerine göre 50–300 dev/dk, kapasitesi de 5–800 t/s arasında değişir. Kırma yapılan cevher boyutları 25–3 mm arasındadır. Merdaneli kırıcılarda genellikle 2-4 arası BKO kullanılır. Çok büyük çaplı kırıcılarda BKO'nun 15–20'ye kadar çıkarılması mümkündür. Merdane hızı tespit edilmesinde merdane çapı, malzemenin cinsi, besleme tarzı, BKO, beslenen malzemenin boyutu önemli rol oynarlar (Yiğit 1999).

2.5.4 Çekiçli Kırıcı

Bu tür kırıcılarda bir döner merdane üzerine yerleştirilmiş sabit ya da oynar çekiçler bulunur. Merdanenin hızla döndürülmesiyle merdane üstünden serbest düşme ile beslenen cevhere çarparak ufalama yaparlar. Bu kırıcılar düzgün şekilli ve birbirine yakın boyutta tane vermektedir. Merdane hızı 600–3000 dev/dk, beslenen tane boyutu genelde 20–1 cm'dir. BKO 5–45 ve kapasite 500 t/s'e kadar çıkabilir. Sabit çekiçli kırıcılarda (Şekil 2.13) büyük çarpma gerilmelerini önlemek için malzeme teğetsel olarak kırıcıya verilir.

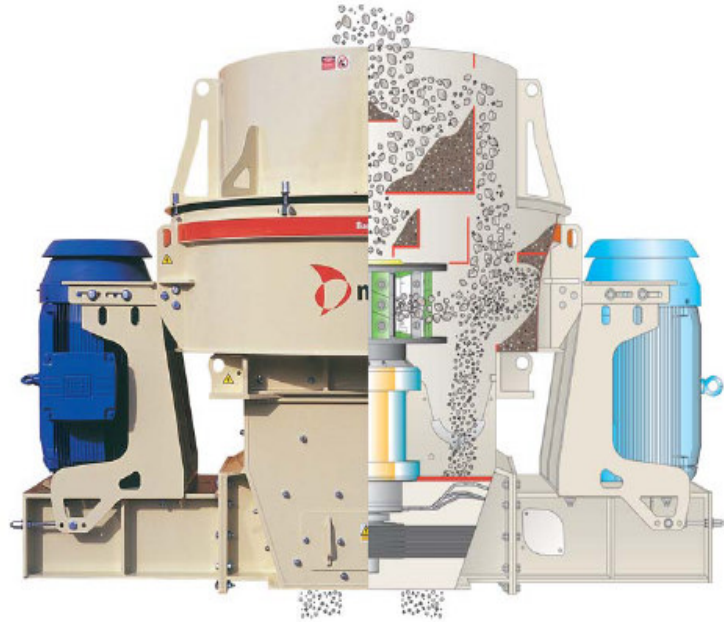


Şekil 2.13 Sabit çekiçli çarpmalı kırıcı.

Bu tip kırıcılarda rotorun dönüş hızı da daha düşük olup 200–500 dev/dk arasındadır. Büyük sabit çekiçli kırıcılarda 1,5 m’lik bir malzeme 20 cm büyüklüğe kadar kırabilir. Kapasiteleri 1500 t/s olabilmektedir. %15’den fazla silis içeren cevherlerde kullanılmamaları, aşınmanın kontrolü açısından önemlidir. Boyut küçültme oranları 40’a kadar çıkabilir.

2.5.5 Barmak Kırıcı

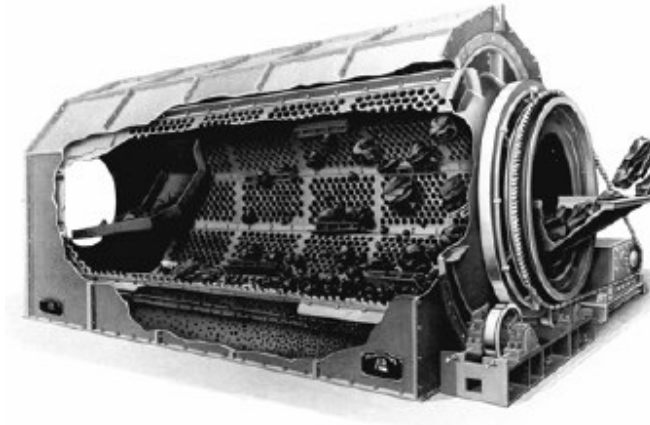
Barmak kırıcılar başta darbe olmak üzere, kesme ve aşındırma kuvvetlerinin de baskın olduğu otojen öğütme yapan dikey şaftlı kırıcılardır. Yatırım ve kurulum maliyetlerinin az olması yanında, düşük enerji harcamalarıyla da avantajlıdırlar. Besleme boyutu 10-60 mm aralığında olan orta sertlikte malzemede ürün d_{50} boyutu yaklaşık 5 mm olarak elde edilirken, sert yapıdaki malzemede d_{50} boyutu 10 mm civarında alınabilmektedir. Kolay kırılır malzemede ise d_{50} boyutu 2,5 mm ye kadar düşmektedir. Rotor hızı arttırıldıkça alınan ürün boyutu da daha ince olmaktadır. 30 mm altındaki besleme boyutunda, 60 m/sn rotor hızında ürün d_{50} boyutu 5,5 mm iken, 80 m/sn rotor hızında ürün d_{50} boyutu yaklaşık 1,5 mm’dir. Modele göre değişmekle birlikte 40–125 mm boyut aralığında besleme girişi yapılabilir. Maksimum rotor hızı 80 m/sn (1900 dev/dk) olabilmektedir. Şekil 2.14’de Barmak kırıcı şekli sunulmuştur (URL-1 2008).



Şekil 2.14 Barmak kırıcı.

2.5.6 Bradford Tipi Döner Kırıcı

Bradford kırıcısı kömür ve yan kayacın kırılabilirlik farkından yararlanarak selektif kırma ve ayırma görevi görmektedir. İçerisinde raflar içeren bir tromel elek yapısındadır. Kırıcı içine giren iri tüvenan kömür raflar tarafından üst noktaya kadar kaldırılır ve buradan sert plaka yüzeylere düşmesi sağlanır. Yan kayaca göre daha kırılabilir olan kömür ufalanarak plakalardaki deliklerden aşağı düşerken, iri boyutta kalan yan kayaç kırıcı çıkışından dışarı atılır (Arslan 2006). Şekil 2.15’de Bradford tipi döner kırıcı şekli sunulmuştur.



Şekil 2.15 Bradford tipi döner kırıcı.

2.6 ÖĞÜTME

Boyut küçültme işlemlerinin son aşamasıdır. Öğütme işleminde partiküller darbe, aşındırma ve kopmanın müşterek etkisiyle yaş veya kuru olarak 2,5 cm’den 10 μ m’ye kadar ufalanır. Bu işlem aktarılan ortam değirmenlerinde, yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerde, valsli değirmenlerde ve karıştırmalı değirmenlerde gerçekleştirilmektedir. Bu kısımda, aktarılan ortam değirmenleri ile yüksek basınçlı merdaneli değirmen ve valsli değirmenden bahsedilecektir. Karıştırmalı değirmenlere ileride mikronize öğütme kısmında detaylı olarak değinilecektir. Aktarılan ortam, gövdenin dönmesiyle karışır, dökülür ve sürtünme veya çarpma ile içine konan malzemeyi öğütür. Öğütücü ortam bilya, çubuk, çakıl, öğütülecek cevherin iri parçaları veya başka bir cevher olabilir. Aktarılan ortamla çalışan değirmenler sadece aktarılan ortama veya yapı özelliklerinden olan gövde ve taşma şekline göre adlandırılır. Değirmeni tanımlarken taşma şekli, gövde şekli ve ortam türüne göre tanımlamak en uygun olanıdır. Örneğin, silindirik gövdeli, düz taşmalı, çubuklu değirmen. Aktarılan ortam değirmenleri aşağıdaki şekillerde adlandırılırlar;

1. Aktarılan ortama göre

- i. Ortam bilya ise, bilyalı değirmen,
- ii. Ortam çubuk ise, çubuklu değirmen,
- iii. Ortam çakıl ise, çakıllı değirmen (tüp değirmen veya boru değirmen),
- iv. Ortam cevherin iri kısmı ise, otojen değirmen.

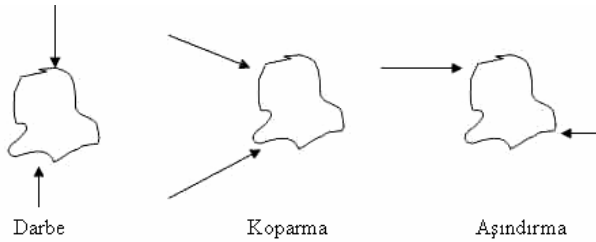
2. Gövde şekline göre

- i. Silindir gövdeli değirmen,
- ii Silindirokonik gövdeli değirmen,
- iii. Konik gövdeli değirmen.

3. Taşma şekline göre

- i. Düz taşma,
- ii. Izgaralı taşma,
- iii. Spiralli taşma,
- iv. Çıkış odalı taşma vs. gibi.

Değirmen içinde öğütme, aktarılan ortamın boyutu, miktarı, hareket türü ve aralarındaki boşluk gibi faktörlere bağlı ve kırmanın aksine öğütme olasılık kanunlarına bağlı bir işlemdir. Çeşitli mekanizmalarla gerçekleşir. Genellikle yaş, bazı hallerde kuru yapılır. Değirmen döndürülünce aktarılan ortam, su ve cevher karışımı, hıza bağlı olarak aşağıdaki (Şekil 2.16) mekanizmaların ortak etkisiyle hareket ederek cevheri öğütür.



Şekil 2.16 Cevher öğütme mekanizmaları.

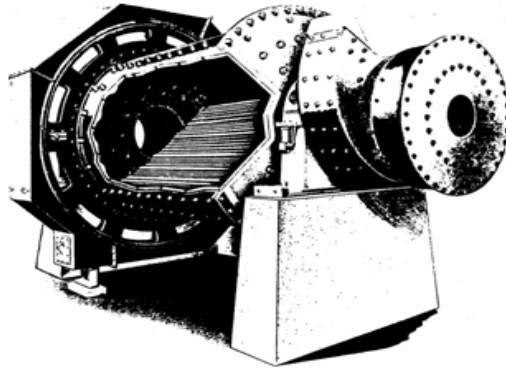
Aktarılan ortamın kinetik enerjisinin çoğu ısı, ses ve diğer şekillerde kaybolur, ancak küçük bir bölümü boyut küçültme için harcanır. Laboratuvar değirmenleri haricinde, öğütme sürekli bir işlemdir, malzeme bir uçtan kontrollü bir şekilde beslenir, belli bir süre değirmen içinde kaldıktan sonra diğer uçtan taşarak değirmeni terk eder. Çıkan ürünün boyut kontrolü, kullanılan ortamın çeşidi, değirmen dönme hızı, beslenen cevherin karakteri ve değirmen devre tertibi ile yapılır (Özdağ 2000).

2.6.1 Aktarılan Ortam Değirmenleri

Üç esas tipi vardır; çubuklu, bilyalı ve otojen değirmenler. Hepsinde ortak olan yön, yatay eksen etrafında dönen silindirik bir gövde, gövde içinde değiştirilebilen aşınma astarları ve öğütücü ortamdır. Besleme malı değirmene yan kapak silindirik uzantısından sürekli olarak verilir ve diğer uçtaki uzantıdan değirmeni öğütülmüş olarak terk eder.

2.6.1.1 Çubuklu Değirmen

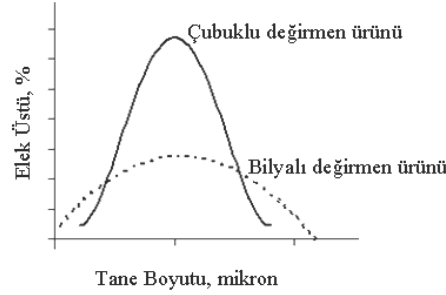
Çubuklu değirmenler ince kırıcı veya kaba öğütme cihazı olarak kullanılabilir. Çubuklu değirmenlerle 50 mm boyutlu malzeme 300 mikrona indirilebilir. Çubuklu değirmenlerin uzunlukları çapının 1,5 ile 2,5 katı arasında değişir. Değirmen çubuklarının eğilme göstermemesi için 6 m'den uzun olmaması istenir. Bilinen en büyük çubuklu değirmen 4,57x6,4 m boyutundadır. Bunlar boşalma şekline göre sınıflanmaktadır. Genel bir kural olarak boşalma, değirmen gövde çevresine ne kadar yakın ise, aşırı öğütme o kadar az ve malzemenin değirmenden geçiş hızı daha fazladır. Şekil 2.17' de bir çubuklu değirmen verilmiştir (Yıldız 1999).



Şekil 2.17 Çubuklu değirmen kesiti.

Çapları 25–150 mm arasında değişen çubuklar değirmene şarj edilirler. İri besleme malı iri çubuk gerektirir. Çubuk şarj oranı hacmin %35'i olduğunda optimum öğütme elde edilir. Çubuk aşınması, besleme malı, değirmen hızı, çubuk uzunluğu ve öğütme inceliği ile değişir ve yaş öğütmede ton cevher basma 0,1–1 kg'dır. Çubuklu değirmenler kritik hızın %50–65'i gibi bir hızla çalıştırılırlar. Pûlp yoğunluğu, ağırlıkça %60–75 katı arasındadır. Nispeten ince besleme malında bu oran düşürülür. Çubuklu değirmenlerde öğütme tarzı bilyalıya nazaran farklıdır, çubuklar arasında en iri cevher parçaları kadar aralık kalır, öğütme hareketi en iri parça üzerine

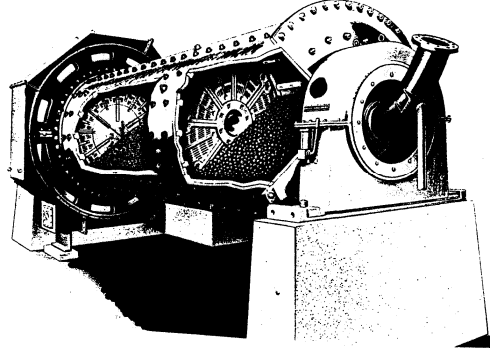
toplanır Elde edilen ürün bilyalıya nazaran daha iri ve birbirine daha yakın boyuttadır (Şekil 2.18). Şlam ve öğütme tane iriliğinden daha iri ürün minimumdur (İpekoğlu ve Tanrıverdi 2002).



Şekil 2.18 Çubuklu değirmen ve bilyalı değirmende öğütme ürünü boyut dağılımı.

2.6.1.2 Bilyalı Değirmen

Boyut küçültme işlemlerinin son aşaması bilyalı değirmenlerde yapılır. 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 (Şekil 2.19).



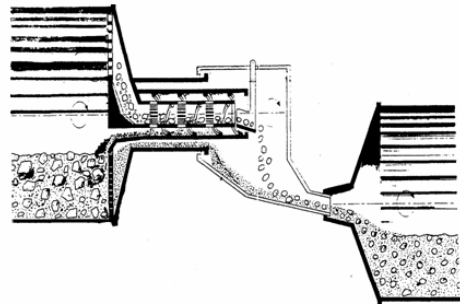
Şekil 2.19 Kamaralı bilyalı değirmene ait kesit görünüşü.

Bilyalı değirmenler boşalma şekline göre sınıflandırılır. Boğaz boşluğundan taşan ve ızgaralı taşmalı değirmenler olarak iki tiptedir. Iızgaralı taşmalı değirmen genellikle düz taşma değirmenlerinden daha iri besleme malı ile çalışırlar ve bunlardan fazla ince öğütölmüş ürün istenmez. Boğaz boşluğundan taşan değirmenler ise en basit yapılı ve uygulamada özellikle ince öğütme için en çok kullanılan değirmenlerdir. Öğütme verimleri aynı olmakla birlikte bu değirmenlerin güç sarfiyatı ızgaralı taşmalı değirmenden %15 daha azdır. Besleme malı pölp yoğunluğu mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Bilyaların etrafı uygun kalınlıkta pölp ile

kaplanmalıdır. Çok sulu p lp, bilyaların birbiriyle temasının artmasına ve dolayısıyla ortam aşınmasına ve verimin düşmesine neden olur. P lp yoğunluğunun, cevhere bağlı olarak ağırlıkça %65–80 katı olacak şekilde ayarlanması uygun olur. İnce öğütmede ise daha düşük p lp yoğunlukları istenir. Öğütme verimi bilyaların yüzey alanı ile de ilgilidir. Bilyalar mümkün mertebe en k  k k ve öğütülen malzemenin en iri boyutunu  ğ tebilecek boyutta seçilmelidir. İri öğütmede 10–2 cm bilyalardan belirli oranlarda şarj konur. İnce öğütmede ise 5–2 cm'lik bilya çapları ile bir karışım şarj edilir. Şarj miktarı değirmen i  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. Bilyalı değirmenler genellikle  ubuklu değirmenlerden daha yüksek hızlarda çalıştırılır. Bu durumda bilyaların katarakt hareketinde artış olacağından malzemenin istenen boyuta   t lmesi daha hızlı gerçekleşir. Bu hız kritik hızın %70–80'i kadardır.

2.6.1.3 Otojen Değirmen

Ocaktan çıkan veya birincil kırma işleminden geçirilen cevherin bir değirmen içinde kendi kendine   t lmesi anlamına gelen otojen   tme son yıllarda boyut k  ltmenin önemli bir konusu haline gelmiştir (şekil 2.20). Uygun cevherlerde bu tip   tme   t c  ortam masrafını ortadan kaldırmakta, daha düşük oranlarda ince malzeme ve şlam verebilmektedir. Otojen   tme yaş veya kuru olarak uygulanabilir. Kuru   tme killi malzeme için uygun değildir,  evre sorunu daha fazladır ve   tme kontrolü yaşa nazaran zordur.



şekil 2.20 Otojen değirmene ait kesit görünüş.

Besleme malzemesinde iri boyut fraksiyonunun az olduğu durumlarda çakılı   tme uygulanmaktadır. Bu metotta iri kısım besleme malzemesinden bir elek ile ayrılır, geri kalan kısım bilinen kırma işlemlerinden geçirildikten sonra, ayrılan iri kısım ile birlikte bir değirmende ince ötmeye tabi

tutulmaktadır. Bu tip öğütmeye parça veya çakıllı öğütme adı verilmektedir. Otojen ve yarı otojen öğütme genellikle birincil kademe öğütme gayesiyle, çakıllı öğütme ise ikincil öğütme gayesiyle kullanılır. Otojen değirmenler genellikle kritik hızın % 80–85'i kadar bir hızla çalıştırılırlar. Besleme hacmi ve değirmen gücü besleme hızı ile değişir. Genellikle, çap/uzunluk oranı yüksek olduğunda besleme hızı, hacmin %35–40'ı civarında tutulmaktadır. Daha yüksek hacimlerde besleme boğaz boşluğundan taşmalara neden olmaktadır. Otojen değirmenlerde güç sarfiyatı önce hacmin %40'ına kadar doğrusal bir artış gösterir sonra bir denge yakalayarak istikrarlı bir konumda enerji tüketilir. Otojen değirmenlerde bir üniteye 25 cm den 100 µm'ye kadar boyut küçültme derecesi elde edilebilmektedir (İpekoğlu ve Tanrıverdi 2002).

2.6.2 Aktarılan Ortam Değirmenleri Yapı Unsurları

Bu değirmenlerin genel yapı unsurları genel aşağıda belirtilmiştir;

2.6.2.1 Gövde

Öğütücü ve öğütülen malzemeyi muhafaza eder. Kıvrılarak hazırlanmış çelik veya özel alaşımlı çelik plakaların kaynakla birleştirilmesi ile yapılır. Üzerinde astarları cıvatalamak için delikler açılmıştır ve bir veya iki adam girecek büyüklükte pencere delikleri bırakılmıştır. Şekil ve boyutlar gövde cıvatasında önemlidir. Bilya ve çakıl her üç gövde şeklinde kullanılır. Çubuk sadece silindir gövdede kullanılır. Boyun çapa oranı genellikle 1,33–3 kadardır. Hacim arttıkça değirmen kapasitesi artar.

2.6.2.2 Yan Kapaklar ve Silindirik Uzantıları

1 m'den küçük çaplı olanlar gri dökme demir (içindeki C ve Fe bileşik halinde) daha büyükleri ise çelik döküm plakaların kaynakla birleştirilmesiyle elde edilir. Şekilleri düz veya hafifçe bombeli olabilir. Cıvatarla gövdeye sıkıca bağlanır. Giriş ve çıkış tarafından yan kapak ortalarında silindirik uzantılar yapılmıştır ve yatakların yerleştirilmesine uygundur. Değirmenin orta boşlukları malzeme girişi ve çıkışı için kullanılır. Yatak yüzeyleri sürtünmeyi azaltmak için mümkün olduğunca parlatılır.

2.6.2.3 Yataklar

Değirmen yatakları ağır yükler taşımasına karşın düşük devirlerde çalışırlar. Dönüş sırasında bir problemle karşılaşmamak için yatak eksenlerini aynı seviyede sabitlenmesi gereklidir. Ayrıca, değirmene yol vermeden önce yataklara yağ verilmelidir.

2.6.2.4 Astarlar

Astarlar, kullanış yerine göre gövde astarları, yan kapak astarları ve boğaz astarları olarak adlandırılırlar. Gövde astarları, öğütmenin irilik ve inceliğine göre değişik şekillerde tasarlanır ve yapısında özel yapılar kullanılarak kaldırma işlevine yardımcı olması sağlanır. Astarların görevi; değirmeni darbelerden korumak, değirmen şarjının randımanlı hareketini sağlamak öğütücü ortam ile malzemenin temas eden kısımlarını aşınmaya karşı korumaktır. Çubuklu değirmenlerde yan kapak astarları hafifçe koniklik gösteren düz astarlardır. Bu şekliyle astar çubuklu değirmenin düz bir hat boyunca dönmesine yardımcı olur. Astarlar yüksek dayanımlı malzemeden yapılırlar. Bilyalı değirmenlerde yan kapak astarları oluklu yüzey şeklindedirler. Kaldırma görevine yardımcı olurlar. Beyaz dökme demir, Ni alaşımlı çelik, diğer aşınmaya dayanıklı malzeme veya lastikten yapılırlar. Yan kapak silindirik uzantı astarları ise, yerine göre konik, düz veya malzemeyi hızlandırıcı veya geciktirici şekilde spiral şekilli yapılırlar. Sert dökme demir, çelik döküm ve üzerlerine lastik bir kaplama şeklinde yapılırlar.

2.6.2.5 Değirmen Girişi ve Besleme

Yan kapak silindirik uzantısının orta boşluğundan değirmene mal girişi yapılır. Kullanılan besleme teçhizatı öğütmenin kuru veya yaş oluşuna ve açık veya kapalı devre çalışmasına bağlıdır. Ayrıca tane büyüklüğü ve besleme hızı da önemlidir. Kuru değirmenler genellikle bir titreşimli besleyici ile beslenir. Yaş öğütmede ise esas olarak 3 tip besleyici vardır. En basit besleme boru ile beslemedir. Değirmenden bağımsız olarak desteklenen silindirik veya eliptik bir boru direkt olarak yan kapak ortasına verilir. Mal değirmene giriş üstü bir seviyeden gravite ile akar. Yaş öğütmede, girişte su oranı düşük (%65–78 katı) olduğundan malzemenin akışkanlığı düşüktür. Yeterli besleme hızı akış meylini arttırmakla sağlanabilir. Bu tip besleme genellikle açık devre çalışan çubuklu değirmenlerde ve hidrosiklonla kapalı devre çalışan bilyalı değirmenlerde kullanılmaktadır. Tamburlu besleme değirmen giriş kısmında yeterli yükseklik ve boşluk bulunmadığı hallerde boru besleme yerine kullanılabilir. Tüm besleme malı bir borudan tamburun içine

gönderilir ve tambur içindeki spiral, malzemeyi değirmene aktarır. Bu tip besleme, değirmene bilya ilavesi açısından uygundur. En çok kullanılan 3. besleme tipi tambur ve kepçe besleyicinin bir kombinasyonudur. Yeni besleme malı direkt olarak tambura beslenir, bu esnada kepçe klasifikatör iri ürününü değirmen altı bir seviyeden alarak tambura ve spiral vasıtası ile değirmene iletir. Bu tip besleme yaş öğütmede değirmenin mekanik bir klasifikatörle kapalı devre çalışması halinde çok kullanılır.

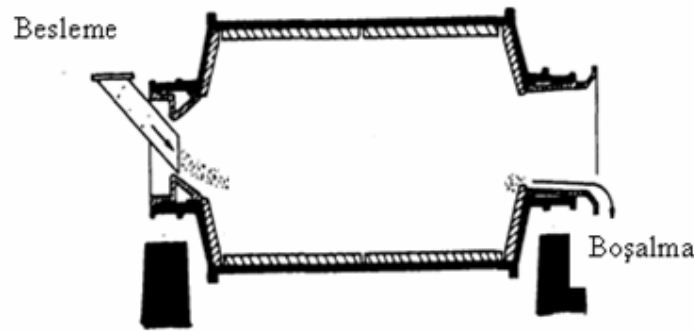
2.6.2.6 Değirmen Çıkışı

Değirmen çıkışında farklı yapılar kullanılmaktadır. Bu farklılıkların başlıca nedenleri;

1. Giriş-çıkış seviye farkı,
2. Öğütücü ortam parçalarının değirmeni terkine engel olma,
3. Yeterli inceliğe ulaşmamış cevher parçalarının değirmeni terkine engel olma,
4. Değirmen hacmini yeteri kadar doldurabilmedir.

En çok kullanılan değirmen çıkış şekilleri;

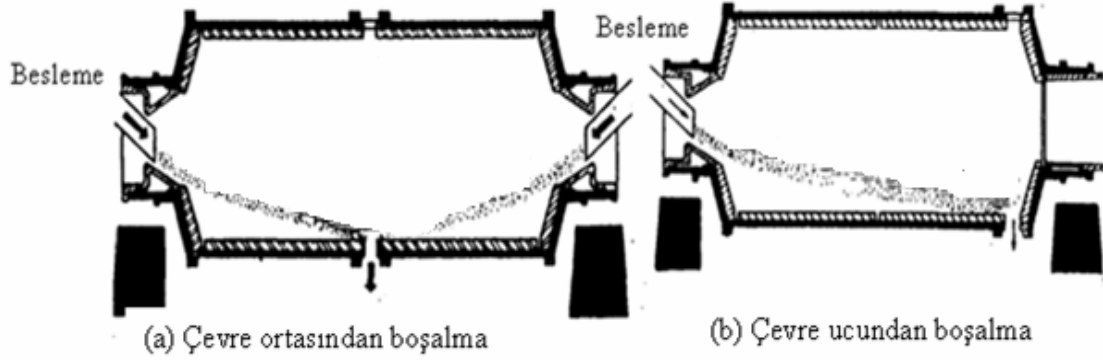
Düz Taşma: Bu tiplerde pülp, çıkış açıklığından kendi kendine taşar (Şekil 2.21). Çıkış açıklığının büyük veya küçük oluşu değirmen içindeki pülp seviyesini ve akış miktarını etkiler (Yüksek, orta ve alçak seviyeli taşma). Geniş çıkış açıklığı ve alçak seviyeli taşmada güç sarfıyatı artar, buna karşılık kapasite ve randıman yükselir (Önal ve Ateşok 1997).



Şekil 2.21 Düz taşmalı değirmen.

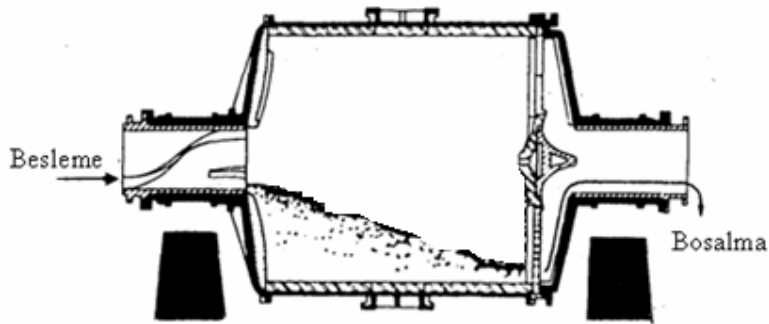
Çevreden Boşalma: Çevre ortasından veya çevre ucundan boşalma yapılır. Çevre ortasından boşalmada (Şekil 2.22a) her iki yandan besleme yapılır. İri öğütme ürünü ve minimum oranda ince

malzeme üretirler. Boyut küçültme oranı sınırlıdır. Bu tip değirmenler yaş veya kuru olarak çalışabilir. Yüksek tonaj ve çok iri malzeme üretiminde uygulama alanları çoktur. Çevre ucundan boşalmada ise (Şekil 2.22b) bir uçtan besleme yapılır, diğer uç çevresindeki bir kaç açıklıktan boşalır. Genellikle kuru ve rutubetli, iri ürün için kullanılır (Özdağ 2000).



Şekil 2.22 Çevreden boşalmalı değirmenler.

Izgaralı Taşma: Değirmenin boşalma tarafında bir ızgara yerleştirilmiştir. Izgara aralıklarından öğütülmüş malzeme geçer, bilyalar tutulur. Izgara ile çıkış boşluğu arasındaki radyal çubuklar pülpü kaldırıp çıkış ucundan vermeğe yardımcı olurlar. Bu tip değirmenler (Şekil 2.23) düşük pülp seviyesi ile çalışırlar, malzemeyi aşırı öğütmeden çabuk devir daim ettirirler, kapasiteleri yüksektir. Değirmen içi akış hızı, giriş-çıkış seviye farkı ve boy ilişkisine bağlı olduğundan değirmen çıkış tipi seçimi istenen şartlara uygun yapılmalıdır. Örneğin kuru malzeme değirmen içinde yaşa göre daha yavaş hareket eder. Akış hızını arttırmak için çevreden boşalma tercih edilebilir (İpekoğlu ve Tanrıverdi 2002).



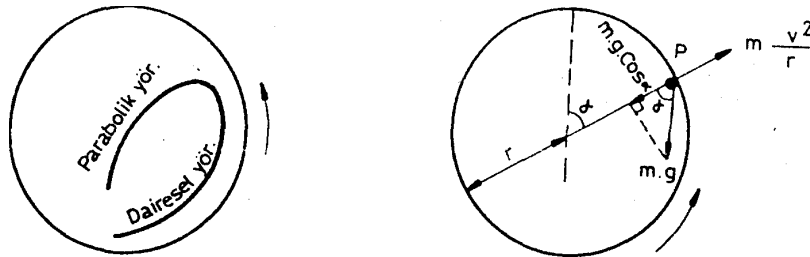
Şekil 2.23 Izgaralı taşmalı değirmen.

2.6.2.7 Aktarılan Ortam (Öğütücü Ortam)

Bilyalar, döküm, manganezli çelik veya özel alaşımlı çeliklerden, çubuklar ise yüksek kaliteli karbonlu çeliklerden yapılır. Otojen öğütmede, cevherin iri parçaları ortam olarak kullanılır. Bunların da mümkün mertebe yassı olmamaları tercih edilir. Zamanla ortam aşındıkça, aşınma ile şeklin bozulmaması arzu edilir. Öğütücü ortamın şekli yanında boyut ve özgül ağırlığı da öğütme verimi açısından önemlidir. Ortamın özgül ağırlığı ne kadar yüksek olursa öğütme randımanı o kadar artar. Bu nedenle çakıl ancak öğütücü ortamdaki demir kirletmesinin sakıncalı olduğu hallerde çelik bilyaya tercih olunmalıdır. Uygulamada 20–125 mm arasında bilya veya çubuk çapı kullanılmaktadır. Aşınma ile belirli bir boyutun altına inen bilya, taşmada mal ile birlikte gelir. Çubuklarda ise yeteri kadar incelen öğütücü ortam, yük altında eğilip bükülerek istif durumunu bozarak öğütmeyi aksatabileceğinden değiştirilmesi gerekir. Fakat bu tek başına bir ölçüt olamaz, öğütülecek mal iri ise iri çaplı, öğütülecek mal ince ise ince çaplı, öğütme ürünü iri isteniyorsa iri çaplı veya tersi ise ufak çaplı, sert malzemeler için yumuşağa nazaran daha iri çaplı bilya veya çubuk kullanılması hususları beraberince incelenmelidir. Uygulamada değirmene konacak ilk şarj için genellikle kademeli bir seçim yapılır. Zamanla ortam aşınarak ebatlar küçüleceğinden, belirli sürelerde ilave edilecek bilya en iri çaplıdan yapılır. Yaş öğütmede, değirmen iç hacminin %40–50'sine, kuru öğütmede ise %35–45'ine eşit hacimde ortam konur. Değirmen hızı arttıkça şarj miktarı azalabilir veya hız azaldıkça şarj miktarı artabilir. Boşluk oranından dolayı, aynı hacim için çubuk bilyaya nazaran daha ağırdır.

2.6.3 Değirmen Kritik Dönüş Hızı ve Hıza Bağlı Olarak Ortam Hareketi

“N” dev/dk ile dönen ve yarıçapı “r” olan bir değirmenin çeperinde belirli bir yüksekliğe çıkmış bir bilya veya çubuk düşünelim. Bilya ağırlığının merkezkaç kuvvet tarafından dengelendiği “P” noktasından, bu bilya dairesel yörüngesini terk ederek parabolik bir yörüngeye geçer (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 Değirmen dönüş hızı.

Burada;

m : Bilya kütlesi (kg)

V : Çevresel hız (m/sn)

g : Yerçekimi ivmesi (m/sn²)

olmak üzere oluşan ifade Eşitlik 2.11 ile verilmiştir.

$$\frac{mV^2}{r} = mg\cos\alpha \quad (2.11)$$

Alınan yol dairenin çevresidir. Dakikada alınan yol hızı verir. Buradan hareketle,

$$V = \frac{2\pi rN}{60} \quad (2.12)$$

$$\cos\alpha = \frac{4\pi^2 N^2 r}{60^2 g} \quad (2.13)$$

$$\cos\alpha = 0,0011 N^2 r \quad (2.14)$$

Değirmen çapı D (m) ve bilya çapı d (m) göz önüne alınırsa,

$$\cos\alpha = 0,0011 N^2 \frac{(D-d)}{2} \quad (2.15)$$

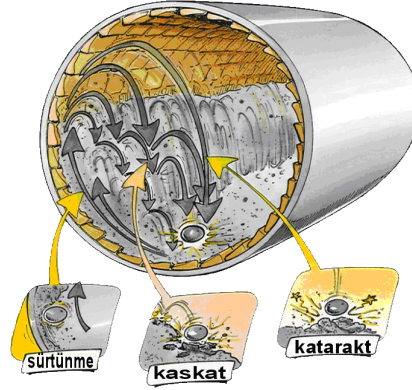
Değirmenin öyle bir hızı vardır ki, bu hız üzerinde küresel cisim (bilya veya çubuk) onunla birlikte dönecek, bu hızın altında ise yüzeyden ayrılacaktır. Bu hıza kritik hız denir. Değirmenin kritik hızı, en üst noktada $\alpha = 0$ olduğu zamanki hızdır. $\cos 0 = 1$ olduğundan hareketle “kritik hız” (N_k) aşağıda verilen Eşitlik 2.16 ile hesaplanır.

$$N_k = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} \quad (2.16)$$

Değirmenleri kritik hızın altında bir hızda çalıştırmak gerekir. Uygulamada değirmenler kritik hızını %50–90’ı arası bir hızda çalıştırılırlar. Hıza bağlı olarak değirmen içindeki ortam, aşağıda belirtilen hareketleri yapar;

1. Serbest düşme katarakt etki, darbe ile boyut küçültme,
2. Kendi eksenini etrafında dönme, baskı ile boyut küçültme,
3. Kayarak yuvarlanma kaskat etki, aşındırma ve baskı ile boyut küçültme.

Bu hareketlerin birinin diğerlerine oranla azlığı veya çokluğu öğütme olayını etkiler. Söz konusu hareketler Şekil 2.25’de resmedilmiştir (Ereğli Lafarge Çimento 2006).



Şekil 2.25 Bilyalı değirmende öğütme ortamının hareketi.

2.6.4 Değirmenlerde Kapasite

Kapasite; saatte belirli bir ebadın altına öğütülen ton cevher olarak verilebilir. Genel olarak belirli büyüklükteki bir değirmenin kapasitesini kesin rakamlarla belirtmek mümkün değildir. Çünkü kapasite birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler aşağıda belirtilmiştir.

2.6.4.1 Cevher özellikleri

Sertlik, yumuşaklık, özgül ağırlık, tane iriliğinden bahsedilir. Cevherin öğütülebilirliği ile kapasite arasında direk bir ilişki vardır. Ancak öğütülebilirlik için kesin bir kriter yoktur, cevherin fiziksel özellikleri öğünme kabiliyeti ile yakından ilgilidir.

2.6.4.2 Değirmen Yapısı

Değirmen boyutları, astar şekli ve yapısı, öğütücü ortam şekli, özgül ağırlığı, boyutu ve miktarı, değirmen hızı ve taşma şeklinden bahsedilir. Kapasite çapın küpü ve boyu ile doğru orantılı kabul edilebilir. Değirmen hızı ile kapasite direk ilişkilidir.

2.6.4.3 Değirmen Çalışma Şekli

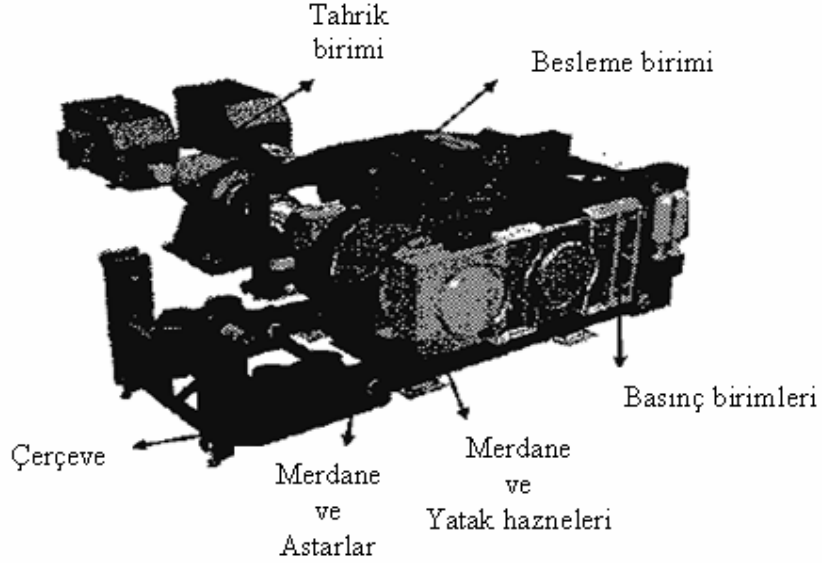
Açık veya kapalı devre tertibi, besleme hızı, su-katı oranı, devreden yük, öğütmeden beklenen ürün ebadı kapasiteyi etkilemektedir. Kapalı devre çalışmada kapasite artar. Besleme hızının değişmesi, diğer bütün faktörleri ve kapasiteyi etkiler. Büyük boyut küçültme oranları gerekli olan yerlerde, tesisin kapasitesi büyük ise değirmenlerin seri olarak bağlanması (bir değirmen iri öğütme yaparken diğeri ince öğütme yapar şekilde) paralel şekilde düzenlenmesinden daha ekonomik olmaktadır.

2.6.5 Aktarılan Ortam Değirmenleri Dışındaki Değirmenler

Bu kısımda, kömür öğütmede kullanım alanı bulmuş olan, yüksek basınçlı merdaneli değirmen ve valsli değirmenden bahsedilmiştir.

2.6.5.1 Yüksek Basınçlı Merdaneli Değirmen

Schönert (1979) kırılğan malzemelerin ufalanmasında enerjinin verimli kullanımı açısından en etkili yöntemin malzeme yığınının karşılıklı iki levha arasında yüksek basınçlar altında sıkıştırılması olduğunu göstermiştir. Schönert vd. (1984) bu prensibe dayanarak yüksek kapasitede çalışmanın en etkin yolunun tanelerin oluşturduğu yatağın ters yönde dönen iki merdane tarafından sıkıştırılması olduğunu belirtmektedir. Bu görüşe dayanılarak, Schönert tarafından geliştirilmiş olan yüksek basınçlı merdaneli değirmenler 1985'ten bu yana endüstride kullanılmaktadır (Aydoğan ve Ergün 2004). Yüksek basınçlı merdaneli değirmenler ters yönde dönen iki merdaneye sahip olup merdanelerden birisi sabit bir yatağa oturtulmuşken diğeri hidrolik bir sistem aracılığıyla sabit merdaneye doğru itilmektedir. Basınç, boyut küçültme işlemini kontrol eden en önemli parametredir. Sıkıştırılmış malzeme yatağının yığın yoğunluğu, malzemenin mutlak yoğunluğunun %70'i veya üzerine ulaşmaktadır. Malzeme, ekipmanı sıkıştırılmış bir kek formunda terk etmekte ve çoğu öğütme devresinde bu kek dağıtılıp sınıflandırılmaktadır. Yüksek basınçlı merdaneli değirmen öğütme ürününde yüksek oranda mikro çatlakların oluşması standart Bond iş indeksinin de azalmasına neden olduğundan bir sonraki öğütme işlemi için de önemli avantaj sağlamaktadır. Şekil 2.26'da yüksek basınçlı merdaneli değirmen genel görünümü verilmiştir (Aydoğan ve Ergün 2004).



Şekil 2.26 Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerin genel görünümü.

Öğütülecek malzeme üzerine hareketli merdane vasıtasıyla iletilecek olan kuvvet merdaneye hidrolik silindirlerle kazandırılmaktadır. Hareketli merdane yataklarının her birinde tek ya da ikişer hidrolik silindir bulunmakta olup beslemedeki değişikliklere ve çalışılmak istenen basınç ve/veya merdaneler arası açıklık değerlerine göre merdanenin ileri geri hareketini sağlamaktadırlar. Basınç sisteminin temel parçalarından bir diğeri olan nitrojen tüpler ise basınç sistemine ayarlanabilir ölçülerde esneklik sağlamaktadır. Hidrolik silindirlerde belirli basınç değerlerinin üstüne çıkıldığı durumlarda devreye girmekte ve sistemde oluşan fazla basıncı üzerinde toplayarak sistemin hasar görmesini engellemektedir (Aydoğan ve Ergün, 2004).

Yüksek basınçlı merdaneli değirmenler, klasik bilyalı değirmenlerle karşılaştırıldıklarında %50 enerji tasarrufu sağlamakta, astar aşınması çok daha az, ömürleri ise bilyalı değirmenlere oranla 10–20 kat daha fazla olmaktadır. Gürültü problemi en aza indirilmiştir ve işletilmeleri çok kolaydır. Ayrıca kompakt yapıları nedeniyle az yer kaplamaları da diğer bir avantajlarıdır. Bu tip değirmenlerde geçen malzeme miktarını belirleyen en önemli parametre merdane dönüş hızıdır. Öğütme kuvveti, malzemedeki ince oranını belirlemektedir. Merdaneli presle tane boyutu 10 mikron olan malzeme üretmek mümkündür. Ayrıca bir havalı klasifikatörle kapalı devre çalıştırılması durumunda 5 mikron (d_{97}) ürün de elde edilebilir. Dezavantajları ise, bu tip öğütücülerin yalnızca gevrek yapılı yumuşak ve orta sertlikteki aşındırıcı olmayan malzemelere uygulanabilmesidir. Bu değirmenlerde, öğütme taneler üzerine her yönden etki

2.6.5.2 Valsli Değirmen (Ring-Roll Mill)



37

Merdanelerin üzerinde hareket ettiği çanak sabit olabildiği gibi aksine (özellikle kömür değirmenlerinde) öğütücü merdaneler sabit iken çanak hareketli olabilir. Kömür besleme kanalından hareketli çanak üzerine iletilir ve merdaneler arasında öğütülür. Alt kısımdan öğütücü hazneye verilen sıcak hava akımı, kömürdeki nemi aldığı gibi yeterli incelikteki boyuta öğütülen kömürün ortamdan alınarak taşınmasını da sağlar. Yeterince öğütülmemiş kömür taneleri çanağa geri düşer ve öğütülme süreci devam eder (Schmidt and Huber 1996, URL-2 2008). Çanaklar ve valsler aşınmaya dayanıklı olması amacıyla sert dökümden imal edilmişlerdir. Aşındırıcılığı fazla olan malzemelerin üretilmesi durumunda ise astarlar aşınmaya dayanıklı segmanlarla kaplanmaktadır (Yıldırım ve Kaytaz).

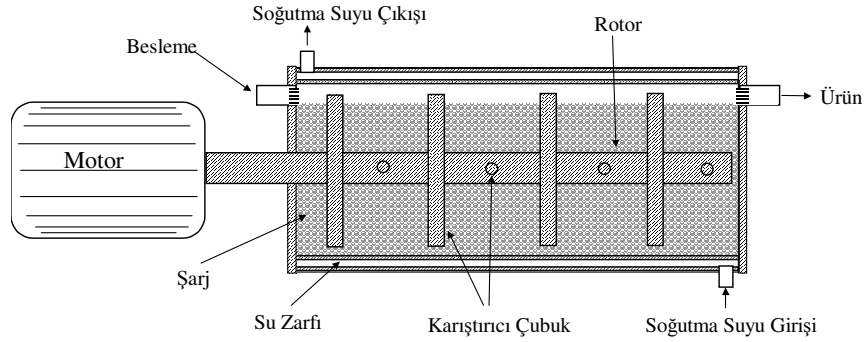
2.7 MİKRONİZE ÖĞÜTME

Madencilikten inşaat sektörüne, boya sanayinden ilaç sektörüne, kadar geniş bir yelpazede mikronize boyuta öğütülmüş ürüne ihtiyaç duyan endüstrinin çok çeşitli kollarında kullanılan ve bu tezin çalışma alanının odağını oluşturan karıştırmalı değirmenlerden bahsedilecektir.

2.7.1 Karıştırmalı Değirmen

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 sarfiyatı yönünden son yıllarda oldukça büyük önem kazanmıştır ve dar tane boyut grubunda ürün istenen endüstri alanlarında tercih edilmektedir (Miranda and Yaeger 1998, Wang and Forssberg 2000, Sinnott et al. 2006). Birçok üstünlüklerinden ötürü mineral, seramik, metalurji, elektronik, boya, kimya, gıda, hayvan besini, biyoteknoloji, lastik, ziraat, ilaç, fotoğraf, kömür ve enerji endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mankosa et al. 1986, Fadhel and Frances 2001, Kwade and Schwedes 2002). Karıştırmalı değirmenler, cevher hazırlama sektöründe de ince boyutlu ürünlerin hazırlanmasında ekonomikliği ile tercih edilmektedir (Makokha and Moys 2006, Ding et al. 2007). Sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir ekseninde dönen bir rotordan oluşmaktadır (Şekil 2.28). 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 et al. 2004,

Bilgili et al. 2006, Ding et al. 2007). Bilyalar değirmen hacminin %70–80’ini doldurmaktadır (Tuzun et al. 1995, Blecher and Schwedes 1996, Karbstein et al. 1996).



Şekil 2.28 Yatay bir karıştırıcı değirmenin şematik gösterimi (Pilevneli 2003).

Öğütücü 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 and Gao 2000).

Yüksek dönüş hızı bilyalara daha süratli çarpma hızı sağlayarak ve muhtemelen değirmendeki çarpma olaylarının sayısını arttırmaktadır. Radyal yönde daha büyük hız gradyentlerinin varlığı yüksek hızlarda kesme olaylarına neden olmaktadır. Ayrıca, bilyaların kinetik enerjisi ($E_k = \frac{1}{2} m V^2$; m: kütle, kg; V: çevresel hız, m/s) karıştırma hızı ile artmaktadır. Mekanik gerilim olayları bilyaların azalan boyutlarıyla doğrusal olarak artmaktadır. Süratle dönen bilya yüksek çevresel hızı (1–18 m/sn) ile kesme ve çarpma kuvvetlerini arttıracaktır. Bilindiği üzere, kesme ve aşındırma kuvvetleri ile elde edilen ürün daha ince boyutlara inebilmektedir (Wills 1985).

Bilyalı değirmenlerde, bilyalara ufalama etkisini sağlayacak kinetik enerji kazandırmak daha kolaydır. Çünkü ortam boyutu oldukça iridir. Fakat karıştırıcı değirmendeki ortam boyutu oldukça ufaktır. Örneğin, bilyalı değirmenlerde kullanılan bilya ebatları 50–20 mm arasında ve karıştırıcı değirmende kullanılan bilya boyutu 2,5 mm ve ortam özgül ağırlığı aynı kabul edilsin. Ortamın aynı hızla hareket ettiğinde hacim farkından dolayı kazanacağı momentum 50 ve 20 mm’lik bilyalar için 2,5 mm boncuğa göre sırasıyla 8000 ve 512 kat fazla olması makul bir beklentidir. Karıştırıcı değirmendeki bilyaların, bilyalı değirmenlerdeki ortamın hareketi

ve kendi ağırlığı ile kazandığı kinetik güce erişebilmesi için hızının yeterli ölçüde artırılması gerekmektedir.

Karıştırmalı değirmen ile yapılan araştırmalarda (Bilgili et al. 2004, Yue and Klein 2005, Sinnott et al. 2006, Yang et al. 2006, Jankovic and Sinclair 2006, Bilgili et al. 2006, Ding et al. 2007) genel olarak incelenen etkiler:

Karıştırma hızı,

Bilya boyutu,

Bilya yoğunluğu,

Pülp katı oranı veya pülp yoğunluğu (yaş öğütmelerde),

Beslenen cevher boyutu,

Sürekli sistemde pülpün akış debisi (yaş öğütmelerde) ya da kapasite,

Kesikli sistemde öğütme süresi,

Karıştırıcı sistem tasarımı (tip, şekil),

Dikey çalışan karıştırmalı değirmenlerde yerçekiminin etkisi,

Dağıtıcı katkılarının tipi ve miktarıdır.

Endüstriyel kullanımı yaygınlaşmaya başlayan karıştırmalı değirmenlerden 6 μm (d_{50}) ürün boyutunda 20 t/s kapasiteye varanları kaydedilmiştir (Mankosa et al. 1986). Bu değirmende yapılan öğütmede spesifik 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 and Forssberg 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 değirmen'lerin imalatı zorunlu hale gelmiştir. Bazı eski tesislerdeki öğütme sistemlerinin yenileştirilmesinde, önceki bilyalı değirmenlere ek olarak tekrar öğütme devrelerinde karıştırmalı değirmenlere de yer verilmektedir (Tuzun et al. 1995) . Son yıllarda en yüksek kapasiteli karıştırmalı değirmen Avusturalya Mount Isa madeninde ISA mill adı altında, Mount Isa Mines Ltd. ve NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH (Almanya) işbirliğiyle kurulmuştur. Cihaz, 3000 lt net hacim, sekiz karıştırıcı disk, 10 m/sn üstünde disk hızı, %70–80 bilya doluluk oranı, %40–50 pülp katı oranı, 180–240 lt/dk pülp çalışma debisi ve 1120 kW güçte çalıştırılmaktadır (Young and Gao 2000, Weller et al. 2000).

BÖLÜM 3

ÖĞÜTMENİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Enerji yoğun bir süreç olan öğretmenin modellemesi uzun yıllardan beri yoğun çalışmaların devam ettiği bir alan olmuştur. Genel olarak öğütme modellerini üç grupta sınıflandırmak mümkündür. Bunlardan ilki belki de en etkin olanı, teorik modellerdir. Bunlar fiziksel ve kimyasal yasalara uygun olarak bilimsel bir yapı üzerine kurulan modellerdir. En etkili model tipi olmasına karşılık işlemlerin karmaşıklığı nedeniyle çok fazla kullanım alanı bulamamıştır. İkinci grup modeller ise olay bazlı modellerdir. Bu modeller oldukça güçlüdür, prosesi gerçekçi bir şekilde ifade ederler ve diğer koşullara uyarlamaya uygundurlar. Bu gruptaki modeller, benzetim için yararlı modellerdir. Bu tür modellerle parametre değerleri ve besleme tane boyu bilindiğinde, ürün tane boyu hesaplanabilmektedir. Üçüncü grup modeller ise ampirik özelliğe sahiptirler. Bu gruptaki modellerde prosesin doğasının tanımından daha çok matematiksel olarak ifade edilmesi modeli meydana getirir. Öğütme yasalarını bu gruba sokmak mümkündür.

Bir öğütme devresinde maksimum verimliliği elde etmek için yapılan çalışmalarda ortaya çıkabilecek problemlerle üç aşamada karşılaşılmaktadır (Lynch and Lees, 1985). Bu aşamalar aşağıdaki adımlarla ifade edilebilir;

1. Öğütme işleminden sonra gerçekleştirilecek cevher hazırlama işlemlerinin tipi, sayısı ve boyutlarına uygun optimum boyut küçültme akım şemasının seçildiği tasarım aşaması,
2. Devre çalışırken değişebilen değişkenlerin doğru değerlerinin seçilmesinin gerekli olduğu işletim aşaması,
3. Besleme malzemesinin özelliklerinde veya devrenin mekanik işleyişinde meydana gelen bir değişimin, üründe istenmeyen özelliklere neden olduğu sürekli proses aşaması.

3.1 ÖĞÜTME MODELLERİ

Ufalama birim işlemlerinin enerji yoğun olması ve zaten maliyeti yüksek olan enerjinin büyük bir kısmının buralarda harcanmasından dolayı araştırmacılar optimum düzeyde enerji kullanımını sağlamak ve böylece prosesi verimli kılmak için öğütme devrelerinin optimizasyonunu oluşturma yönünde büyük bir çalışma içersine girmişlerdir. Bu yıllar içersinde klasik enerji-boyut küçültme ilişkileri temeline dayanan ampirik modeller ile birlikte, kırılma kinetikleri temeline dayanan teorik ve yarı ampirik modeller önerilmiştir (Sönmez 1992). Bond kuramının yaklaşık 40 yıldan beri değirmen seçiminde önemli bir tasarım aracı olduğu kabul edilmektedir (Rowland 1982, Lynch et al. 1986). Bununla birlikte bu ilişkilerin ampirik olmaları, normal işletim koşullarında kullanılmalarına önemli sınırlamalar getirmiştir (Lynch 1977, Herbst and Fuerstenau 1980, Austin and Brame 1983).

Daha sonraki yıllarda enerji-tane boyu küçültme ilişkilerinden hareketle oluşturulan modellere alternatif olarak, değirmen içinde oluşan mikro düzeydeki farklı kırılma olaylarının incelenmesi temeline dayanan modeller oluşturulmaya başlanmıştır. Bu modellerden olan Epstein (1948) modeli, değirmen içersindeki malzemelerin taşınım mekanizmalarını içermemektedir (Lynch et al. 1986). Epstein' in bu konudaki çalışmasından sonra öğütme devrelerinin optimizasyonunda matematiksel modeller yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve bu amaçla dört tip matematiksel model geliştirilmiştir. Bunlar; matris model, kinetik model, mükemmel karışım modeli ve çok bölmeli model olarak adlandırılırlar.

3.1.1 Matris Model

Broadbent ve Callcott (1956) tane boyutuna bağlı malzeme taşınım mekanizmalarını da içeren, Epstein tarafından önerilen sınıflandırma fonksiyonu ile tanımlanan kırılma kavramını bir matris olarak düşünmüşler ve bunu kömürün öğütülmesinde kullanmışlardır (Lynch et al. 1986, Yerlikaya 1994).

Matris model mantığı, kırılma olaylarının art arda gerçekleşmesi esasına dayanmaktadır. Bir önceki öğütme aşamasının ürünü bir sonraki adımın beslemesi olmaktadır. Bir boyut küçültme işlemi sırasında tüm boyut aralığındaki parçalar kırılma olasılığına sahiptirler ve kırılma ürünleri bu boyut aralığına ve daha küçük boyut aralıklarına düşebilirler.

3.1.2 Mükemmel Karışım Modeli

Bağımsız olarak türetilmesine karşılık, mükemmel karışım modeli (Whiten 1976) birinci derece hız kinetiğine oldukça benzerdir ve özel bir durumu olarak düşünülebilir. Burada değirmende meydana gelen olayların değirmen içersindeki malzeme ile ilgili olduğu kabul edilmektedir. Birinci derece hız kinetiğindeki sorun karışmanın göz önünde tutulmamasından kaynaklanmaktadır. Mükemmel karışmış değirmenin bu karışıklıkları ortadan kaldırdığını varsayılmakta ve standart bir kırılma fonksiyonu ile kırılmanın değirmenden çıkan malzeme miktarına oranını gösteren ve bilyalı değirmen performansını tanımlayan başka bir fonksiyon kullanılmaktadır.

3.1.3 Çok Bölmeli Model

Boşaltma içeriğindeki -2 mm boyutlu malzemenin çok az olduğu bilyalı değirmenler için, “Mükemmel Karışım Modeli” işlemdeki değişiklikleri çok iyi tanımlamaz. Tahminin doğruluğunu artırmak için, Kavetsky ve Whiten (1982) değirmeni bölümler arasında ileri geri karışıma izin veren bir seri mükemmel karışmış bölümler olarak düşünmüşlerdir.

Birikim bazlı kinetik modelde öğütme sadece kırılma hız fonksiyonu ile ifade edilmekte, kırılma dağılım fonksiyonu hesaba katılmamaktadır. Deneysel çalışmalarla elde edilebilecek bu parametrenin tesiste de doğrudan kullanılabileceği ileri sürülmüştür (Finch and Ramirez Castro 1981). Değirmen içersinde malzeme taşınımını açıklamak için basit ve duyarlı bir taşınım modelinin de seçilmesi gerekmektedir.

Tane boyu dağılımlarını matematiksel olarak sürekli biçimde ifade etmede karşılaşılan güçlükler nedeni ile fraksiyon esasına dayalı kesikli öğütme eşitliği önerilmiştir. Fraksiyon esaslı kesikli öğütme eşitliğini formüle etmedeki amaç, laboratuvar ölçekli kesikli öğütme deneyleri ile kırılma dağılım ve kırılma hız fonksiyonları gibi kırılma parametrelerini belirleyebilmektir. Bu kırılma parametreleri, sürekli çalışan bir değirmenin performansını belirleyebilmek için değirmende kalış süresi dağılım fonksiyonu ile bir arada kullanılmaktadır (Gardner and Austin 1962, Reid 1965, Herbst and Fuerstenau 1968, Kapur 1970, Lynch et al. 1986, Sönmez 1992, Yerlikaya 1994).

3.1.4 Kinetik Model

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 et al. 1986, İpek et al. 2005, Ozkan and Yekeler 2003, Deniz 2004, Fuerstenau et al. 2004).

Öğütmenin kinetik modellemesi sürekli fonksiyonlar ve kesikli dağılımlar ile ifade edilmektedir. Sürekli ve kesikli dağılım modelleri sırasıyla dağıtılmış ve birleştirilmiş parametre modelleri olarak adlandırılabilir. Bu modeller arasındaki farklılıklar, tanenin kırılma kinetiğinin doğrusal veya doğrusal olmayan, tanenin değirmene taşınımlarının birleştirilmiş veya dağıtılmış olarak tanımlanmasında kullanılan eşitliklerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Lynch 1977, Lynch and Less 1985). Doğrusal kırılma kinetikleri, belirli bir tanenin kırılma hızının ve birincil kırılma sonucu ortaya çıkan tane boyu dağılımının değirmen içersindeki ortamdan etkilenmediği durumlarda geçerlidir (Gardner and Austin 1962, Herbst and Fuerstenau 1972, 1980). Bilyalı değirmenlerde öğütme koşullarında genelde doğrusal kırılma kinetikleri gözlenmesine rağmen bazı aktarılan ortamlar çalışan değirmenlerde doğrusallıktan belirgin bir sapma gözlenmektedir (Zhenhua et al. 1998, Fuerstenau 2004, Bilgili 2007). Dağıtılmış parametre modelleri değirmen boyunca tanenin taşınmasını tanımlayan ayrıntılı modellerin kullanımını gerektirmektedir. Birleştirilmiş parametre modellerinde ise ayrıntılı tane taşınımı modelleri yerine malzeme taşınımını niteleyen kalış zamanı dağılımları kullanılmaktadır. Bu model sadece kırılma kinetiklerinin doğrusal ve malzeme taşınımının tane boyundan bağımsız olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Dağıtılmış parametre modelleri kullanılarak, belirli bir tane boyutundaki malzeme için değirmen içersinde herhangi bir konumda kırılma parametrelerinin değişimi tanımlanabilmektedir. Genelde dağıtılmış parametre modellerinin çözümü ve formülasyonu çok karmaşıktır. Birleştirilmiş parametre modelleri ise değirmen ya da devrenin besleme ve ürün özellikleri arasında basit ilişkiler kurar.

Tamamen ampirik olarak oluşturulan Bond modelinin aksine, doğrusal birleştirilmiş parametre modeli fiziksel anlamı olan, tane boyu ile ağırlığı arasında kurulan kütle denkliğinden türetilmiştir. Bu tür modeller ile laboratuvar ölçekli değirmenlerde kesikli, sürekli, açık ve kapalı devre olarak öğütme deneylerinden elde edilen ürünün tane boyu dağılımları doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bu nedenle değirmen benzetiminde bu modeller yaygın olarak kullanılmaktadır (Gardner and Austin 1962, Herbst and Fuerstenau 1968, 1972, 1980, Gumtz and Fuerstenau 1970, Sönmez 1992, Benzer et al. 2001, Özkan and Yekeler 2003).

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 Schumann 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 and Austin 1970, Austin et al. 1984, İpek 2003, Ozkan and Yekeler 2003, Deniz 2004, Fuerstenau et al. 2004, İpek et al. 2005).

Değirmendeki malzeme $\sqrt{2}$ veya $\sqrt[4]{2}$ elek serisi ile tanımlanan birçok tane boyut aralıklarına bölünmekte, en iri tane boyut aralığı “1”, ikinci tane boyut aralığı “2”, en ince tane boyu aralığı da “n” ile gösterilmektedir. 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 = $S_i w_i W$ olacaktır.

Burada S_i , i tane boyut aralığındaki malzemenin birim kütlesinin birim zamanda kırılma hızı; w_i , i tane boyut 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 fraksiyonun da ise; kırılmayla 1. boyut aralığının kaybolma hızı $w_1(t)W$ ile orantılı olacaktır. Toplam kütle, W , sabit olduğundan aşağıdaki Eşitlik 3.1 ile elde edilir;

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = -S_i w_i(t) \quad (3.1)$$

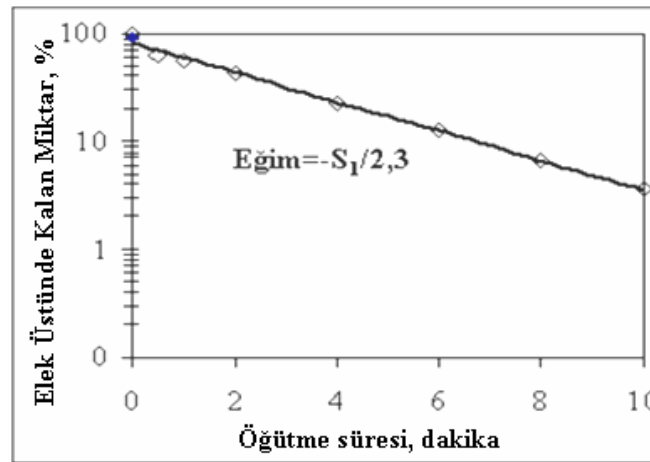
Burada, S_1 özgül kırılma hızı olarak adlandırılır ve bu değer oransal olarak sabit ise ve zamanla değişmiyorsa, aşağıdaki formda ifade edilir (Eşitlik 3.2),

$$w_1(t) = w_1(0) \exp(-S_1 t) \quad (3.2)$$

Sonuçta; aşağıda Eşitlik 3.3 ile verilen ve birinci derece öğütme kinetiği olarak formül elde edilir,

$$\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_1 t/2,3 \quad (3.3)$$

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 3.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Birinci derece kırılma davranışı.

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 görülmektedir, 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 (Austin 1971, Austin and Bhatia 1971, Austin et al. 1982a, Austin et al. 1984, Zhenhua et al. 1998, Fuerstenau et al. 2004, Bilgili 2007).

Belirli bir tane boyutundaki malzeme kırıldığında ürün olarak adlandırılan daha küçük tane boyutlarına parçalanır. Bu kırılmış malzemenin tane boyut dağılımını tanımlamada kullanılan fonksiyon, kırılma dağılım fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Taneler değirmen içerisinde ilk anda oluşan kırma kuvvetiyle parçalara ayrılırlar. Bu şekilde ilk kırma oluşur ve değirmen içerisinde, parçalanmış tanelerin karışımından meydana gelen bir ürün oluşur. Kırılmış taneler kırılmayanlarla karışacağından bu malzemenin yeniden öğütme işlemine girmeden tane boyut dağılımı belirlenebildiğinde bu birincil kırılma dağılım fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Buradaki birincil terimi ürünün tek bir kırılma olayı ile üretildiği anlamına gelmemektedir. Bu terim sadece kırılmış parçaların yığın içine tekrar karışmadan önce oluşan kırılma olayları sonucu üretildiğini ifade etmektedir (Austin et al. 1984).

Kırılma dağılım fonksiyonu iki ayrı sembolle tanımlanmaktadır (“ $b_{i,j}$ ” ve “ $B_{i,j}$ ”). Birincisi, 1. tane boyu aralığındaki malzemenin kırılması ile i tane boyu aralığında oluşan malzemenin ağırlıkça yüzdesinin “ $b_{i,1}$ ” şeklinde tanımlanmasıdır. Tüm tane boyu fraksiyonundaki malzemenin kırılmasını tanımlamak için, “ j ” boyut aralığındaki malzeme kırıldığında elde edilen ürün içerisindeki “ i ” boyut aralığındaki malzemenin ağırlık fraksiyonu “ $b_{i,j}$ ” matrisi ile gösterilir. Malzemenin tamamı bütün boyutların toplamına eşit olduğundan matris Eşitlik 3.4’ de verildiği gibidir;

$$\sum_{i=n}^{j+1} b_{i,j} = 1 \quad (3.4)$$

Toplamdaki “ n ”, son elek altı olarak tanımlanır.

Genel olarak $b_{i,j}$ matrisi, bütün boyutların kırılmasıyla oluşan i boyutlarının toplamıyla elde edilir (Teke 1999). İkincisi ise, 1. tane boyu aralığındaki malzemenin kırılması ile i tane boyu aralığına geçen malzemenin birikimli kütle fraksiyonunu ifade eden “ $B_{i,1}$ ” sembolüdür. ilgili tüm tane boyu aralıklarını ifade edebilmek için “ $B_{i,j}$ ” matrisi kullanılmaktadır ve aşağıda Eşitlik 3.5 ile verilen formülle hesaplanmaktadır.

$$B_{i,j} = b_{n,j} + b_{n-1,j} + \dots + b_{i,j} \quad (3.5)$$

eğer $B_{i,j}$ biliniyorsa aşağıda verilen Eşitlik 3.6 elde edilir.

$$b_{i,j} = B_{i,j} - B_{i+1,j} \quad (3.6)$$

$B_{i,j}$ değerleri 0,5 veya 1 dakika gibi kısa süreli öğütme testleriyle elde edilirler.

Kesikli öğütmede tane boyu ile tane ağırlığı arasındaki kütle denkliğinin kurulmasında kullanılan tanımlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Austin et al. 1984).

1. Kırılarak daha küçük tane boyutlarına giden j tane boyutundaki malzemenin kaybolma miktarı = $S_j w_j(t)W$
2. j tane boyutundaki malzemenin kırılmasıyla üretilen i tane boyutundaki malzeme miktarı = $b_{i,j} S_j w_j(t)W$
3. Daha küçük tane boyutlarına kırılan i tane boyutundaki malzemenin kaybolma miktarı = $S_i w_i(t)W$
4. Üretilen net i tane iriliğindeki malzeme miktarı, tüm daha büyük tane iriliğine sahip malzemelerden üretilen malzemelerin toplam miktarı ile kırılarak bu tane boylarından kaybolan malzeme miktarının farkına eşittir.

Simgesel olarak, bu nihai denge, n elek aralığı sayısı olmak üzere Eşitlik 3.7 ve Eşitlik 3.8 ile ifade edilir;

$$\frac{d[w_i(t)W]}{dt} = -S_i w_i(t)W + \sum_{\substack{j=1 \\ i \geq j}}^{i-1} b_{i,j} S_j w_j(t)W \quad (3.7)$$

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = -S_i w_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \geq j}}^{i-1} b_{i,j} S_j w_j(t), \quad n \geq i \geq j \geq 1 \quad (3.8)$$

Bu diferansiyel denklem mükemmel karışımli kesikli öğütme için tane iriliği ve ağırlığı denkleğinin temelini oluşturmaktadır. Burada öğütme işlemi n tane diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır. Genelde bu denklemler sayısal hesaplamayla çözülmektedir. Fakat S değeri öğütme zamanından bağımsız ise, bu eşitlikleri bilinen bir besleme tane boyu dağılımından başlamak şartı ile analitik olarak çözmek mümkündür.

Belirli bir öğütme derecesi için S ve B değeriinin değışmediğı varsayılarak, analitik olarak Reid (1965) tarafından çözülmüş ve aşağıda verilen Eşitlik 3.9, Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11 ile ifade edilmiştir.

$$W_i(t) = \sum_{j=1}^i a_{i,j} e^{-S_j t}, \quad n \geq i \geq 1 \quad (3.9)$$

$$a_{i,j} = W_i(0) - \sum_{\substack{k=1 \\ i \geq k}}^{i-1} a_{i,k}, \quad i = j \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{S_i - S_j} \sum_{k=j}^{i-1} s_k b_{i,k} a_{k,j}, \quad i > j \quad (3.11)$$

$a_{i,j}$ değeri, besleme boyut dağılımına bağı fakat öğütme zamanından bağımsızdır.

3.2 KIRILMA FONKSİYONLARININ BELİRLENMESİ

Kırılma hızı ve dağılımı fonksiyonlarını tesis ölçekli verilerle belirlemeye çalışmak oldukça zahmetli bir işlemdir. Bunun nedeni, bu fonksiyonların değirmende kalış süresi ve değirmen ürününün tane boyut dağılımının belirlenmesi zorunluluğundandır. Tesis bazında öğütme koşullarının sık sık değışmesi, malzemelerin değirmende kalış süreleriyle ürünlerin tane boyut dağılımlarını değıştirmektedir. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda öğütme koşulları istenen değeriinde sabit tutulabilmekte ve değirmende kalış süresi ve ürün boyut dağılımını belirleme zorunluluğı da ortadan kalkmaktadır. Laboratuvar çalışmalarıyla elde edilen kırılma hız ve dağılım fonksiyonları daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Bunların en büyük dezavantajları, bu sonuçları tesis bazına uydurabilmek için ölçek büyütme çalışması gerektirmeleridir (Austin et al. 1984). Kırılma hızı ve dağılımı fonksiyonlarının deneysel olarak belirlenmesi üç grup altında toplanabilir. Bunlar aşağıda verilmiştir,

1. Tek tane boyut aralığında hazırlanan besleme malzemesinin zamana karşı kesikli olarak öğütülmesiyle doğrudan belirleme yöntemi,
2. Çok az sayıda kesikli öğütme deney sonuçlarından geriye doğru hesaplama yoluyla doğrudan olmayan belirleme yöntemi,
3. Yukarıdaki her iki yöntemin bir arada kullanılmasıyla belirleme yöntemi.

İlk yöntem çok fazla deneysel çalışma gerektirmektedir ve oldukça da zahmetli bir yöntemdir. İkinci yöntemde deneysel çalışmaya harcanan zaman azalmakta fakat sonuçların güvenilirliği birinci yöntem kadar olmamaktadır (Prasher 1987).

3.2.1 Doğrudan Belirleme Yöntemi

Doğrudan belirleme yöntemi kendi içerisinde üç gruba bölünebilir;

1. Tek tane boyut fraksiyonunda hazırlanmış besleme malzemesinin kullanımı,
2. Tüm boyut fraksiyonunun besleme malzemesi olarak kullanılması fakat bir boyut fraksiyonun yerine:
 - i. Farklı bir kimyasal bileşime sahip malzemenin kullanılması,
 - ii. Radyoaktif izleyicinin kullanılması.
3. Tüm boyut fraksiyonunun besleme malzemesi olarak kullanılması fakat içinden birkaç fraksiyonun eş zamanlı olarak sürekli nükleer aktivasyon analiz tekniği ile işaretlenmesi yöntemi ile belirlenmesi yöntemleridir.

3.2.1.1 Dar Tane Boyut Gruplarında Hazırlanmış Besleme Malzemesinin Kullanımı

Doğrudan kırılma hız değerlerinin belirlenmesi için bir dizi dar tane boyut grubunda hazırlanan malzemenin değişen sürelerde kesikli olarak öğütülmesi ve her öğütme dilimi sonunda elek üstünde kalan miktarın belirlenmesinden ibarettir.

Malzeme uygun kırıcılar yardımıyla kırılarak kullanılacak değirmen ve şarj malzemesinin boyutuna bağlı olarak belirlenen tane boyutundan başlayarak $\sqrt{2}$ veya $\sqrt[4]{2}$ elek serilerinde tek tane boyut aralıklarında besleme malzemesi olarak hazırlanır. Hazırlanan tek tane boyut aralığındaki malzemenin yaklaşık olarak %90'ından fazlası bu boyut aralığında olmalıdır. Bu tek tane boyut aralığındaki malzemeler değirmende artan sürelerde öğütülürler. Değirmen küçük boyutta ise değirmendeki malzemenin tamamı boşaltılır ve elek analizi yapılır. Eğer

değirmen boyutu büyükse değirmendeki malzemedan uygun şekilde örnek alınarak elek analizi yapılır. Bu malzeme değirmene tekrar beslenerek öğütmeye devam edilir. Malzeme özellikleri dikkate alınarak bir elek analizi yöntemi belirlenmelidir.

Kesikli öğütme deneylerinde sadece özgül kırılma hızı değerleri belirlenecekse sadece en üst tane boyu aralığındaki malzeme miktarını belirlemek yeterli olmaktadır. Fakat genellikle kırılma dağılım fonksiyonlarının da belirlenmesi gerektiğinden kısa öğütme süreleri sonunda bütün tane boyu aralıklarında elek analizi yapılmalıdır.

Öğütme süreleri yaklaşık olarak her bir öğütme periyodu sonunda en üst tane boyutu eleğinin üstünde kalan miktarın sırasıyla %80, %50, %10 ve %5'i oranlarında olacak şekilde seçilmelidir. Belirlenen sürelerde öğütme deneyleri gerçekleştirildikten ve ürünün tane boyu dağılımı belirlendikten sonra, x ekseninin öğütme sürelerini ve y ekseninde en üst elekte kalan malzeme fraksiyonunun logaritmasını gösterdiği grafik çizilir. Eğer sonuçlar birinci derece öğütme kinetiğine uyuyorsa çizilen grafik bir doğru verecektir. Bu doğrunun eğimi o tane boyutunun kırılma hızını verir. Kırılma dağılımlarının hesaplanması biraz daha karmaşıktır.

Austin ve Luckie Yöntemi (BII)

Austin ve Luckie (1971), tek tane boyut aralığındaki malzemenin birincil kırılmasından elde edilen tane boyu dağılımlarını kullanarak B değerlerinin belirlenmesi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntemde öğütme süresinin tekrar kırılma olmayacak şekilde sınırlı tutulması zorunluluğunu ortadan kaldırmıştır (Prasher 1987, Teke et al. 2002). Austin ve Luckie, S_i ve $B_{i,j}$ 'nin sadece i 'nin bir fonksiyonu olduğu varsayıldıktan sonra kesikli öğütme denkleminin çözümünden B değerlerinin hesaplamasını Eşitlik 3.12-3.18 ile ifade etmişlerdir. Fiziksel olarak bu “i” boyutundan daha altlara kırılma hızı sadece “i” boyutundan daha büyük malzemelerin oransal miktarına bağlıdır. Burada i , i boyut aralığının ortalama boyutu değil aralığın üst boyutudur.

$$1 - P_i(t) = [1 - P_i(0)] \exp[-SB_{i,j}t], j \leq i \quad (3.12)$$

Bunu her şeyden önce üst boyut grubundaki beslemenin kısa öğütme zamanı için uygularsak,

$$1 - P_2(t) \approx [1 - P_i(0)] \exp(-B_{i,1} S_1 t) \quad (3.13)$$

Zaman 0 olduğunda başlangıç dağılımının $(1 - \delta)$ olduğunu farz edelim. Böylece $P_2(0) = \delta$ dir.

$$1 - P_2(t) = (1 - \delta) \exp(-S_1 t) \quad (3.14)$$

$$-S_1(t) = \ln[(1 - P_2(t))/(1 - \delta)] \quad (3.15)$$

$$-B_{i,1} S_1 t \approx \ln[(1 - P_i(t))/(1 - P_i(0))] \quad (3.16)$$

$$B_{i,1} = \frac{\log[(1 - P_i(0))/(1 - P_i(t))]}{\log[(1 - P_2(0))/(1 - P_2(t))]}, \quad i > 1 \quad (3.17)$$

1. tane boyu genel olarak j ile gösterilirse aşağıda verilen Eşitlik 3.18 elde edilir;

$$B_{i,j} = \frac{\log[(1 - P_i(0))/(1 - P_i(t))]}{\log[(1 - P_{j+1}(0))/(1 - P_{j+1}(t))]}, \quad i > j \quad (3.18)$$

BII yöntemi özellikle bilyalı değirmenlerde iyi sonuçlar vermektedir. Çünkü, S_i ve $B_{i,j}$ 'nin i 'nin bir fonksiyonu olduğuna dair yapılan varsayım genellikle geçerli olmaktadır. BII yöntemi başlangıç tane boyunun yaklaşık %30'unun kırıldığı öğütme süreleri için geçerli olmaktadır.

Özgül kırılma hızının tane boyu ile değişimini ifade eden denklemdeki α parametresi ile kırılma dağılım fonksiyonunun tane boyu ile değişimini ifade eden denklemdeki γ parametresi arasındaki fark ne kadar büyük ise yapılan varsayımın belirli bir öğütme derecesine uygulanabilirliği o kadar azalmaktadır. Bu yüzden daha doğru sonuçlar elde edebilmek için başlangıç malzemesinin %20'sinin kırıldığı öğütme sürelerinde B değerleri belirlenmelidir.

3.2.2 Doğrudan Olmayan Belirleme Yöntemi (Geri Hesaplama)

Geri hesaplama yöntemi iki ana grup altında tanımlanabilir. Bunlar; doğrudan tahmin ve deneme-yanılma veya optimizasyon olarak gruplandırılabilir. Bu iki grupta kırılma hız ve dağılım fonksiyonlarının birlikte veya ayrı ayrı kullanılarak hesaplama yapılmasına göre alt gruplara ayrılabilir. Geriye doğru hesaplama yöntemlerinin, elde edilen bütün verileri kullanması, sınırlı sayıda veri ile de kullanılarak deneysel çalışma zamanını azaltması, tesis bazında sürekli verilere de uygulanabilmesi en büyük avantajları olarak gösterilebilir (Prasher 1987). En büyük dezavantajı ise verileri önerilen model varsayımlara uymaya zorlaması ve bazı varsayımlar doğru olmadığında sonuçlara ulaşmanın güçleşmesidir (Austin et al. 1984).

3.2.2.1 Optimizasyon Yöntemi

Klimpel ve Austin (1970, 1977), parametre değerlerindeki sapmalara duyarlı analizleri içeren laboratuvar çaplı kesikli öğütme deney verilerinin kullanıldığı bir yöntem geliştirmişlerdir. Kesikli öğütme eşitliklerinin çözümünde kullanılan S ve B fonksiyonlarının hatalı olması durumunda bile deneysel olarak bulunan tane boyu dağılımları ileri doğru hesaplama ile ölçülen ile hesaplanan değerler arasında, iyi bir uyum verebilmektedir. Eğer zamana karşılık yapılan öğütme testlerinden elde edilen sonuçlar birinci derece öğütme kinetiğine uymazsa bile, sonuçların buna uyduğunu varsayarak ileri doğru hesaplama yöntemiyle oldukça iyi sonuçlar elde edilmektedir, fakat geriye doğru hesaplama yöntemiyle aynı başarı elde edilememektedir (Austin et al. 1984).

Reid Çözümü Kullanarak S ve B Fonksiyonlarının Ayrı Ayrı Belirlenmesi

Klimpel ve Austin yöntemlerinde, parametre sayısının azaltılması için S ve B' nin tane boyutuna ilişkin fonksiyonlarında bazı basitleştirici varsayımlar yapmışlardır.

Bu varsayımlar aşağıda ifade edilmektedir,

1. S değerleri bir maksimuma ulaşmıyorsa;

$$S_i = a_T \left[\frac{x_i}{x_1} \right]^\alpha, \quad n \geq i \geq 1 \quad (3.19)$$

2. S değerleri bir maksimuma ulaşıyorsa;

$$S_i = a_T \left(\frac{x_i}{x_1} \right)^\alpha \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu} \right)^\Lambda} \quad (3.20)$$

Burada;

x : Tane boyutu,

a_T : Değirmen koşullarına bağlı parametre,

α : Malzemeye özgü parametre,

Λ : Tane boyunun büyümesiyle kırılma hızının azalmasını gösteren parametre,

μ : Düzeltme faktörünün 0,5 olduğu tane boyu olup öğütme şartlarıyla değişen parametre.

B kırılma dağılım fonksiyonu ise Eşitlik 3.21 ile ifade edilir,

$$B_{i,1} = \Phi_1 \left(\frac{x_{i-1}}{x_1} \right)^\gamma + (1 - \Phi_j) \left(\frac{x_{i-1}}{x_1} \right)^\beta \quad (3.21)$$

B değerleri normalize edilebilir değilse eşitlik aşağıdaki forma dönüşür,

$$B_{i,1} = \Phi_1 \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\gamma + (1 - \Phi_j) \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\beta, \quad \Phi_j = \Phi_1 \left[\frac{x_j}{x_1} \right]^{-\delta} \quad (3.22)$$

Burada;

$B_{i,1}$: 1. tane boyu aralığındaki malzeme kırılması ile i tane boyu aralığına geçen malzeme birikimli kütle fonksiyonu,

Φ, β, γ : Kırılma dağılım parametreleri.

Kırılma parametrelerinin tane boyu ile değişimini gösteren fonksiyonlar ve Reid çözümü kullanılarak hesaplanan ve ölçülen ürün tane boyu dağılımları arasındaki farkların kareleri toplamı minimum olacak şekilde parametre değerleri belirlenebilir (Austin et al. 1984).

3.3 KIRILMA HIZI PARAMETRELERİNİN TASARIM VE İŞLETME ŞARTLARI İLE DEĞİŞİMİ

3.3.1 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 3.23 ile ifade edilebilir;

$$S_i = a_T \left[\frac{x_i}{x_0} \right]^\alpha, \quad x_i \ll d \quad (3.23)$$

Burada; a_T değirmen koşullarına bağlı bir parametre iken α malzemeye göre değişiklik gösteren karakteristik bir parametredir. Ayrıca; x_i ve d sırasıyla tane boyu ve bilya çaplarıdır, x_0 ise 1000 mikrondur. Çatlak teorisine göre tanelerin boyutları küçüldükçe dayanımları artmaktadır. Çünkü büyük boyutlarda görülen çatlaklar tane boyu küçüldükçe ortadan kalkmaktadır. Aynı zamanda, geometrik etki nedeniyle, iri tanelere oranla küçük tanelerin bilyalar tarafından kavranmaları zor olmaktadır. Böylece tane boyu küçüldükçe kırılma olayı zorlaşmaktadır. İri tane boyunda malzeme başlangıçta hızlı, daha sonra yavaşlayan bir hız ile kırılarak birinci derece öğütme kinetiğinden sapmaktadır. Öğütmenin başlangıcında özgül kırılma hızı, tane boyu ile artarken belirli bir tane boyundan sonra yavaşlamaya başlar. Bunun iki nedeni olabilir. Tane boyu bilyalara oranla iri olup bilyalar tarafından sıkıştırılmaları güçleşir. Ya da tam tersi, oluşan inceler yastıklama etkisi yaparak iri boyların kırılmasını engeller. Birinci derece öğütme kinetiğine uyan ince malzemelerin kırılması “normal kırılma bölgesi” olarak adlandırılırken, birinci derece öğütme kinetiğine uymayan kırılma ise “normal olmayan kırılma bölgesi” olarak adlandırılmaktadır. Normal olmayan kırılma bölgesinde malzemenin %95’ini kırmak için gerekli zaman “ortalama etkin özgül kırılma hızı” olarak adlandırılmaktadır. Tane boyunun büyümesiyle bilyaların sahip olduğu enerjinin, tanelerin verimli bir şekilde kırılmasına yetmemesi ile özgül kırılma hızının düşmeye başlaması öğütmede doğrudan verimsizlik olarak adlandırılır. Bilyaların aktarma enerjisi ile etkin bir şekilde kırılmayan taneler, öğütme için büyük kabul edilirler. Bununla birlikte büyük taneler arzu edilen ürün kalitesinde ve miktarında azalmaya sebep olarak çentme ve aşındırma ile ince ürün oluşturabilirler.

Özgül kırılma hızının belirli bir tane boyu değerinden sonra düşmeye başladığını ifade etmek için, özgül kırılma hızı ile tane boyu arasındaki ilişkiyi " Q_i " düzeltme faktörü ile çarpamak gerekmektedir. Sonuçta kırılma hızı (S_i) aşağıdaki Eşitlik 3.24 ile ifade edilir,

$$S_i = a_T x_i^\alpha Q_i \quad (3.24)$$

Q_i , ince taneler için 1 değerini alırken, tane boyutu büyüdükçe bu değer küçülmektedir. Q_i 'nin aşağıdaki eşitliğe uyduğu bulunmuştur,

$$Q_i = \frac{1}{1 + (x_i / \mu)^\Lambda} \quad , \quad \Lambda \geq 0 \quad (3.25)$$

Burada μ , düzeltme faktörünün 0,5 olduğu tane boyu olup öğütme şartlarıyla değişmektedir. Λ , ise tane boyunun büyümesiyle kırılma hızının azalmasını gösteren pozitif değere sahip bir parametredir. Λ değerinin büyümesi ile kırılma hızı değeri düşmektedir. Λ malzeme özellikleri, μ ise değirmen işletme koşullarıyla değişen parametrelerdir.

Özgül kırılma hızının maksimum olduğu tane boyu malzeme özellikleri ile değişir. Malzeme sertliği azaldıkça, özgül kırılma hızının maksimum olduğu tane boyu değeri büyür (Austin et al. 1976a, Austin et al. 1984, Prasher 1987, Sönmez 1992, Yerlikaya 1994, Teke 1999, İpek 2003, Ozkan and Yekeler 2003, Deniz 2004, İpek et al. 2005).

3.3.2 Kırılma Hızının Değirmen Dönüş Hızı ile Değişimi

Değirmeni döndürmek için gereken net güç, kritik hız fraksiyonu ile artmakta, belirli bir kritik hız fraksiyonu değerinden sonra azalmaya başlamaktadır. Normal olarak özgül kırılma hızı da dönüş hızına bağlı olarak motor gücünün değişimine benzer olarak değişecektir. Net güç değerinde ulaşılan en büyük değer, değirmen çapına, astar türüne, bilya çapının değirmen çapına oranına ve bilya ile malzeme doldurma oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Genelde bilya doldurma oranının, J , %40 olduğu büyük ölçekli değirmenlerde kritik hızın %70–75'inde, diğer koşullarda kritik hızın %70–80'inde maksimum güç tüketim değerine ulaşılmaktadır. Maksimum güç tüketiminin sağlandığı değirmen dönüş sınır değerleri arasında özgül kırılma hızı, değirmen dönüş hızı ile çok az değişmektedir.

Araştırmalar sonucunda normal kırılma koşullarında, değirmen dönüş hızı ile özgül kırılma hız değerlerinin değişiminin aşağıdaki Eşitlik 3.26 ile ifade edilebileceği bulunmuştur (Austin and Brame 1983).

$$m_p, S_i \propto (\phi_c - 0,1) \left[\frac{1}{1 + \exp[15,7(\phi_c - 0,94)]} \right], \quad 0,4 < \phi_c < 0,9 \quad (3.26)$$

Burada; m_p , motor gücü ve ϕ_c , kritik hızdır.

3.3.3 Kırılma Hızının Değirmen Geometrisi ile Değişimi

3.3.3.1 Değirmen Çapı ile Değişim

Austin vd. (1982a), aynı doldurma oranlarında kırılma hızının değirmen çapıyla değişimini aşağıdaki Eşitlik 3.27 ile ifade etmişlerdir,

$$S_i \propto D^n \quad (3.27)$$

Burada; D değirmen çapıdır. Değirmen çapının 3,81 metreden küçük olması durumunda n değeri yaklaşık olarak 0,5 ve büyük olması durumunda ise yaklaşık olarak 0,3'dür.

3.3.3.2 Değirmen Boyu ile Değişim

Sürekli işletme koşullarında, değirmen boyunca kırılma hız değerlerinin önemli bir ölçüde değişmediği görülmektedir (Prasher 1987).

3.3.3.3 Astar Şekli ile Değişim

Farklı astar şekline sahip değirmenlerde bilya ve malzeme hareket mekanizması tam olarak anlaşılamadığı için astar tipleri ile kırılma hızının değişimi arasındaki ilişkiye açıklık getirilememiştir. Ancak besleme bölgesinde iri bilyaların, boşaltma kısmında küçük çapta bilyaların toplanmasını sağlayan astar tiplerinde kırılma hızının daha yüksek olduğu bilinmektedir (Yerlikaya 1994).

3.3.4 Kırılma Hızının Öğütücü Ortam ile Değişimi

3.3.4.1 Bilya Çapı ve Şekli ile Değişim

Değirmenin birim hacmindeki bilya sayısı $1/d^3$ ile orantılı olarak arttığından, birim zamandaki bilya-bilya çarpışma hızı bilya çapının küçülmesi ile artar. Böylece ince tane boyunda malzemenin, küçük çapta bilyalardan oluşan öğütücü ortam kullanılarak öğütülmesi durumunda kırılma hızı daha yüksek bir değere sahip olmaktadır. Austin vd. (1982b) yaptıkları çalışmalar sonucunda değirmen koşullarına bağlı parametre, a , ile bilya çapı, d , arasındaki ilişki aşağıda Eşitlik 3.28’ de verilmiştir,

$$a \propto 1/d^{\xi_2} \quad (3.28)$$

Austin vd. (1976a), ξ_2 değerinin yaklaşık 1 olduğunu, Kelsall vd. (1967) ise yaş öğütme esnasında ξ_2 değerinin yaklaşık olarak 1,5 olduğunu göstermişlerdir. İri tane boyutundaki malzemelerin büyük bilya çapları ile daha verimli öğütüldükleri bilinen bir gerçektir. Bilya çapı büyüdükçe iri tane boyutundaki malzemenin öğütülme verimi artmaktadır. Bu ilişkiyi aşağıdaki Eşitlik 3.29 ile ifade etmek mümkündür,

$$X_m \propto d^2 \quad (3.29)$$

Burada x_m , kırılma hızının maksimum olduğu noktadaki tane boyu ve d ise bilya çapıdır. a ve x_m değerleri malzeme ve değirmen işletme koşullarına bağlı değişkenlerdir. a değeri malzeme sertliği ile çok fazla değişirken, x_m değeri pek fazla değişmemektedir. x_m değeri iri tanelerin dayanımının yanında, tanelerin bilyalar arasında tutulma geometrisine bağlıdır. Aslında bu değer, malzeme özellikleri ile fazla değişikliğe uğramaz. Farklı çaplarda bilyalardan oluşan bilya yükü için normal kırılma bölgesinde her bir çaptaki bilyanın özgül kırılma hızı üzerine etkisinin bu çaptaki bilyaların ağırlığı ile doğru orantılı olduğu varsayılarak ortalama özgül kırılma hızı aşağıda verilen Eşitlik 3.30 ile hesaplanabilmektedir,

$$\bar{S}_i = \sum_k S_{i,k} M_k \quad (3.30)$$

Burada, $\bar{S}_i$, i tane boyu aralığındaki malzemenin farklı çaplarda bilyalardan oluşan öğütücü ortam kullanılarak öğütülmesi ile elde edilen ortalama özgül kırılma hızı, $S_{i,k}$, i tane boyu aralığındaki malzemenin k çapından oluşan bilyalarla öğütülmesi ile elde edilen özgül kırılma hızı ve M_k ise k çapındaki bilyaların ağırlık yüzdesidir (Prasher 1987).

Kullanılan öğütücü ortamın şekli ürün boyutu, enerji tüketimi ve öğütme maliyeti üzerinde etkilidir. Öğütücü ortam olarak çoğunlukla küresel bilya ve çubuk şekilli ortamlar kullanılmaktadır. Son yıllarda farklı şekillerde öğütücü ortamlar endüstriyel ölçekte kullanılmaya başlanmıştır. Farklı geometrili öğütücü ortamlara örnek olarak; Wheelabrator Allevard Enterprise (WAE) firması tarafından üretilen “millpebs”, Doering International firması tarafından üretilen “Cylpebs”, Donhad firması tarafından üretilen “Powerpebs”’ler verilebilir. Brunswick mining’de (Cu, Zn ve Pb) serbestleştirmeyi arttırmak için yapılan yeni öğütme devresinde karşılaşılan olumsuzluklar, öğütücü ortam olarak %100 millpebs kullanılarak aşılmıştır. Doering International firmasına göre; Cylpebslerin, eşit çaplı küresel bilyalara göre birim ağırlıkları daha fazla olduğu için, öğütme verimleri fazladır ve enerji sarfiyatı da %25 oranında daha azdır. Donhad firması tarafından üretilen powerpebs’ lerin (uzunluğu, çapının 1,5 katı) %21’e varan oranlarda enerji tasarrufu sağlandığı belirtilmektedir.

3.3.4.2 Bilya Yoğunluğu ile Değişim

Seebach (1969) , kuru öğütme koşullarında çimento klinkeri üzerinde yaptığı çalışmalarda bilya yoğunluğu ile kırılma hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu bulmuştur. Değirmenin çektiği güç de bilya yoğunluğu ile doğrudan orantılıdır. Yoğunluğu düşük bilyalardan oluşan öğütücü ortam ile gerçekleştirilen öğütme koşullarında değirmenin çektiği güç düşmekte ve kapasite azalmaktadır. Bununla beraber, Austin vd. (1982b) ise yaptıkları çalışmalar sonucunda ilişkinin tam olarak doğrusal olmadığını gözlemlemişlerdir. Bu nedenle her farklı bilya malzemesi için özgül kırılma hızı deneysel olarak belirlenmelidir (Austin et al. 1984, Prasher 1987).

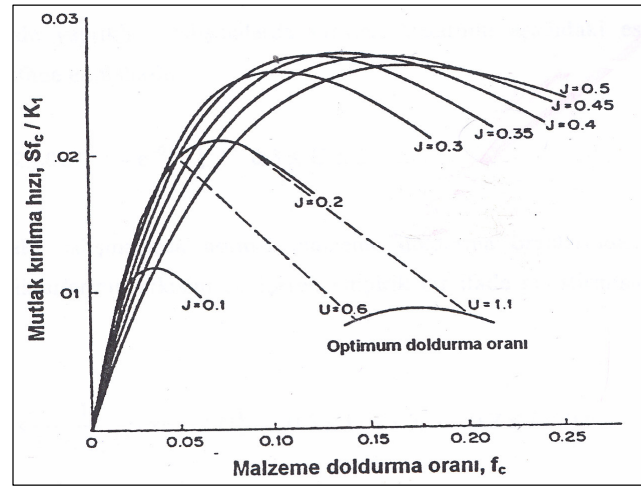
3.3.4.3 Bilya Sertliği ile Değişim

Belirli bir değerin üzerinde olmak koşuluyla bilya sertliğinin değirmen kapasitesi üzerinde etkili olmadığı bilinmektedir (Prasher 1987).

3.3.5 Kırılma Hızının Bilya ve Malzeme Doldurma Oranı ile Değişimi

Kırılma hızı değerleri doğrudan değirmenin malzemeyi kırma kabiliyetine indekslidir. Yapılacak testlerde malzeme dolum oranı, f_c , değişimi ile değerlendirilecekse, işleme tabi tutulan malzeme miktarının bilinmesi yararlı olacaktır. Böylece mutlak kırılma hızının S_iW

veya $S_i f_c$ ile karşılaştırılması yararlı olacaktır. f_c 'nin birim zamanda ve birim değirmen hacminde kırılan malzemenin hacmi olarak tanımlanmasının fiziksel bir anlamı vardır. Az malzeme doldurulması durumunda enerjinin büyük bir kısmı bilyaların çarpışması ile harcanmakta ve böylece S_i 'de düşmektedir. Değirmen tarafından çekilen güç malzemenin az veya çok olmasıyla hemen hemen değişmemektedir. Böylece azalan S_f değeri, öğütmenin enerji kullanımı açısından verimsizliğini göstermektedir. Malzeme doldurma oranının düşmesi ile α değeri düşmekte malzemenin öğütülebilirliği artmakta, böylece çok miktarda ince malzeme oluşmaktadır. Malzeme ile bilya doldurma miktarı arasındaki oran U ($U=f_c/0,4J$) ile tanımlanır ve normal α ve B_{ij} değerleri, bilyalar arası boşluğun %20–30'undan fazla olduğu durumlarda elde edilir (Austin et al. 1984). Fazla malzeme doldurma oranlarında da malzeme yastıklama etkisi yaparak düşük $S_i f_c$ değerine sebep olur. Değirmen içersinde oluşan malzeme birikmesinden dolayı birinci derece kinetikten sapma meydana gelir (Austin et al. 1984). Bilya doldurma oranı, J , ve malzeme doldurma oranı, f_c 'nin bir fonksiyonu olarak mutlak kırılma hızının değişimi Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmende kırılma hızının değişimi.

Şekil 3.2 incelendiğinde; düşük malzeme doldurma oranlarında düşük kırılma hız değerleri elde edildiği görülmektedir. Malzeme miktarının artmasıyla bilyalar arasındaki çarpışma boşluklarını doldurur ve böylece yüksek kırılma hızı değerleri elde edilir. Bütün etkin boşluklar doldurulduğunda en yüksek kırılma hızı değerleri elde edilir. Bu değerden sonra artan malzeme miktarı ile mutlak kırılma hızı bir süre sabit değerde kalır. Bilyalar arası boşlukların malzeme ile dolmasıyla yastıklama etkisinin gözlenmeye başladığı malzeme doldurma oranı değerinden itibaren kırılma hızı düşmeye başlar.

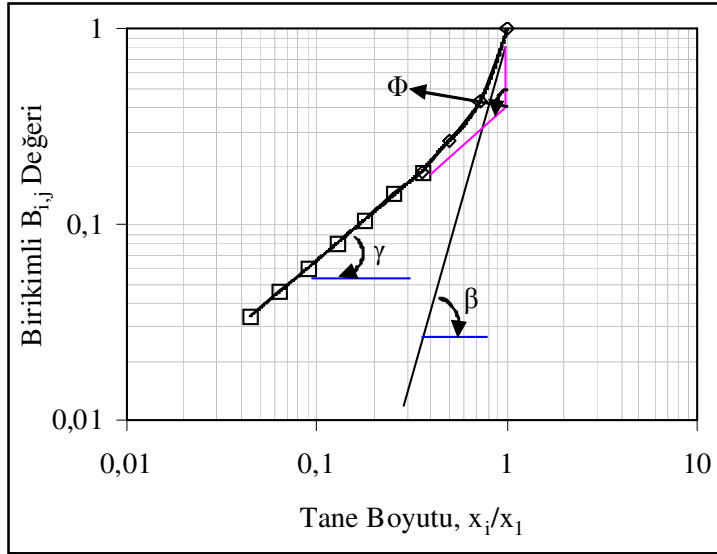
3.4 KIRILMA DAĞILIM PARAMETRELERİNİN TASARIM VE İŞLETME ŞARTLARI İLE DEĞİŞİMİ

3.4.1 Kırılma Dağılımının Tane Boyu ile Değişimi

Kırılma dağılım değerlerinin tane boyu ile değişimi, normalize edilebilen yani başlangıç boyutundan bağımsız kırılma dağılım değerleri aşağıda verilen Eşitlik 3.31 ile ifade edilmektedir,

$$B_{i,1} = \Phi \left(\frac{x_{i,1}}{x_1} \right)^\gamma + (1 - \Phi) \left(\frac{x_{i-1}}{x_1} \right)^\beta, \quad i > 1 \quad (3.31)$$

Burada β , γ , ve Φ değerleri Şekil 3.3'deki kırılma dağılımının, $B_{i,1}$, tane boyunu gösteren grafikten elde edilirler ve malzemenin kırılma dağılımını belirleyen karakteristiklerdir.



Şekil 3.3 Kırılma dağılım fonksiyonlarının tane boyu ile değişimi.

γ değeri, 0,5-1 arasında olup boyut dağılımının eğimi ile ilgili bir faktördür. γ değerinin büyük veya küçük olması ince malzeme miktarının az veya çok olduğunu belirtmektedir. β değeri 2,5-5 arasında, Φ kesişme değeri olup 0,5-1 arasında değişir. β ve Φ değerleri besleme boyutuna yakın fraksiyonların ne kadar hızla bir alt boyuta indirgendiğini göstermektedir. Özellikle değirmenden alınan ürünün boyut dağılımı γ değerine oldukça duyarlıdır. Büyük boyutlar farklı kırılma dağılımı değerlerine sahiptir. Bunun nedeni ortalama kırılma

hareketinde aşındırma ve çentmenin daha etkili olmasıdır (Austin et al. 1981, Austin et al. 1984, Prasher 1987, Yekeler vd. 1999, Yekeler et al. 2001, Deniz 2003, Ipek et al. 2005, Makokha et al. 2006, Ozkan and Yekeler 2006).

Normalize edilemeyen yani başlangıç boyutuna bağlı kırılma dağılım değerleri ise aşağıdaki Eşitlikler 3.32 ve 3.33 ile ifade edilmektedir (Austin et al. 1981, Austin et al. 1984, Prasher 1987, Austin et al. 1971).

$$B_{i,j} = \Phi_j \left(\frac{x_{i,1}}{x_1} \right)^\gamma + (1 - \Phi_j) \left(\frac{x_{i-1}}{x_1} \right)^\beta, \quad 0 \leq \Phi_j \leq 1 \quad (3.32)$$

$$\Phi_j = \Phi_1 \left[\frac{x_j}{x_1} \right]^{-\delta} \quad (3.33)$$

3.4.2 Kırılma Dağılımının Bilya Çapı ile Değişimi

Kelsall vd. (1967, 1968) yaptıkları çalışmalar sonucunda bilya çapı ile kırılma dağılım fonksiyonu değerlerinin değişmediği sonucuna varmışlardır. Ancak, Austin vd. (1982b) tarafından yapılan ayrıntılı çalışmalar sonunda bilya çapı ile kırılma dağılım fonksiyonu değerlerinin sistematik bir şekilde değiştiği görülmüştür. Büyük çaplı bilyaların çarpışması sonucu oluşan yüksek darbe kuvveti daha fazla ince, düşük γ , ve yüksek Φ değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bilya çapının büyümesi ile kırılma hızı azalırken, oluşan ince malzeme miktarı artmaktadır.

Değişik çaplı bilyalardan oluşan bilya karışımı için kırılma dağılım fonksiyonu değerleri aşağıda verilen Eşitlik 3.34 ile hesaplanabilmektedir,

$$\bar{B}_{i,j} = \sum m_k S_{j,k} B_{i,j,k} / \bar{S}_j \quad (3.34)$$

Burada $B_{i,j,k}$, j tane boyutundaki malzemenin k çapında bilya ile kırılması sonucu i tane boyutunda oluşan malzemenin birikimli kırılma dağılım fonksiyonudur.

3.4.3 Kırılma Dağılımının Değirmen Parametreleri ile Değişimi

Araştırmalar sonunda kırılma dağılım fonksiyonunun aşağıdaki parametrelerden bağımsız olduğu bulunmuştur (Prasher 1987).

1. Değirmen Çapı
2. Bilya yoğunluğu
3. Bilya doldurma oranı
4. Malzeme doldurma oranı
5. Değirmen dönüş hızı

Herbst ve Fuerstenau (1972), kritik hızın altında olmak koşulu ile değirmen dönüş hızının artması sonucu elde edilen ürünün daha iri birincil kırılma dağılımına sahip olduğunu, Austin vd. (1984) ise maksimum güç tüketiminin sağlandığı değirmen dönüş hızlarında kırılma dağılım değerlerinin değişmediğini belirtmişlerdir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çatalağzı Termik Santrali'nde (ÇATES) yakılmakta olan katı fosil yakıtın öğütülebilirliği incelenmiştir. ZKÜ Maden Mühendisliği Bölümü Yakup Keskin Cevher Hazırlama Laboratuvarında bulunan karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende yapılan öğütme çalışmalarında, öğütmede etkili olan parametreler incelenmiştir. Öğütme ürünlerinin boyut dağılımları, öğütmedeki enerji tüketimleri santral verileri ile karşılaştırılmıştır.

4.1 DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TANITILMASI

ÇATES stok harmanından değirmenlere besleme yapan bantlardan numune alma standartlarına uygun olarak numune alınmış, harmanlanarak santral içinde havada kurutulmuş ve deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere “ÇATES orijinal değirmen giriş numunesi” olarak kodlanmıştır.

ÇATES orijinal değirmen giriş numunesi -10 mm boyutundadır. Maden Mühendisliği bölümüne getirilen bu numune, laboratuvarında 3350 µm boyutu altına konik kırıcı ile kontrollü olarak kırılmış ve deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere “ÇATES numunesi” olarak kodlanmıştır.

ÇATES numunesinin kuru bazda aşağıda Çizelge 4.1'de verilen özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.1 ÇATES numunesi kısa analiz sonuçları.

Numune Adı	Kül (%)	Uçucu Madde (%)	Kükürt (%)	Üst Isıl Değeri (Kkal/kg)
ÇATES numunesi	47,58	17,20	0,50	3825

Ayrıca piknometre ile yapılan yoğunluk belirleme testleri sonucunda ÇATES numunesinin $1,8 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğa sahip olduğu belirlenmiştir.

ÇATES’de yakıt TTK’nın Kozlu, Üzülmaz ve Çatalağzı lavvarlarından ve özel sahalardan temin edilmektedir. ÇATES yakıtı kül oranı yüksek yıkama artıkları ile düşük küllü temiz kömürlerin ÇATES şartname değerlerine uygun yakıt elde edecek şekilde (kül ve kalori bazında; $\%46 \pm 2$ kül ve $3200 \pm 100 \text{ Kkal/kg}$ ısı değeri) harmanlanması ile elde edilir.

Yakıtın homojen olmayan yapısının ortaya konulabilmesi amacı ile ÇATES numunesi ile yıkama (yüzdürme-batırma) testleri yapılmıştır. $1,4 \text{ gr/cm}^3$ yoğunlukta yüzen miktar $\%25,56$ ve bu kısma ait kül oranı $\%8,40$ iken, $1,9 \text{ gr/cm}^3$ yoğunlukta batan miktar $\%49,21$ ve bu kısma ait kül oranının $\%78,61$ olduğu belirlenmiştir. Yüzdürme-batırma test sonuçları, ÇATES yakıtının, yüksek küllü şist içinde yer alan düşük küllü kömürden ibaret, homojen yapıdan uzak kömür-şist karışımından oluştuğunu ortaya koymuştur. Yüzdürme-batırma test sonuçları Ek Açıklamalar A’da Çizelge A.1-A.3 ve Şekil A.1-A.3 ile verilmiştir.

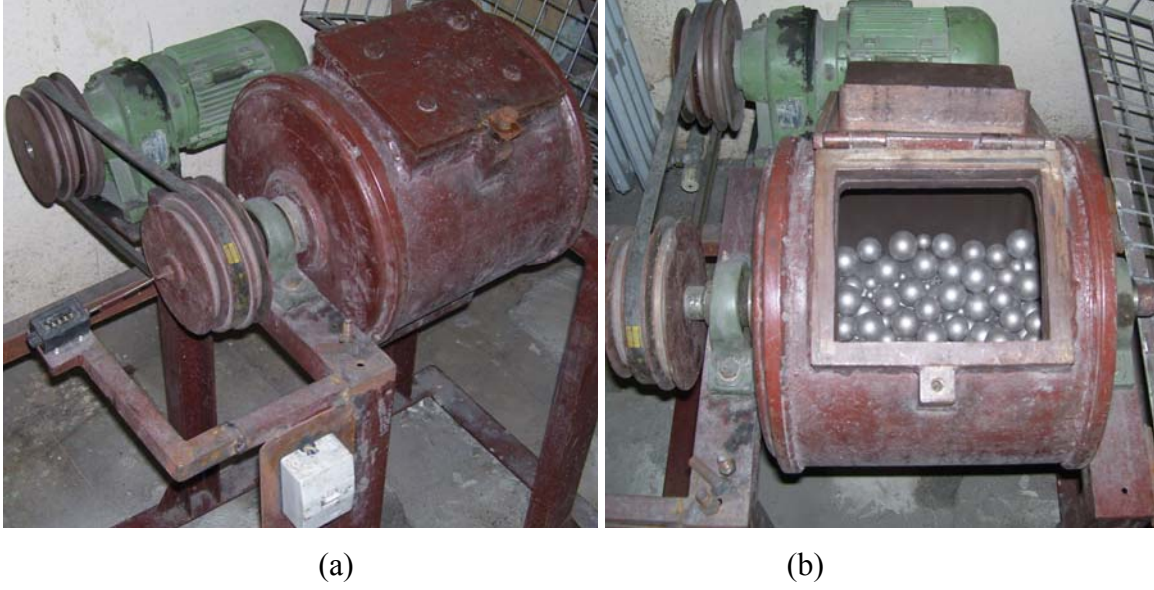
Öğütme deneylerinde kullanılmak üzere ÇATES numunesi, Russel elek kullanılarak $-3350+2360 \text{ }\mu\text{m}$, $-2360+1700 \text{ }\mu\text{m}$, $-1180+850 \text{ }\mu\text{m}$, $-425+300 \text{ }\mu\text{m}$ ve $-212+150 \text{ }\mu\text{m}$ dar tane boyut gruplarında hazırlanmıştır.

4.2 ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK DENEYLERİ

ÇATES numunesinin öğütülebilirliği iki kategoride yapılan deneyler sonucunda değerlendirilmiştir. Birincisi, Bond bilyalı değirmeninde yapılan deneyler sonucunda belirlenen “Bond iş indeksi”dir. İş indeksi, değirmenlerin boyutlandırılmasında enerji tüketimi hesaplamalarında, öğütme devrelerinin verimliliğinin belirlenmesinde kullanılan bir üretim parametresidir. İkincisi ise, Hardgrove cihazı ile yapılan deneyler sonucunda belirlenen “Hardgrove indeksi”dir ve standart bir besleme boyut aralığı ve miktarı ile öğütülebilirliği değerlendirmek için uygulanır.

4.2.1 Bond Öğütülebilirlik Deneyleri

Bond iş indeksini belirlemek için öğütülebilirlik deneyleri aşağıda Şekil 4.1’de görülen Bond bilyalı değirmeninde yapılmıştır.



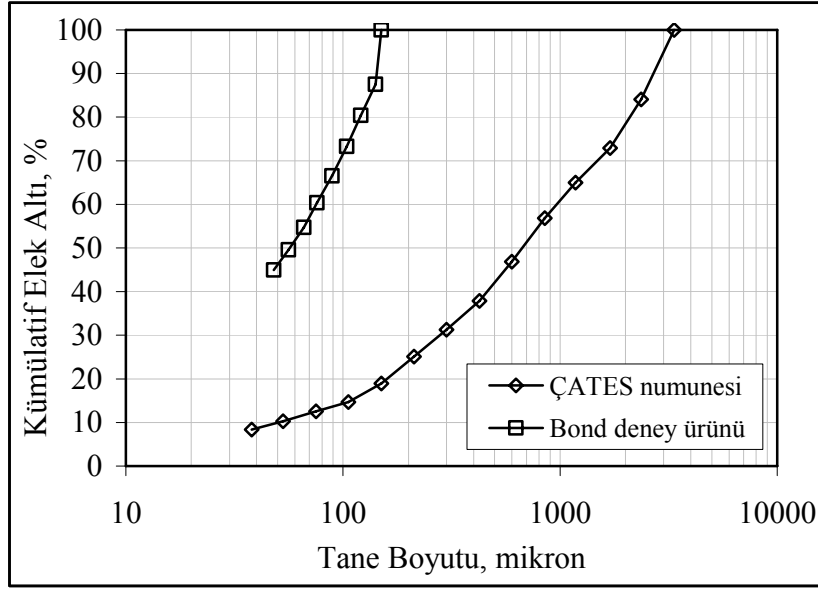
Şekil 4.1 Bond bilyalı değirmen, (a) Gövde-motor-kayış kasnak, (b) Öğütücü bilyalar.

Bilyalı değirmene ait karakteristik özellikler ve öğütücü ortam özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Bond bilyalı değirmen ve öğütücü ortam karakteristik özellikleri.

Değirmen	Çap x Uzunluk, (cm)	30,5 x 30,5				
	Hacım, (cm ³)	22272,5				
	Dönüş hızı, (dev/dk)	70				
Öğütücü Ortam	Bilya çapı, (mm)	36,83	29,72	25,40	19,05	12,70
	Adedi	43	67	10	71	94
	Yoğunluğu, (gr/cm ³)	7,79				
	Toplam kütlesi, (gr)	20125				
	Bilya doldurma oranı, J,	0,1933				

Bond değirmeninde öğütülen ÇATES numunesi boyut dağılımı ve elde edilen bond deney ürününe ait (G_{bp} değerinin sabitlendiği son üç teste ait karışımın) boyut dağılımı Şekil 4.2’de gösterilmiş ve Ek Açıklamalar B’de Çizelge B.1-B.2 ile sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.2 ÇATES numunesi ve Bond deney ürünü elek altı eğrileri.

Bond testleri sonucunda, ÇATES numunesinin Bond iş indeksi 16,93 kWs/t olarak belirlenmiştir. Bond test sonuçları Ek Açıklamalar B’de Çizelge B.3 ile verilmiştir.

4.2.2 Hardgrove Öğütülebilirlik Deneyleri

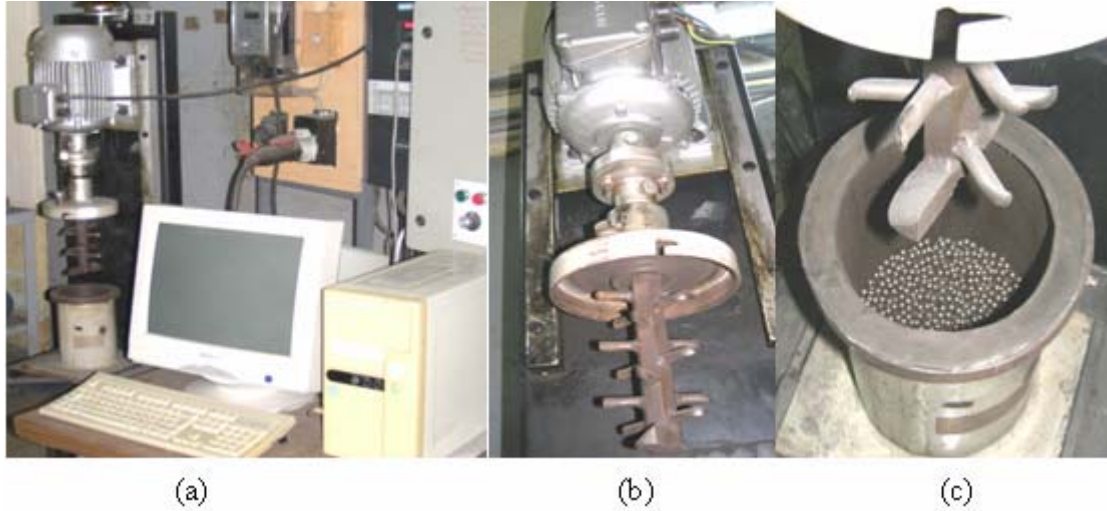
ÇATES numunesinin Hardgrove indeksi(HGI) 77,45 olarak belirlenmiştir. Su vd. (2004) yaptıkları çalışmalarda; Kozlu yöresi kömürlerinin HGI değerlerinin 90–93 arasında ve Üzülmüş yöresi kömürlerinin HGI değerlerinin 77–88 arasında değiştiğini belirlemiştir. Sonuçta; Zonguldak havzası kömürleri için öğütülebilirlik sınıflamasında, HGI değeri 80’den büyük olan kömürleri kolay öğütülebilir, 65–80 arasında olanları orta derecede zor öğütülebilir, 45–65 arasında olanları ise zor ve 45’den küçük olanları ise çok zor öğütülebilir olarak belirtmiştir. Bu noktada, ÇATES numunesinin, Hardgrove indeks değeri göz önüne alındığında orta derecede zor öğütülebilir sınıflamasında olduğu söylenebilir.

4.3 ÖĞÜTME DENEYLERİ

Öğütme deneyleri laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmen ile yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda değişen parametreler altında, ÇATES numunesinin kırılma davranışı incelenerek karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende öğütme kinetiği açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

4.3.1 Laboratuvar Ölçekli Karıştırma Değirmeni ile Yapılan Öğütme Deneyleri

ZKÜ Maden Mühendisliği Bölümü Yakup Keskin Cevher Hazırlama Laboratuvarında bulunan laboratuvar ölçekli karıştırma değirmeni; gövde, AC motor, İnverter ve 486 model PC olmak üzere dört ana ekipmandan oluşmaktadır. Değirmen 2,2 kW'lık güce sahip maksimum devri 1500 dev/dk 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 enerjide ölçülebilmektedir. Aşağıda Şekil 4.3'de laboratuvar ölçekli karıştırma değirmeni bütün ekipmanları (a), karıştırıcı mil ve pinler (b), gövde ve öğütücü bilyalar (c) görülmektedir.



Şekil 4.3 Laboratuvar ölçekli karıştırma değirmeni.

Karıştırma değirmeni gövde hacmi 2945 cm^3 olarak ölçülmüştür. Değirmen karıştırıcı mili ve silindirik karıştırıcı pinlerin hacmi çıkarıldığında etkin değirmen hacmi 2825 cm^3 olarak belirlenmiştir. Karıştırma değirmeninde etkin hacmin yaklaşık % 40'ının söz konusu bilyalar ile doldurulacağı kabul edilerek, bu hacmi dolduracak bilya ağırlıkları ise; 6 mm, 4 mm ve 2,36 mm bilyalar için sırasıyla yaklaşık olarak; 5594 gr, 5693 gr ve 5752 gr olarak tespit edilmiştir. Söz konusu ağırlıklardaki bilyalar ile öğütme yapıldığında kullanılan numune ağırlıkları ise, bilyalar arası boşluğu %90 oranında dolduracak (suyun yer değiştirmesine göre hesaplanmış) şekilde ölçülmüş ve sırasıyla 472 gr, 480 gr ve 485 gr olarak belirlenmiştir.

4.3.1.1 Dar Tane Boyut Gruplarında Hazırlanan Malzemenin 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/dk), öğütme süresi (sn) 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 miktarın sırasıyla %80, %50, %10 ve %5'i oranlarında olacak şekilde seçilmeye çalışılmıştır. Söz konusu bu oranlar, daha önce değişik araştırmacılar (Klimpel and Austin 1970, Austin et al. 1984, Ozkan and Yekeler 2003, Deniz 2004, Fuerstenau et al. 2004, Yue and Klein 2005, İpek et al. 2005, Bilgili et al. 2006) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, kırılma davranışı hızını belirlemede etkili olan sürelerle karşılık gelen değerlerdir.

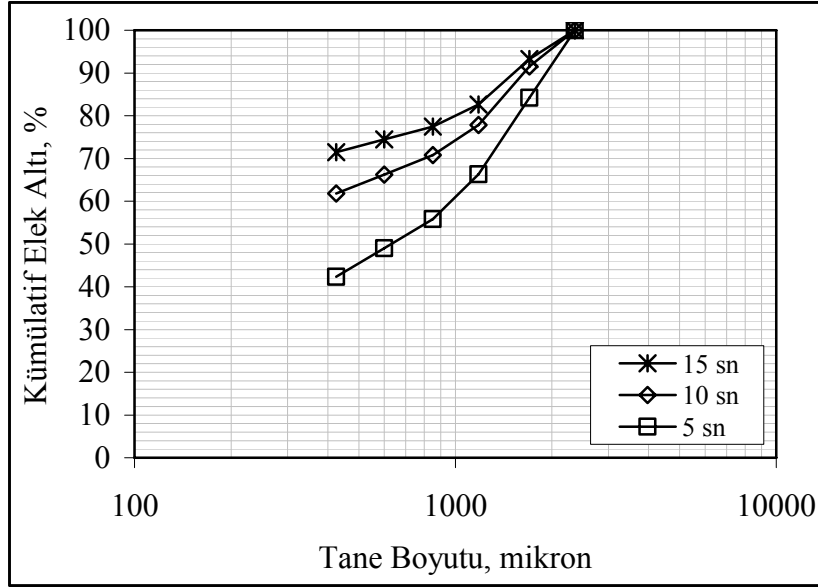
Karıştırma Hızının Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Karıştırma hızının değişimi motor gücü değiştirilerek sağlanmıştır. 1440 dev/dk, 720 dev/dk ve 360 dev/dk olmak üzere 3 farklı karıştırma hızında çalışılmıştır. Karıştırmalı değirmende, %100 motor gücüne karşılık gelen karıştırma dönüş hızı 1440 dev/dak olarak gerçekleşmektedir. 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 koşullarda öğütme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Deney Koşulları:

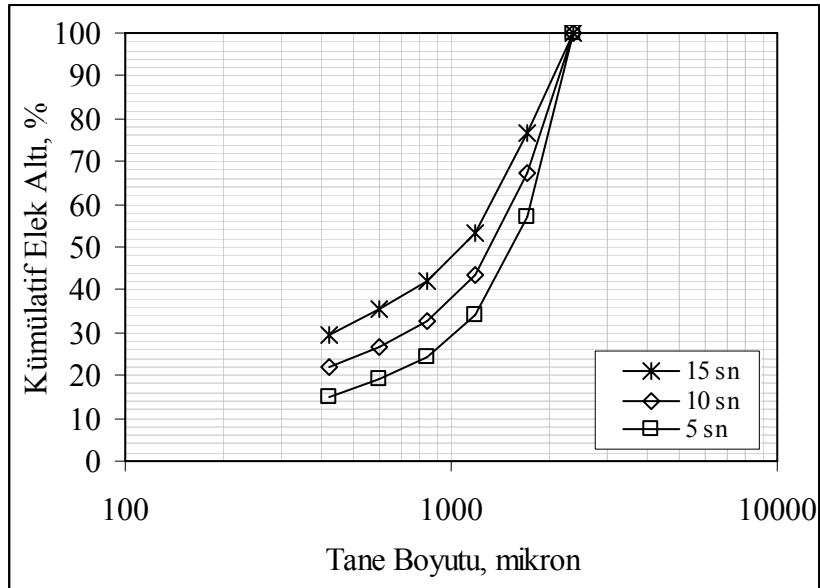
Kullanılan malzeme boyutu	: -2360+1700 μm
1700 μm elek üstü miktarı	: % 91,51
Malzeme miktarı	: 472 gr
Karıştırma hızı	: 1440 dev/dk, 720 dev/dk, 360 dev/dk
Öğütücü ortam çapı	: 6 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 5594 gr
Öğütme süreleri	: 5 sn, 10 sn, 15 sn

Laboratuvar ölçekli karıştırma malı değirmende, ideal karıştırma hızının belirlenmesine yönelik olarak yukarıda verilen koşullarda yapılan deneylerden elde edilen ürünlerin boyut analizleri aşağıda Şekil 4.4-4.6'da sunulmuş ve Ek Açıklamalar C'de Çizelge C.1-C.3 ile sonuçlar verilmiştir.



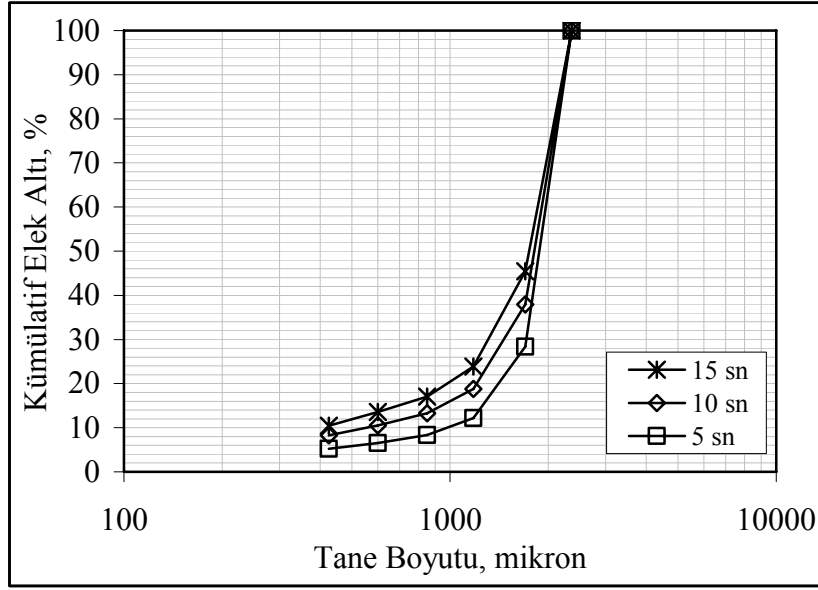
Şekil 4.4 1440 dev/dk karıştırma hızında elek altı eğrileri.

1440 dev/dk karıştırma hızında 15 sn sonunda 18,42 kWs/t enerji çekildiği hesaplanmıştır.



Şekil 4.5 720 dev/dk karıştırma hızında elek altı eğrileri.

720 dev/dk karıştırma hızında 15 sn sonunda 6,84 kWs/t enerji çekildiği hesaplanmıştır.



Şekil 4.6 360 dev/dk karıştırma hızında elek altı eğrileri.

360 dev/dk karıştırma hızında 15 sn sonunda 2,63 kWs/t enerji çekildiği hesaplanmıştır. 1440 ve 720 dev/dk karıştırma hızları, malzemede aşırı boyut küçültme ortaya koymaktadır. Kırılma davranışı belirlemede istenen elek üstü oranları, karıştırma hızı 360 dev/dk'da elde edilmiş ve ilerleyen deneylerde 360 dev/dk karıştırma hızı sabit olarak kullanılmıştır.

Öğütme Süresinin Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

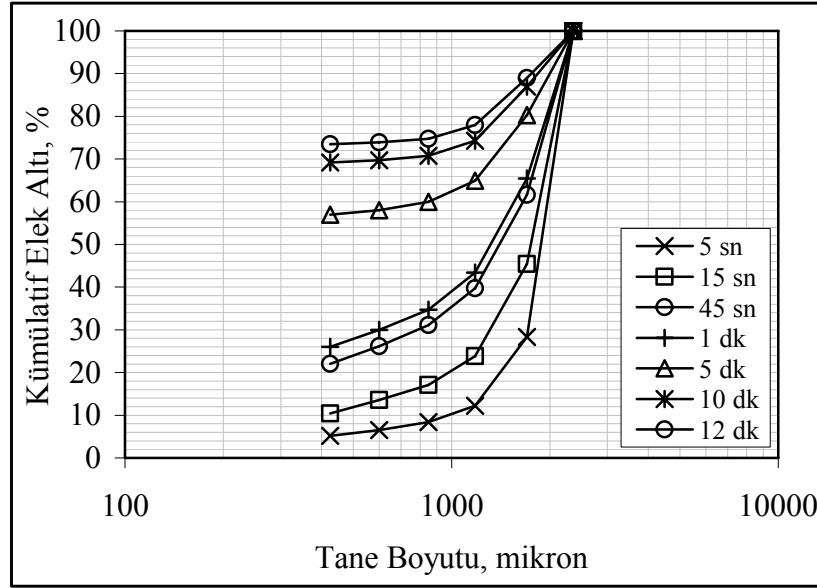
Öğütme süresinin kırılma davranışı üzerindeki etkilerinin incelendiği deneyler, aşağıda verilen deneysel koşullarda, öğütme süresi 5 saniyeden 12 dk'ya kadar geniş bir yelpazede değiştirilerek gerçekleştirilmiştir.

Deney Koşulları:

Kullanılan malzeme boyutu	: -2360+1700 μ m
1700 μ m elek üstü miktarı	: % 91,51
Malzeme miktarı	: 472 gr
Karıştırma hızı	: 360 dev/dk
Öğütücü ortam çapı	: 6 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 5594 gr
Öğütme süreleri	: 5 sn, 10 sn, 15 sn, 25 sn, 35 sn, 45 sn, 1 dk, 1,25 dk, 1,75 dk, 2,5 dk, 3,5 dk, 5 dk, 8 dk, 10 dk, 12 dk.

Her öğütme süresi sonunda elde edilen ürünlerin boyut analizleri yapılmış ve aşağıda Şekil 4.7’de sunulmuş ve Ek Açıklamalar C’de Çizelge C.4 ile sonuçlar verilmiştir.

Şekil 4.7’de öğütme deneylerinde çalışılan tüm sürelerin (15 değişik sürede öğütme deneyleri yapılmıştır) verilmesi görsel karmaşa yaratacağı düşünüldüğü için, çalışılan 7 değişik öğütme süresine karşılık kümülatif elek altı eğrisel gösterimlerinin verilmesi tercih edilmiştir.

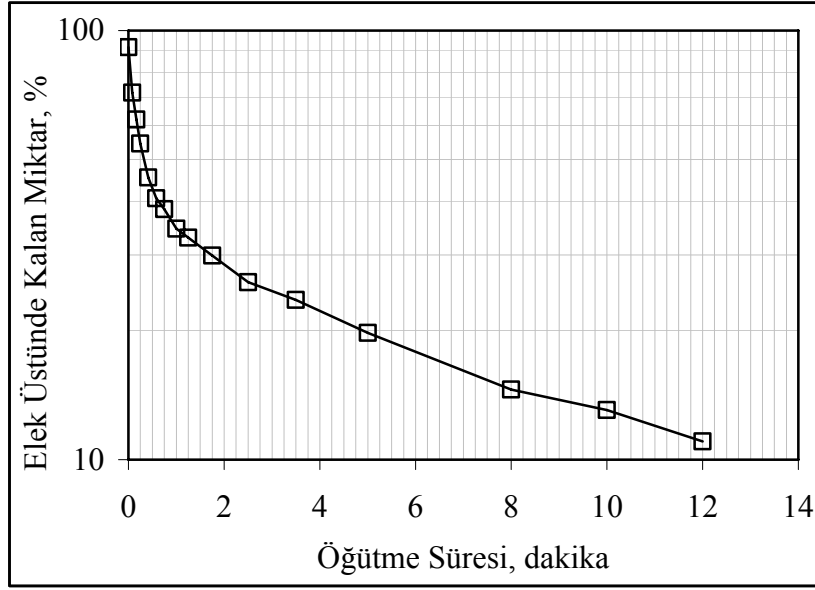


Şekil 4.7 Öğütme süresinin kırılma davranışına etkisinin incelendiği deneylerden alınan ürünlerin elek altı eğrileri.

Sonuç olarak, karıştırmalı değirmende 1700 μm elek üstünde kalan miktarlar olan %80, %50, %10 ve %5’i karşılaması kuvvetle muhtemel 5 sn, 15 sn, 30 sn, 1 dk, 1,5 dk, 2 dk, 4 dk, 8 dk ve 12 dk öğütme sürelerinde deneyler yapılması öngörülmüştür.

Öğütme sürelerinin geniş bir yelpaze içinde seçilmesi, farklı dar tane boyut gruplarında yapılacak öğütmelerde, olası hataların minimumda tutulmasının yanı sıra, bilyalı değirmende yapılan öğütme süreleri ile karşılaştırma sırasında aynı referans sürelerle karşılık öğütme davranışının kıyaslanabilmesine olanak sağlamak içindir.

Çalışılan -2360+1700 μm dar tane boyut grubunda gerçekleşen kırılma davranışını ifade eden eğrisel gösterim Şekil 4.8 ile verilmiştir.



Şekil 4.8 Karıştırmalı değirmende -2360+1700 μm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

-2360+1700 μm dar tane boyut grubu ile yapılan deneyler göstermiştir ki; kırılma davranışı birinci dereceden doğrusal kırılma davranışından yaklaşık olarak 1 dakika öğütme süresi sonrasında uzaklaşmaktadır. Artan öğütme süresine paralel gelişen boyut azalmasındaki artış sonucu oluşan ince malzeme yastıklama etkisi yapmaktadır. Oluşan yastıklama etkisi nedeniyle de iri tanelerin ve öğütücü ortamın üzeri ince öğütülmüş malzeme ile kaplanmakta ve öğütme olumsuz etkilenmektedir. Değirmen içerisinde oluşan söz konusu olumsuzluktan dolayı birinci derece kırılma davranışından sapma meydana gelmektedir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, belirlenen uygun sürelerde ve 360 dev/dk karıştırma hızında, -2360+1700 μm dar tane boyut grubunda öğütmede en uygun öğütücü ortam bilya boyutunun belirlenmesi için, değişen bilya çapları ile öğütme deneyleri yapılmıştır.

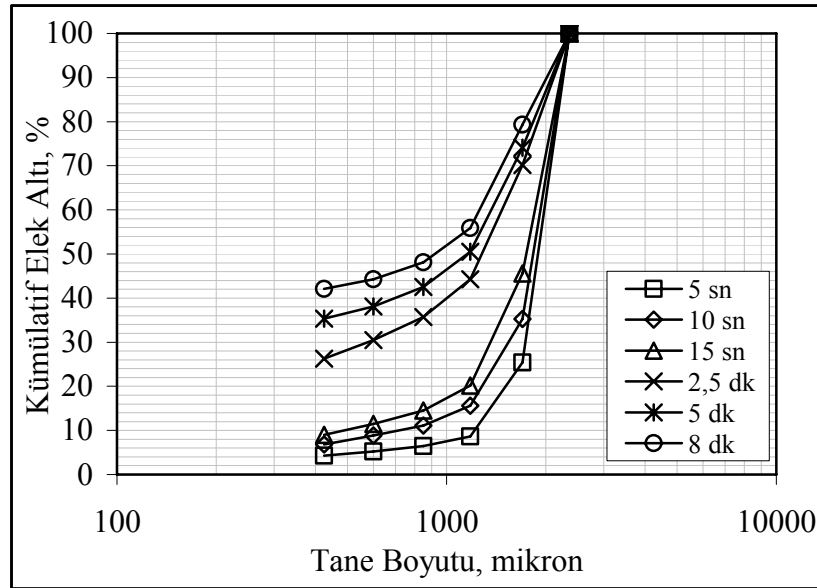
Öğütücü Ortam Boyutunun Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Bundan önce yapılan karıştırma hızının ve öğütme süresinin incelendiği deneylerde 6 mm çaplı bilyalar kullanılmış ve ÇATES numunesinin kırılma davranışı belirlenmişti. Öğütücü ortam boyutunun kırılma davranışına etkisini incelemek üzere yapılan deneylerde öğütücü ortam olarak 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.

Karıştırmalı değirmende, öğütücü ortam boyutunun etkilerini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalar 4 mm boyutlu bilya için aşağıda belirtilen deneysel koşullarda gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 4.9'da sunulmuş ve Ek Açıklamalar C'de Çizelge C.5 ile verilmiştir.

Deney Koşulları:

Kullanılan malzeme boyutu	: -2360+1700 μm
1700 μm elek üstü miktarı	: % 91,51
Malzeme miktarı	: 480 gr
Karıştırma hızı	: 360 dev/dk
Öğütücü ortam çapı	: 4 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 5693 gr
Öğütme süreleri	: 5 sn, 10 sn, 15 sn, 2,5 dk, 5 dk, 8 dk.

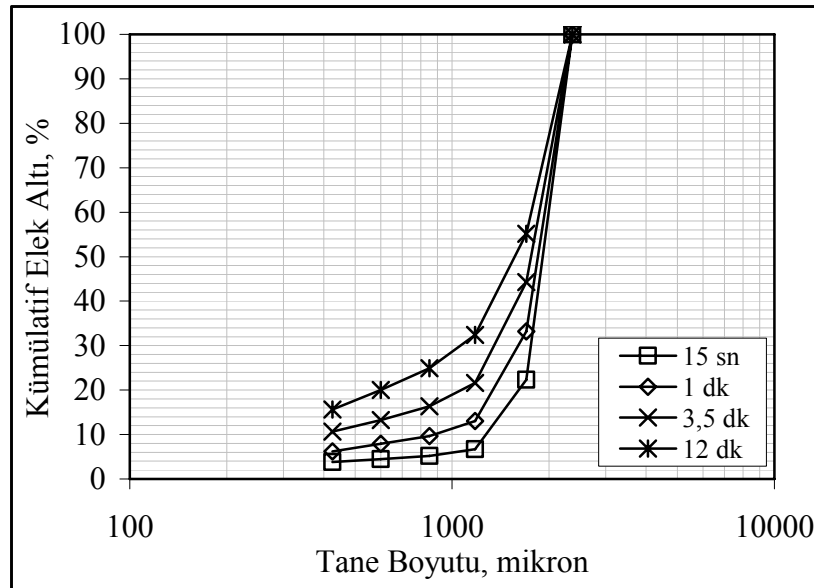


Şekil 4.9 4 mm boyutlu bilya ile yapılan deneylerden alınan ürünlerin elek altı eğrileri.

Karıştırmalı değirmende, öğütücü ortam boyutunun etkilerini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalar 2,36 mm boyutlu bilya için aşağıda belirtilen deneysel koşullarda gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.10 ile gösterilmiş ve Ek Açıklamalar C'de Çizelge C6 ile verilmiştir.

Deney Koşulları:

Kullanılan malzeme boyutu	: -2360+1700 μm
1700 μm elek üstü miktarı	: % 91,51
Malzeme miktarı	: 485 gr
Karıştırma hızı	: 360 dev/dk
Öğütücü ortam çapı	: 2,36 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 5752 gr
Öğütme süreleri	: 15 sn, 1 dk, 3,5 dk, 12 dk.



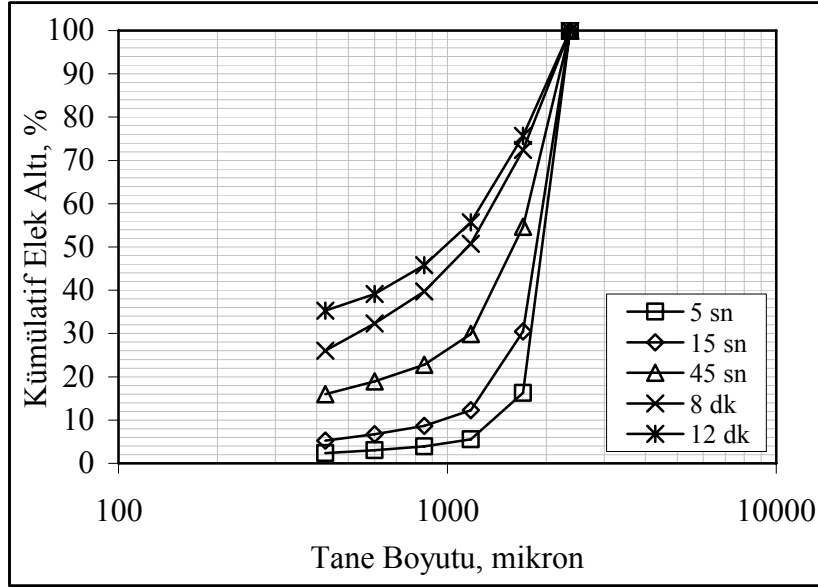
Şekil 4.10 2,36 mm boyutlu bilya ile yapılan deneylerden alınan ürünlerin elek altı eğrileri.

2,36-4-6 mm çaplı bilyaların ağırlıkça 1/3 oranında karışımli öğütücü ortam ile karıştırmalı değirmen öğütme deneylerine aşağıda verilen deneysel koşullarda devam edilmiştir.

Deney Koşulları:

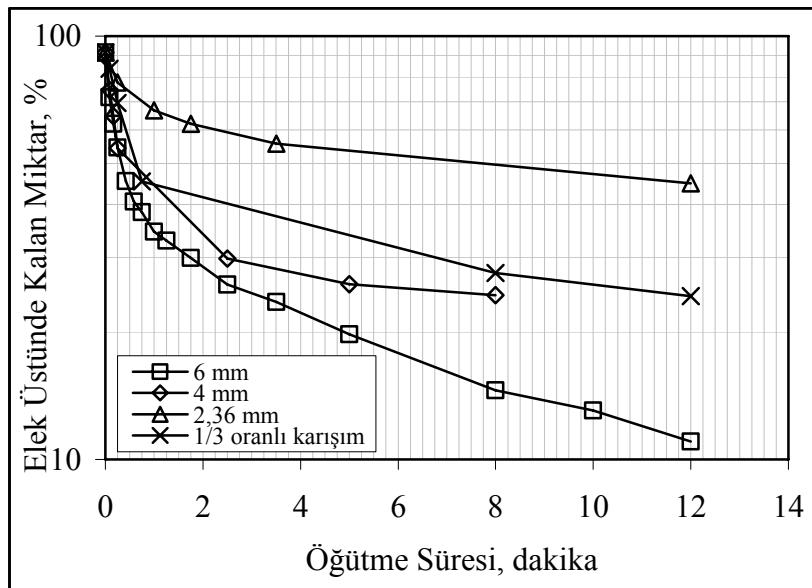
Kullanılan malzeme boyutu	: -2360+1700 μm
1700 μm elek üstü miktarı	: % 91,51
Malzeme miktarı	: 479 gr
Karıştırma hızı	: 360 dev/dk
Öğütücü ortam çapı	: 2,36 mm, 4 mm ve 6 mm bilya karışımı (ağırlıkça 1/3)
Öğütücü ortam miktarı	: 5680 gr
Öğütme süreleri	: 5 sn, 15 sn, 45 sn, 8 dk, 12 dk.

Öğütme deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.11’de sunulmuş ve Ek Açıklamalar C’de Çizelge C.7 ile verilmiştir.



Şekil 4.11 1/3 ağırlıksal oranlı bilya karışımları (2,36-4-6 mm) ile yapılan deneylerden alınan ürünlerin elek altı eğrileri.

Bilya karışımlarının kullanılması ile 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 karışımlarından daha hızlı gerçekleştiği sonucuna varılmış ve sonuçlar aşağıda Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 Farklı boyutlu bilyalar ile yapılan öğütme deneylerinde kırılma davranışları.

Kırılma hızının bilya boyutu küçüldükçe düşme eğiliminde olduğu açıktır. 1/3 ağırlıksal oranlı bilya karışımları ile yapılan öğütme ile elde edilen kırılma 2,36 mm boyutlu bilyaya kıyasla hızlı gerçekleşmekle birlikte, diğer bilya çaplarına kıyasla düşük kalmaktadır. Karıştırmalı değirmende yapılan deneyler sonucunda, çalışılan dar tane boyut grubu için kırılma davranışının en hızlı gerçekleştiği çalışma parametreleri; 360 dev/dk karıştırma hızı ve 6 mm bilya boyutu olarak belirlenmiştir.

Tane Boyutunun Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

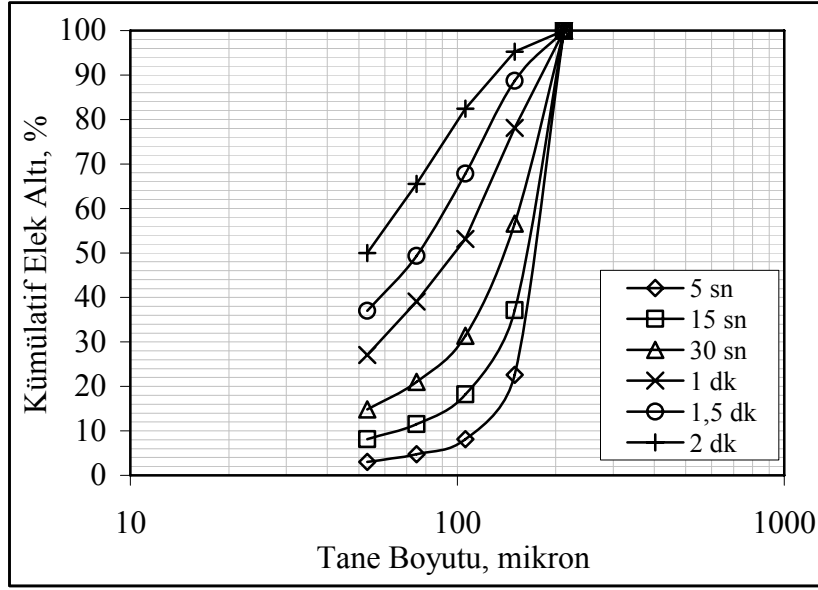
Karıştırmalı değirmende, farklı boyut gruplarında sınıflandırılmış ÇATES numunesi ile belirlenen ideal çalışma parametreleri (360 dev/dk karıştırma hızı ve 6 mm bilya boyutu) ile öğütme deneyleri yapılarak tane boyutunun kırılma davranışı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Tane boyutunun kırılma davranışı üzerindeki etkisini incelemek için hazırlanan -212+150 μm , -425+300 μm , -1180+850 μm ve -3350+2360 μm dar tane boyut gruplarındaki malzemeler ile çalışılmıştır. Sonuçta; daha önce deneysel çalışmalarda kullanılan -2360+1700 μm dar tane boyut grubunda elde edilen sonuçlarla birlikte söz konusu boyut gruplarında, tane boyutunun kırılma davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalara, -212+150 μm dar tane boyut grubu ile yapılan çalışmalar ile başlanmıştır.

-212+150 μm Dar Tane Boyut Grubu ile Yapılan Öğütme Deneyleri

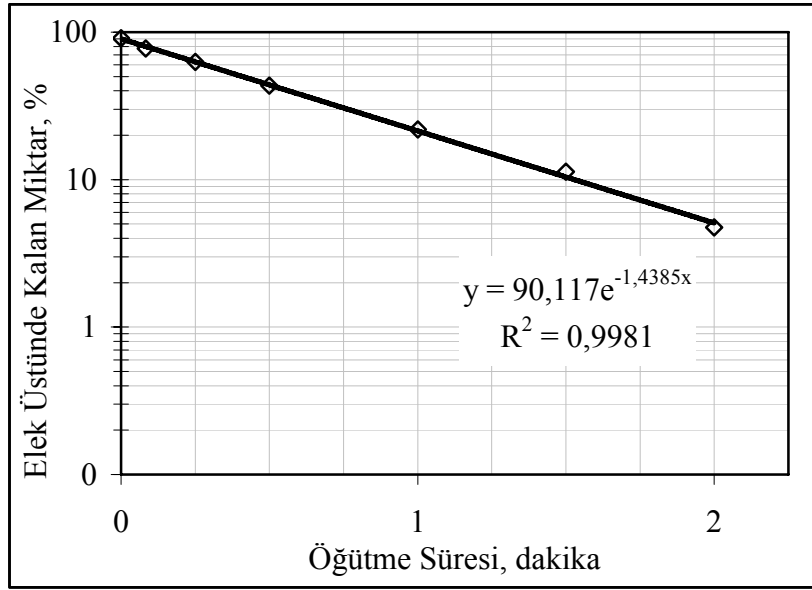
-212+150 μm boyutlu ÇATES numunesi ile aşağıdaki çalışma koşullarında yapılan öğütmeler sonunda, alınan ürünlerin boyut dağılımları ve kırılma davranışları belirlenmiştir. Sonuçlar, Şekil 4.13-4.14 ile gösterilmiş ve Ek Açıklamalar C'de Çizelge C.8 ile verilmiştir.

Deney Koşulları:

150 μm elek üstü miktarı	: % 90,8
Malzeme miktarı	: 472 gr
Karıştırma hızı	: 360 dev/dk
Öğütücü ortam bilya çapı	: 6 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 5594 gr
Öğütme süreleri	: 5 sn, 15 sn, 30 sn, 1 dk, 1,5 dk, 2 dk.



Şekil 4.13 Karıştırmalı değirmende -212+150 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri.



Şekil 4.14 Karıştırmalı değirmende -212+150 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

Şekil 4.14'den görüldüğü üzere, -212+150 µm dar tane boyut grubu için kırılma davranışı birinci derece doğrusal formda gerçekleşmiştir. Karıştırmalı değirmende -2360+1700 µm dar tane boyut grubunda yapılmış olan öğütme deneylerinde karşılaşılan doğrusal kırılma davranışından sapma -212+150 µm dar tane boyut grubu için söz konusu değildir. Bu noktada değişen dar tane boyut gruplarında öğütme çalışmalarına devam edilmiştir.

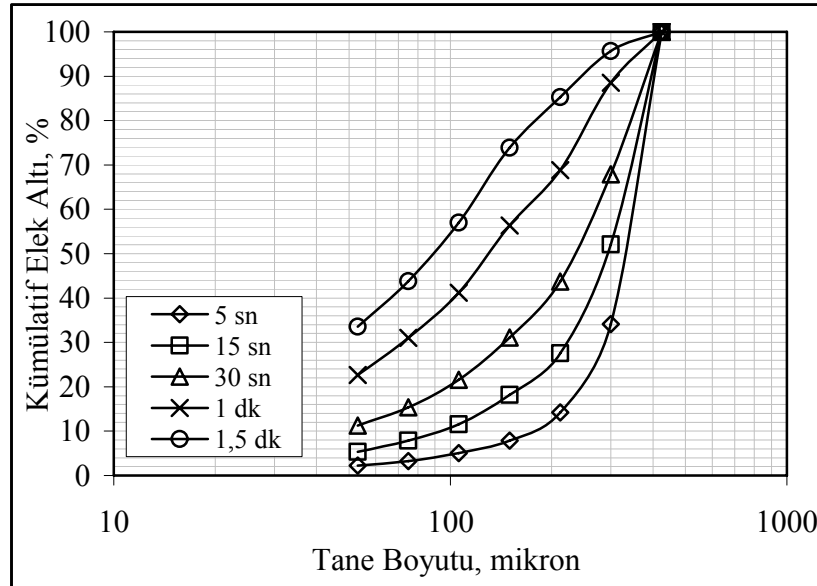
-425+300 μm Dar Tane Boyut Grubu ile Yapılan Öğütme Deneyleri

-425+300 μm boyutlu ÇATES numunesi ile aşağıdaki çalışma koşullarında yapılan öğütmeler sonunda, alınan ürünlerin boyut dağılımları ve kırılma davranışları belirlenmiştir.

Şekil 4.15 ile aşağıda belirtilen deneysel koşullarda yapılan öğütme çalışmalarına ait kümülatif elek altı eğrileri sunulmuş ve Ek Açıklamalar C’de Çizelge C.9 ile sonuçlar verilmiştir.

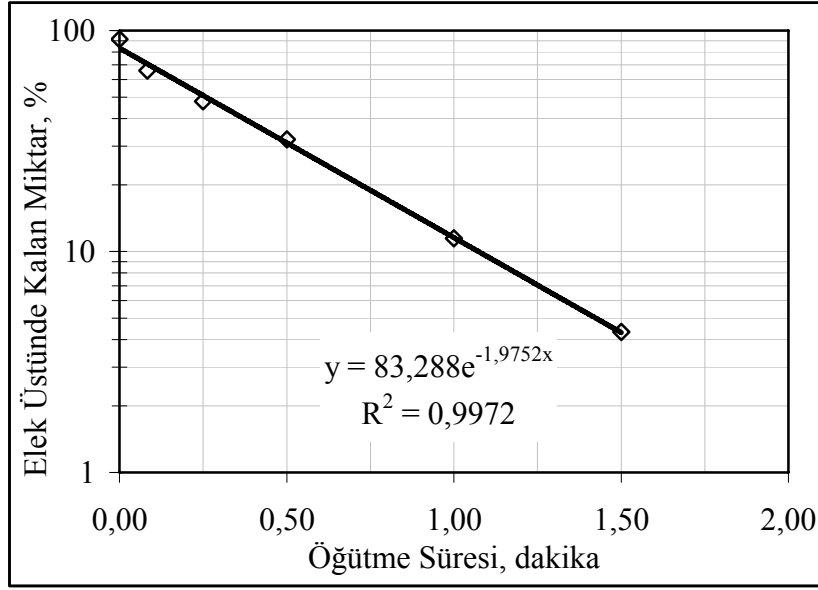
Deney Koşulları:

300 μm elek üstü miktarı	: % 91,5
Malzeme miktarı	: 472 gr
Karıştırma hızı	: 360 dev/dk
Öğütücü ortam bilya çapı	: 6 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 5594 gr
Öğütme süreleri	: 5 sn, 15 sn, 30 sn, 1 dk, 1,5 dk.



Şekil 4.15 Karıştırmalı değirmende -425+300 μm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri.

-425+300 μm dar tane boyut grubu için kırılma davranışı aşağıda Şekil 4.16’da sunulmuştur. Kırılma davranışının birinci derece doğrusal formda gerçekleşmiş olduğu görülmektedir.



Şekil 4.16 Karıştırmalı değirmende -425+300 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

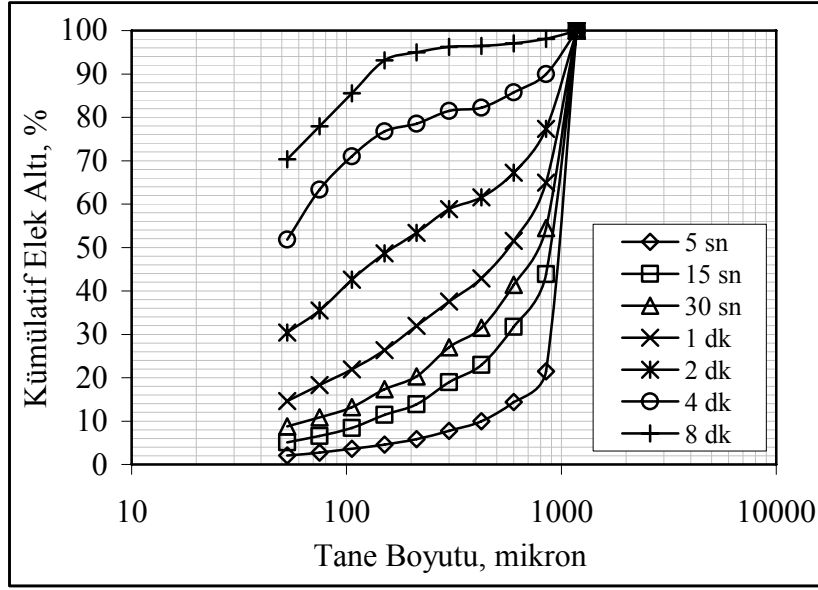
-425+300 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranış hızının, -212+150 µm dar tane boyut grubunda gerçekleşmiş olandan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu noktada, -1180+850 µm dar tane boyut grubunda yapılacak öğütme çalışmaları ile -2360+1700 µm dar tane boyut grubunda gerçekleşen kırılma davranışındaki sapmanın başlayıp başlamayacağı araştırılmıştır.

-1180+850 µm Dar Tane Boyut Grubu ile Yapılan Öğütme Deneyleri

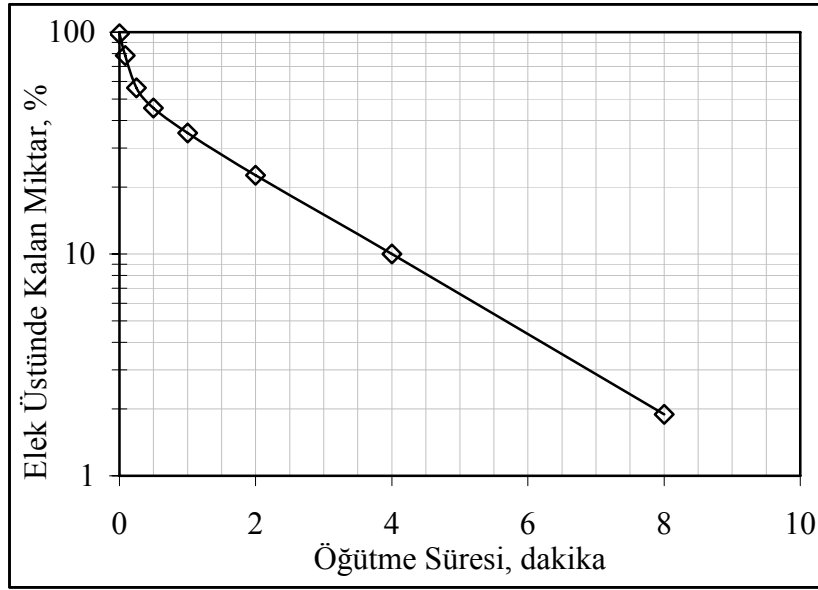
-1180+850 µm boyutlu ÇATES numunesi ile aşağıdaki çalışma koşullarında yapılan öğütmeler sonunda, alınan ürünlerin boyut dağılımları ve kırılma davranışları belirlenmiştir. Sonuçlar, Şekil 4.17-4.18 ile gösterilmiş ve Ek Açıklamalar C’de Çizelge C.10 ile verilmiştir.

Deney Koşulları:

850 µm elek üstü miktarı	: % 98,5
Malzeme miktarı	: 472 gr
Karıştırma hızı	: 360 dev/dk
Öğütücü ortam bilya çapı	: 6 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 5594 gr
Öğütme süreleri	: 5 sn, 15 sn, 30 sn, 1 dk, 2 dk, 4dk, 8 dk.



Şekil 4.17 Karıştırmalı değirmende -1180+850 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri.



Şekil 4.18 Karıştırmalı değirmende -1180+850 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

-1180+850 µm dar tane boyut grubu için kırılma davranışı birinci derece doğrusal formdan kısmen uzaklaşmış olarak gerçekleşmiştir. Bu noktada, -2360+1700 µm dar tane boyut grubunda da doğrusal olmayan kırılma davranışı gözlemlendiğinden hareketle, tane boyutu büyüdükçe kırılma davranışında doğrusallıktan sapma söz konusudur denebilir. Bu amaçla, -3350+2360 µm dar tane boyut grubunda deneysel çalışmalara, aşağıda belirtilen koşullarda devam edilmiştir.

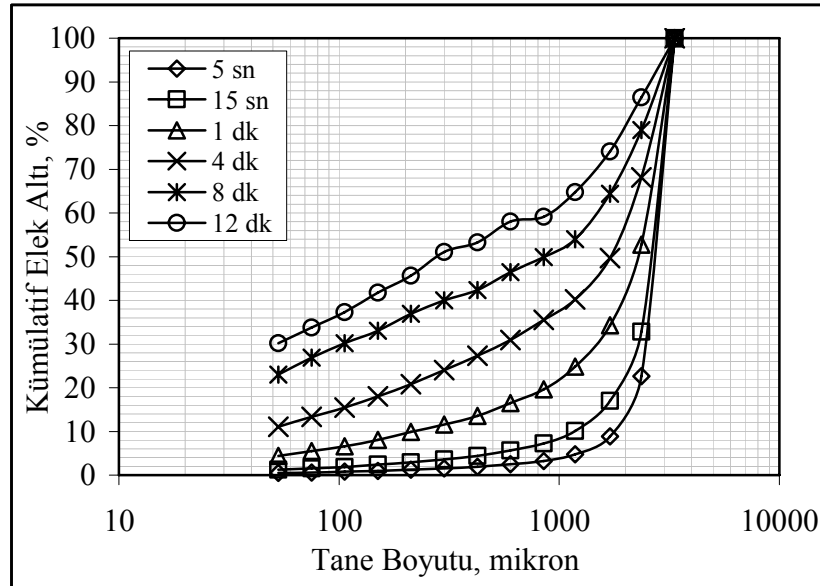
-3350+2360 μm dar tane boyut grubu ile Yapılan Öğütme Deneyleri

-3350+2360 μm boyutlu ÇATES numunesi ile aşağıdaki çalışma koşullarında yapılan öğütmeler sonunda, alınan ürünlerin boyut dağılımları ve kırılma davranışları belirlenmiştir.

Şekil 4.19 ile aşağıda belirtilen deneysel koşullarda yapılan öğütme çalışmalarına ait kümülatif elek altı eğrileri sunulmuş ve Ek Açıklamalar C’de Çizelge C.11 ile sonuçlar verilmiştir.

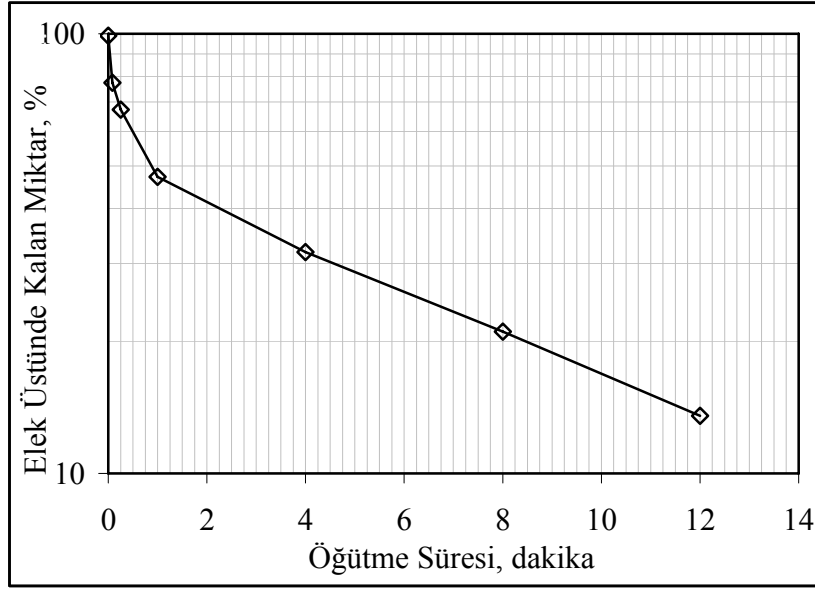
Deney Koşulları:

2360 μm elek üstü miktarı	: % 99,00
Malzeme miktarı	: 472 gr
Karıştırma hızı	: 360 dev/dk
Öğütücü ortam bilya çapı	: 6 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 5594 gr
Öğütme süreleri	: 5 sn, 15 sn, 1 dk, 4 dk, 8 dk, 12 dk.



Şekil 4.19 Karıştırmalı değirmende -3350+2360 μm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri.

-3350+2360 μm dar tane boyut grubunda gerçekleşen kırılma davranışı ise Şekil 4.20’de sunulmuştur.

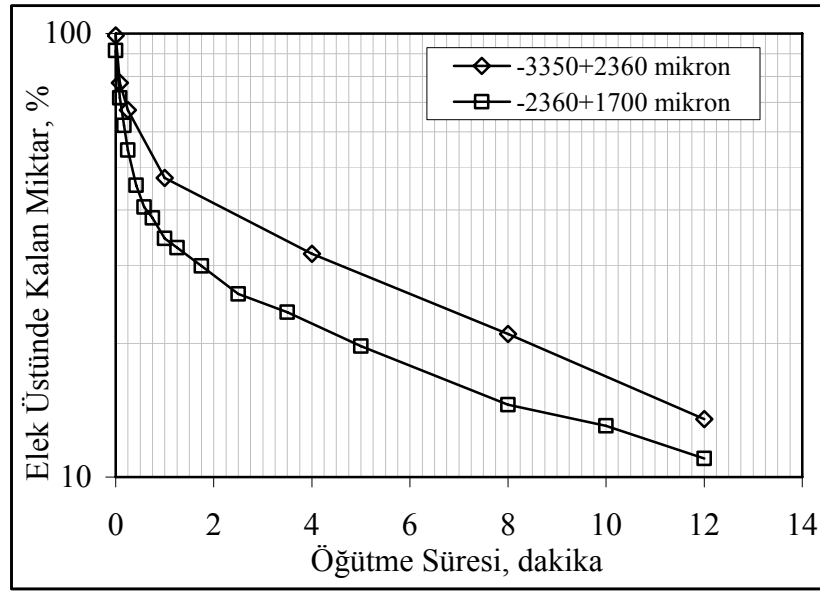


Şekil 4.20 Karıştırmalı değirmende -3350+2360 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

-3350+2360 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı yaklaşık 1 dakika sonrasında birinci derece doğrusal kırılma hızı davranışından sapmaktadır.

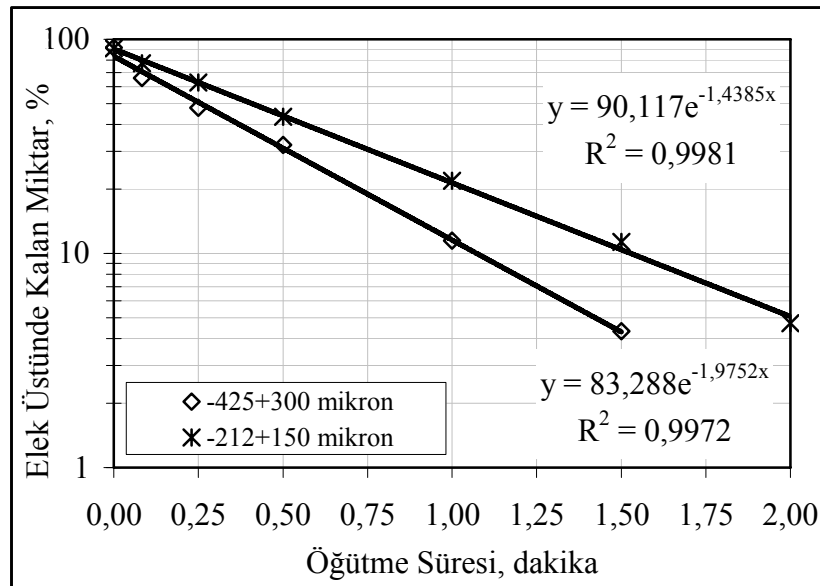
Tane boyutunun kırılma davranışına etkisinin incelenmesi amacı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara dayanarak, öğütme deneylerinde çalışılan dar tane boyut gruplarındaki kırılma davranışlarının karşılaştırması aşağıda yapılmıştır. Karşılaştırma yapılırken, nispeten iri boyutlu olarak değerlendirilen -3350+2360 µm ve -2360+1700 µm dar tane boyut grupları kendi içinde değerlendirilmiş, -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut grupları ise nispeten ince boyut grupları olarak kabul edilmiş ve kendi içlerinde karşılaştırılmıştır. -1180+850 µm dar tane boyut grubu ise iri ve ince arasında geçiş boyutu olarak kabul edilmiştir.

-3350+2360 µm dar tane boyut grubu ve -2360+1700 µm dar tane boyut grubunda sınıflandırılmış olan ÇATES numunesinin, karıştırmalı değirmende değişen sürelerde öğütülmesi sonrasında gerçekleşen kırılma davranışlarının yapılabilmesi için öğütme sürelerine karşılık elekt üstünde kalan miktarlar grafik olarak çizilmiştir. Söz konusu kırılma davranışı eğrileri karşılaştırmalı olarak aşağıda Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21 Karıştırmalı değirmende -3350+2360 µm ve -2360+1700 µm dar tane boyut gruplarında kırılma davranışları.

Her iki dar tane boyut grubu için de, yaklaşık 1 dakika sonrasında kırılma davranışı doğrusallıktan sapmıştır. -2360+1700 µm dar tane boyut aralığında gerçekleşen kırılma, -3350+2360 µm dar tane boyut aralığında gerçekleşene kıyasla daha hızlıdır. -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında yapılan öğütme deneyleri sonucu gerçekleşen kırılma davranışlarının karşılaştırmalı olarak gösterimi Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22 Karıştırmalı değirmende -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında kırılma davranışları.

Öğütme testleri, kırılma davranışının birinci dereceden doğrusal formda ve tane boyutu küçüldükçe kırılma hızının yavaşladığını göstermiştir. -425+300 μm dar tane boyut aralığında özgül kırılma hızı (S_i) 1,9752 iken, -212+150 μm dar tane boyut aralığında özgül kırılma hızı (S_i) 1,4385 olarak gerçekleşmiştir. -1180+850 μm dar tane boyut grubu için kırılma davranışı birinci derece doğrusal formdan kısmen uzak gerçekleşmiş olmakla birlikte, kırılma davranış hızı, -425+300 μm ve -212+150 μm dar tane boyut gruplarında gerçekleşenlerden yavaş, -3350+2360 μm ve -2360+1700 μm dar tane boyut gruplarında gerçekleşenlerden ise hızlıdır.

4.3.2 Laboratuvar Ölçekli Bilyalı Değirmen ile Yapılan Öğütme Deneyleri

Bilyalı değirmende öğütme deneylerinde kullanılan malzeme ağırlığı, Bölüm 3.3.5.'de (Kırılma Hızının Bilya ve Malzeme Doldurma Oranı ile Değişimi) anlatıldığı gibi Austin vd.'ne göre (1984) hesaplanmış olup, 1648 gr olarak belirlenmiştir. Aşağıda Çizelge 4.3'de hesaplanan malzeme özellikleri verilmektedir.

Çizelge 4.3 Bilyalı değirmen deneylerinde kullanılan malzeme özellikleri.

Malzeme cinsi	Termik santral katı fosil yakıtı
Malzeme Yoğunluğu, (gr/cm^3)	1,8
Malzeme Miktarı, (gr)	1648
Malzeme doldurma oranı, f_c	0,07
Malzeme-bilya doldurma oranı, U	0,9

4.3.2.1 Dar Tane Boyut Gruplarında Hazırlanan Malzemenin Kırılma Davranışının Belirlenmesi

Hazırlanan -3350+2360 μm , -2360+1700 μm , -1180+850 μm , -425+300 μm ve -212+150 μm dar tane boyut gruplarında ÇATES numunesi deneylerde kullanılmış ve kırılma davranışları incelenmiştir. Yaklaşık olarak her bir öğütme periyodu sonunda en üst tane boyutu eleğinin üstünde kalan miktarın sırasıyla %80, %50, %10 ve %5' i oranlarında olan öğütme süreleri belirlenmiştir. Karıştırmalı değirmende belirlenen öğütme süreleri olan 0,25 dk, 0,50 dk, 1 dk, 2 dk, 4 dk, 8 dk ve 12 dk deneysel sonuçların kıyasını yapabilmek için bilyalı değirmende de kullanılmıştır.

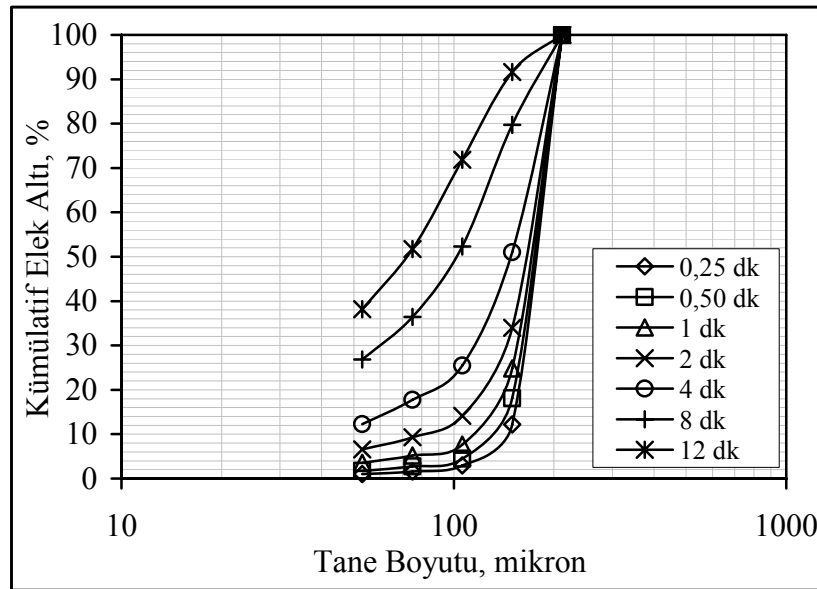
-212+150 μm Dar Tane Boyut Grubu ile Yapılan Öğütme Deneyleri

-212+150 μm boyutlu ÇATES numunesi ile aşağıdaki çalışma koşullarında yapılan öğütmeler sonunda, alınan ürünlerin boyut dağılımları ve kırılma davranışları belirlenmiştir.

Deney Koşulları:

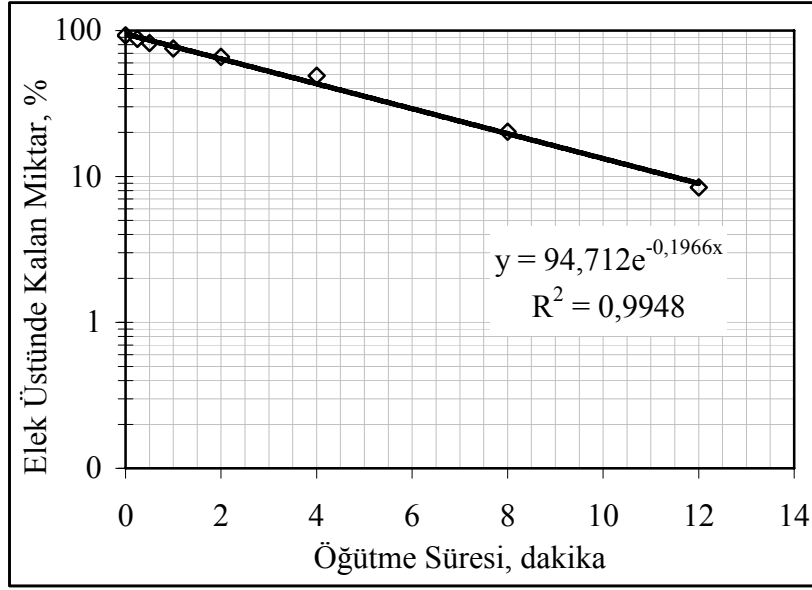
150 μm elek üstü miktarı	: % 92,80
Malzeme miktarı	: 1648 gr
Değirmen dönüş hızı	: 70 dev/dk
Öğütücü ortam bilya çapları	: 36,83, 29,72, 25,40, 19,05, 12,70 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 20125 gr
Bilya doldurma oranı, J,	: 0,1933
Öğütme süreleri	: 0,25 dk, 0,50 dk, 1 dk, 2 dk, 4 dk, 8 dk, 12 dk.

Şekil 4.23 ile öğütme çalışmalarına ait kümülatif elek altı eğrileri sunulmuş ve Ek Açıklamalar D’de Çizelge D.1 ile sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.23 Bilyalı değirmende -212+150 μm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri.

-212+150 μm dar tane boyut grubu için kırılma davranışı Şekil 4.24’de sunulmuştur.



Şekil 4.24 Bilyalı değirmende -212+150 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

-212+150 µm dar tane grubunda gerçekleşen kırılma davranışı birinci derece doğrusal formdadır.

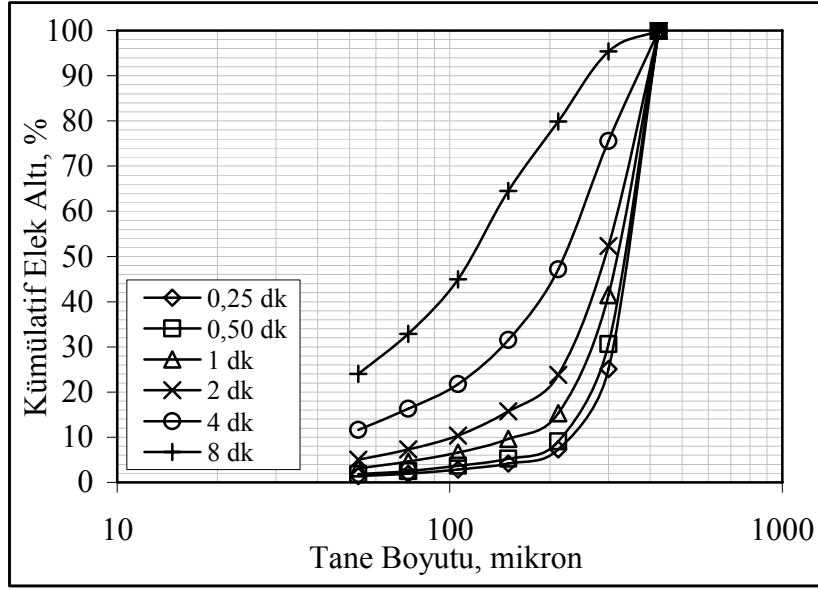
-425+300 µm Dar Tane Boyut Grubu ile Yapılan Öğütme Deneyleri

-425+300 µm boyutlu ÇATES numunesi ile aşağıdaki çalışma koşullarında yapılan öğütmeler sonunda, alınan ürünlerin boyut dağılımları ve kırılma davranışları belirlenmiştir.

Deney Koşulları:

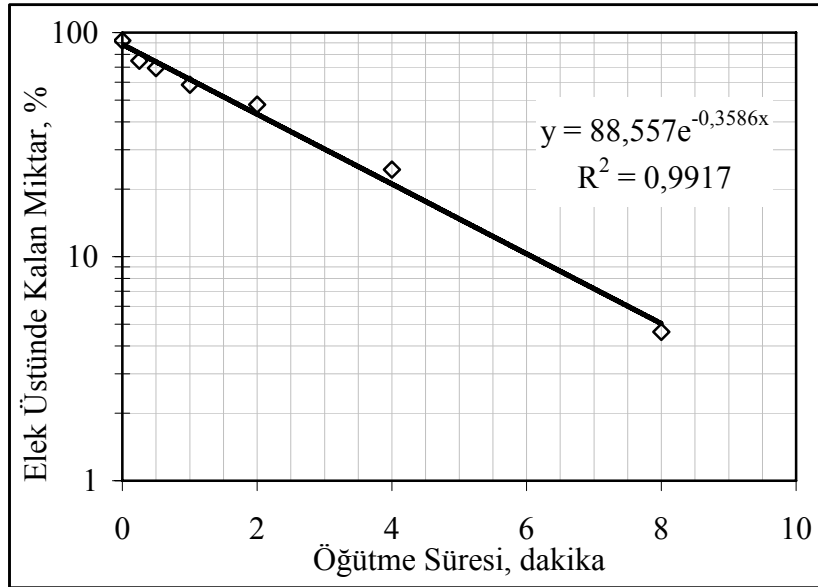
300 µm elek üstü miktarı	: % 93,00
Malzeme miktarı	: 1648 gr
Değirmen dönüş hızı	: 70 dev/dk
Öğütücü ortam bilya çapları	: 36,83, 29,72, 25,40, 19,05, 12,70 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 20125 gr
Bilya doldurma oranı, J,	: 0,1933
Öğütme süreleri	: 0,25 dk, 0,50 dk, 1 dk, 2 dk, 4 dk, 8 dk.

Şekil 4.25 ile öğütme çalışmalarına ait kümülatif elek altı eğrileri sunulmuş ve Ek Açıklamalar D’de Çizelge D.2 ile sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.25 Bilyalı değirmende -425+300 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri.

-425+300 µm dar tane boyut grubu için kırılma davranışı Şekil 4.26’da sunulmuştur.



Şekil 4.26 Bilyalı değirmende -425+300 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

-425+300 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışı birinci derece doğrusal formda gerçekleşmiştir. -425+300 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranış hızının, -212+150 µm dar tane boyut grubunda gerçekleşmiş olandan daha yüksek olduğu görülmüştür.

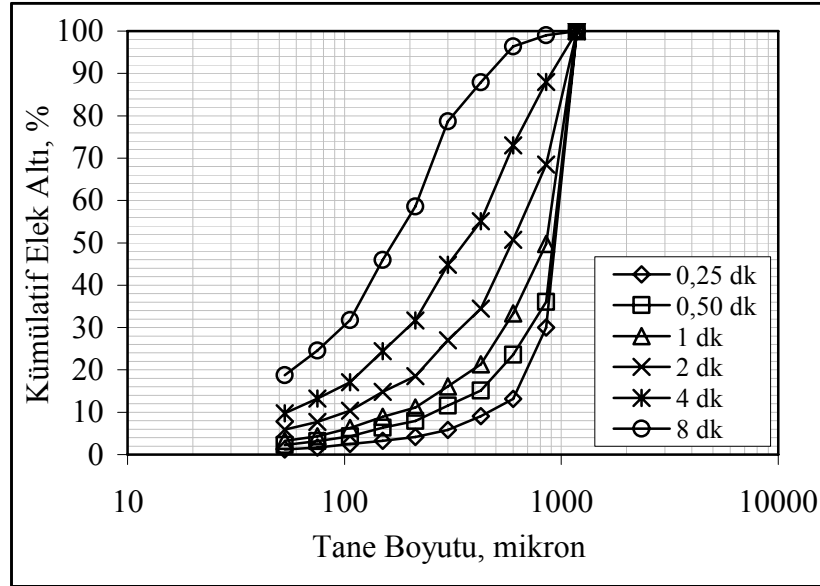
-1180+850 μm Dar Tane Boyut Grubu ile Yapılan Öğütme Deneyleri

-1180+850 μm boyutlu ÇATES numunesi ile aşağıdaki çalışma koşullarında yapılan öğütmeler sonunda, alınan ürünlerin boyut dağılımları ve kırılma davranışları belirlenmiştir.

Deney Koşulları:

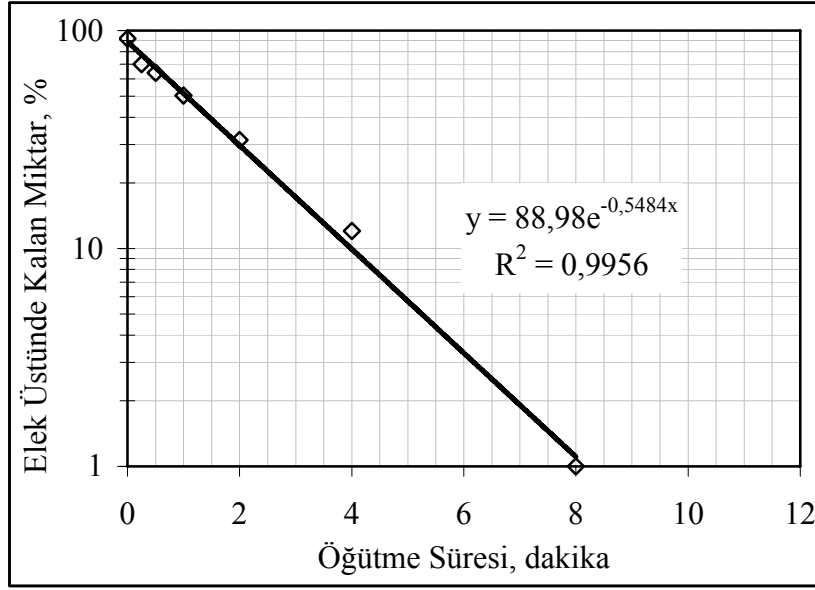
850 μm elek üstü miktarı	: % 91,90
Malzeme miktarı	: 1648 gr
Değirmen dönüş hızı	: 70 dev/dk
Öğütücü ortam bilya çapları	: 36,83, 29,72, 25,40, 19,05, 12,70 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 20125 gr
Bilya doldurma oranı, J,	: 0,1933
Öğütme süreleri	: 0,25 dk, 0,50 dk, 1 dk, 2 dk, 4 dk, 8 dk.

Şekil 4.27 ile öğütme çalışmalarına ait kümülatif elek altı eğrileri sunulmuş ve Ek Açıklamalar D’de Çizelge D.3 ile sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.27 Bilyalı değirmende -1180+850 μm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri.

-1180+850 μm dar tane boyut grubu için kırılma davranışı Şekil 4.28’de sunulmuştur.



Şekil 4.28 Bilyalı değirmende -1180+850 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

-1180+850 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışı birinci derece doğrusal formda gerçekleşmiştir.

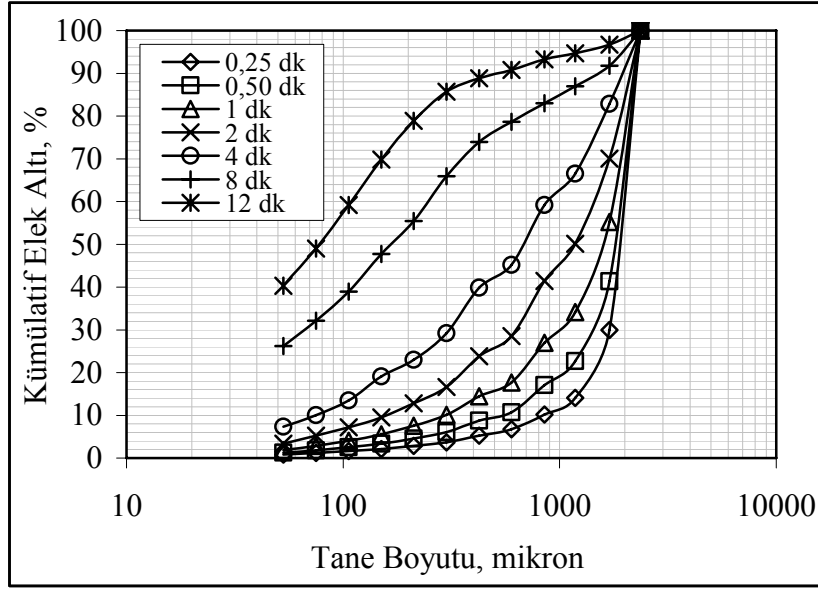
-2360+1700 µm Dar Tane Boyut Grubu ile Yapılan Öğütme Deneyleri

-2360+1700 µm boyutlu ÇATES numunesi ile aşağıdaki çalışma koşullarında yapılan öğütmeler sonunda, alınan ürünlerin boyut dağılımları ve kırılma davranışları belirlenmiştir.

Deney Koşulları:

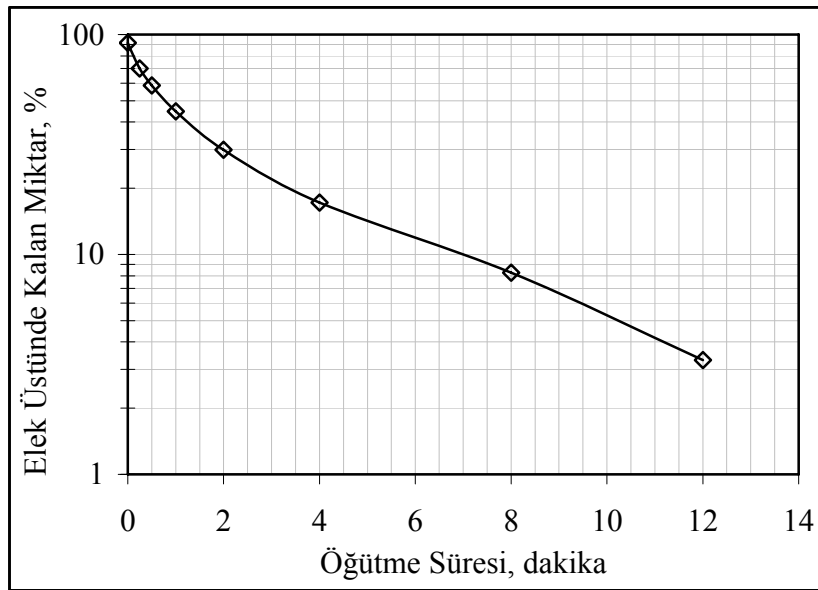
1700 µm elek üstü miktarı	: % 91,51
Malzeme miktarı	: 1648 gr
Değirmen dönüş hızı	: 70 dev/dk.
Öğütücü ortam bilya çapları	: 36,83, 29,72, 25,40, 19,05, 12,70 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 20125 gr
Bilya doldurma oranı, J,	: 0,1933
Öğütme süreleri	: 0,25 dk, 0,50 dk, 1 dk, 2 dk, 4 dk, 8 dk, 12 dk.

Şekil 4.29 ile öğütme çalışmalarına ait kümülatif elek altı eğrileri sunulmuş ve Ek Açıklamalar D’de Çizelge D.4 ile sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.29 Bilyalı değirmende -2360+1700 µm dar tane boyut grubu elek altı eğrisel gösterimleri.

-2360+1700 µm dar tane boyut grubu için kırılma davranışı Şekil 4.30’da sunulmuştur.



Şekil 4.30 Bilyalı değirmende -2360+1700 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

Şekil 4.30 incelendiğinde; 2360+1700 µm dar tane boyut grubunda gerçekleşen kırılma davranışının -212+150 µm, -425+300 µm ve -1180+850 µm dar tane boyut gruplarında gerçekleşen birinci derece doğrusal kırılma davranışı formundan yaklaşık 2 dakika öğütme süresi sonrasında uzaklaştığı görülmektedir.

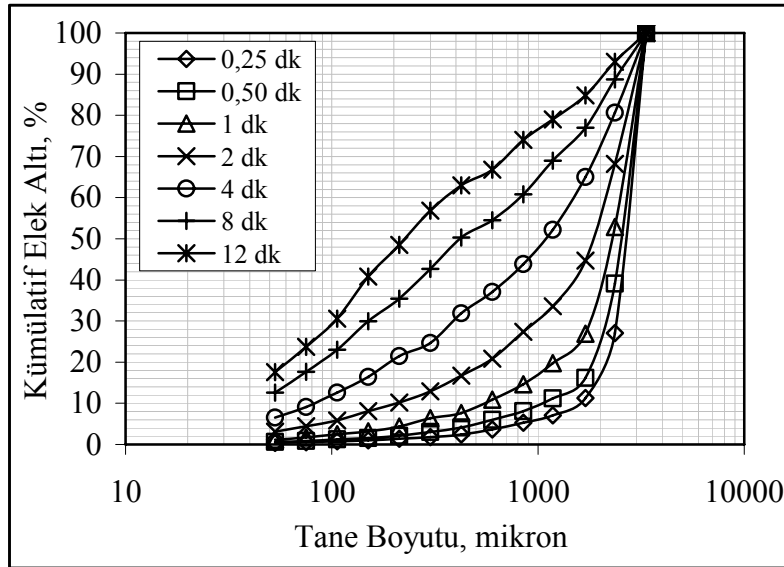
-3350+2360 μm Dar Tane Boyut Grubu ile Yapılan Öğütme Deneyleri

-3350+2360 μm boyutlu ÇATES numunesi ile aşağıdaki çalışma koşullarında yapılan öğütmeler sonunda, alınan ürünlerin boyut dağılımları ve kırılma davranışları belirlenmiştir.

Deney Koşulları:

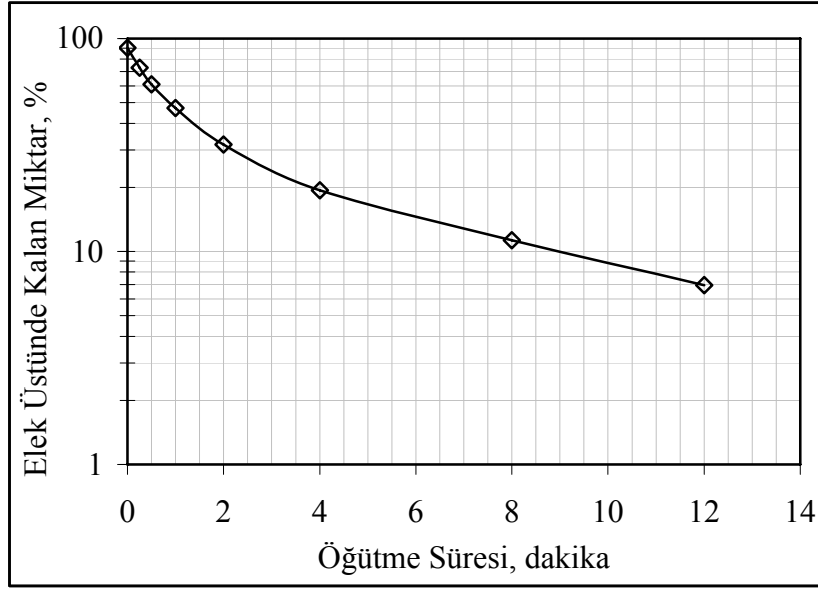
2360 μm elek üstü miktarı	: % 90,40
Malzeme miktarı	: 1648 gr
Değirmen dönüş hızı	: 70 dev/dk
Öğütücü ortam bilya çapları	: 36,83, 29,72, 25,40, 19,05, 12,70 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 20125 gr
Bilya doldurma oranı, J,	: 0,1933
Öğütme süreleri	: 0,25 dk, 0,50 dk, 1 dk, 2 dk, 4 dk, 8 dk, 12 dk.

Şekil 4.31 ile öğütme çalışmalarına ait kümülatif elek altı eğrileri sunulmuş ve Ek Açıklamalar D’de Çizelge D.5 ile sonuçlar verilmiştir.



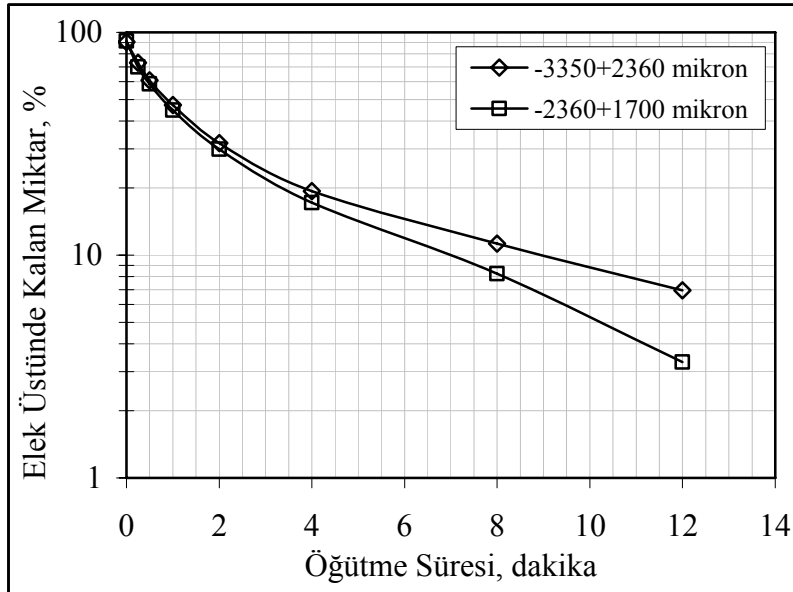
Şekil 4.31 Bilyalı değirmende -3350+2360 μm dar tane boyut grubu elek altı eğrileri.

-3350+2360 μm dar tane boyut grubu için kırılma davranışı Şekil 4.32’de sunulmuştur.



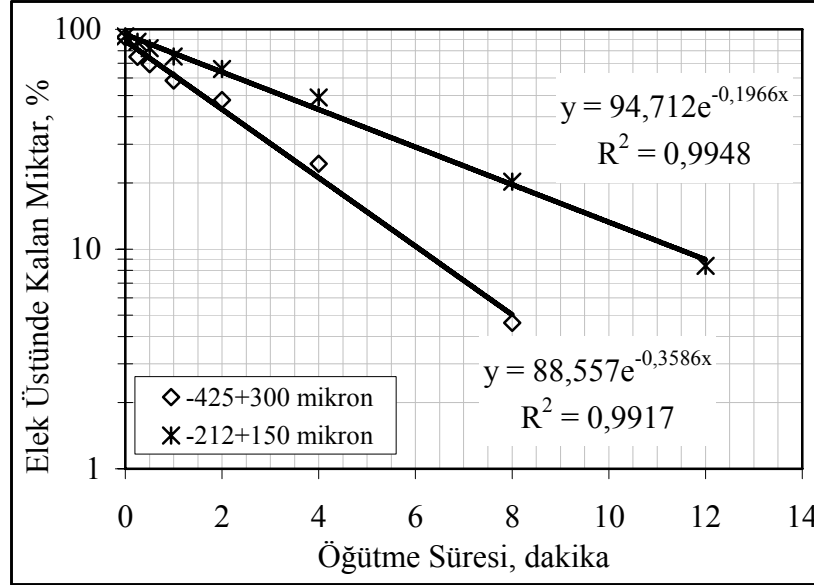
Şekil 4.32 Bilyalı değirmende -3350+2360 µm dar tane boyut grubu kırılma davranışı.

Bilyalı değirmende, çalışılan dar tane boyut gruplarında gerçekleşen kırılma davranışlarının karşılaştırması yapılmıştır. -3350+2360 µm ve -2360+1700 µm dar tane boyut grupları iri boyutlu, -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut grupları ise nispeten ince boyutlu olarak kabul edilmiş ve kendi içlerinde kıyas yapılmıştır. Şekil 4.33’de -3350+2360 µm ve -2360+1700 µm dar tane boyut gruplarındaki ÇATES numunesinin kırılma davranışları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.33 Bilyalı değirmende -3350+2360 µm ve -2360+1700 µm dar tane boyut gruplarında kırılma davranışları.

-3350+2360 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışı, -2360+1700 µm dar tane boyut grubuna kıyasla daha yavaş kalmıştır. Her iki dar tane boyut grubunda da, yaklaşık 2 dakika sonrasında birinci derece doğrusal kırılma davranışından sapma gerçekleşmiştir. Şekil 4.34’de -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında gerçekleşen birinci derece doğrusal kırılma davranışları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.34 Bilyalı değirmende 425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında kırılma davranışları.

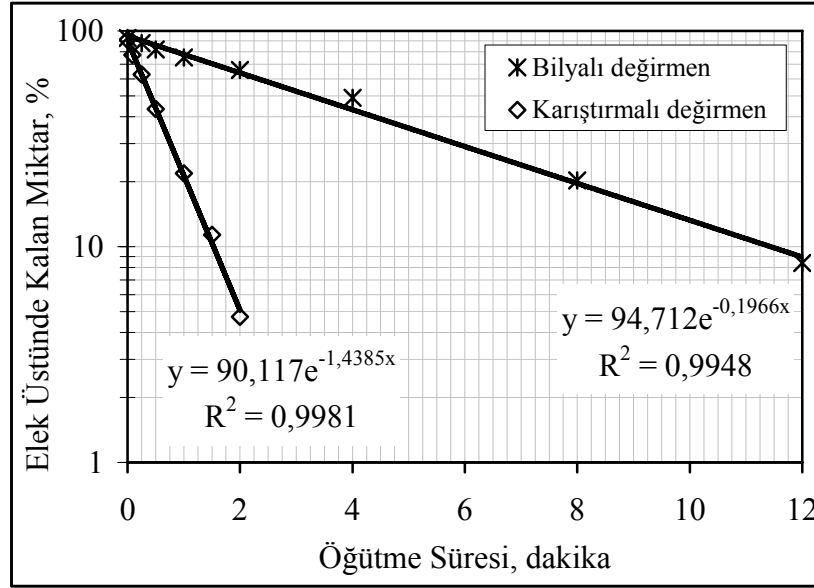
Bilyalı değirmende her iki dar tane boyut grubunda, tane boyutu küçüldükçe kırılma hızı yavaşlamıştır. -425+300 µm dar tane boyut aralığında özgül kırılma hızı (S_i) 0,3586 iken, -212+150 µm dar tane boyut aralığında özgül kırılma hızı (S_i) 0,1966 olarak gerçekleşmiştir.

4.3.3 Karıştırmalı Değirmende ve Bilyalı Değirmende Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması

Şimdiye kadar yapılan öğütme çalışmalarında, karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende gerçekleşen kırılma davranışları kendi içinde, her bir dar tane boyut grubunda değerlendirilmiştir. Sırasıyla -212+150 µm, -425+300 µm, -1180+850 µm, -2360+1700 µm ve -3350+2360 µm dar tane boyut gruplarında gerçekleşen söz konusu kırılma davranışları, karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmen için karşılaştırmalı olarak Şekil 4.35–4.39’da verilmiştir. Bu sayede, değirmenlerin öğütme çalışmalarındaki etkinlikleri de söz konusu dar tane gruplarında karşılaştırılmıştır.

4.3.3.1 -212+150 µm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması

-212+150 µm dar tane boyut grubu için, özgül kırılma hızlarının (S_i), bilyalı değirmende ve karıştırmalı değirmende sırasıyla; 0,1966 ve 1,4385 olarak gerçekleşmiş olduğu Şekil 4.35’de görülmektedir.

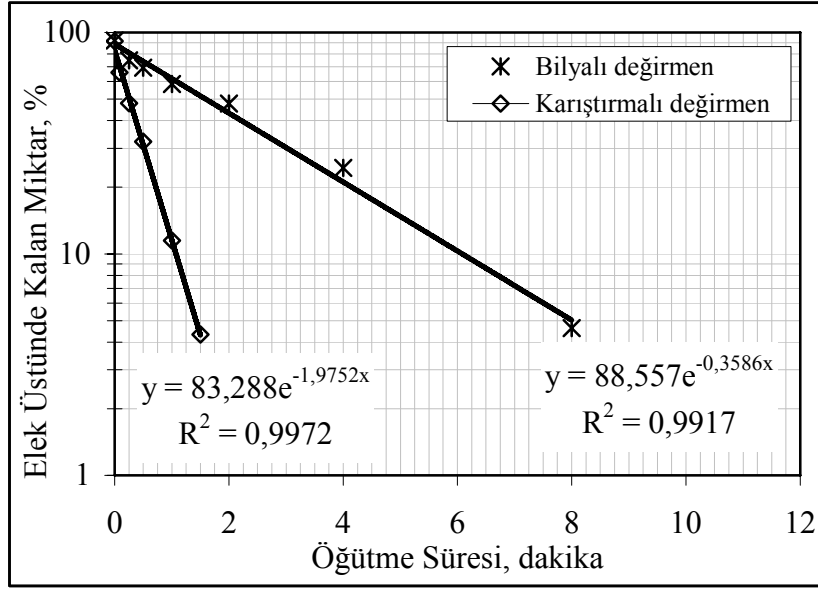


Şekil 4.35 -212+150 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.

-212+150 µm dar tane boyut grubunda, karıştırmalı değirmende elde edilen kırılma hızı, bilyalı değirmendeki kırılma hızına kıyasla yaklaşık 7 kat daha yüksektir.

4.3.3.2 -425+300 µm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması

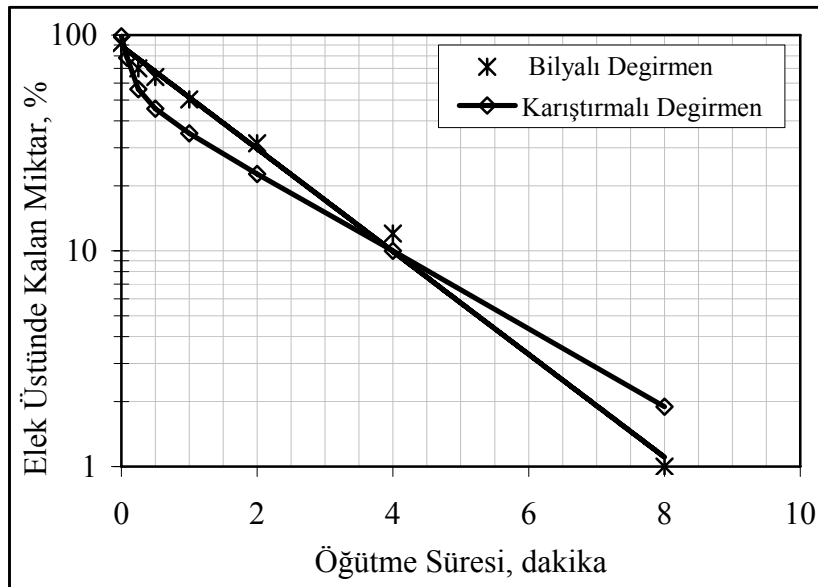
-425+300 µm dar tane boyut grubu için özgül kırılma hızları (S_i), bilyalı değirmende ve karıştırmalı değirmende sırasıyla 0,3586 ve 1,9752 olarak gerçekleşmiştir. -425+300 µm dar tane boyut grubunda, karıştırmalı değirmende elde edilen kırılma hızı, bilyalı değirmendeki kırılma hızına kıyasla yaklaşık 5,5 kat daha yüksektir. Şekil 4.36’da -425+300 µm dar tane boyut grubundaki kırılma davranışları karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmen için karşılaştırmalı olarak birlikte sunulmuştur.



Şekil 4.36 -425+300 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.

4.3.3.3 -1180+850 µm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması

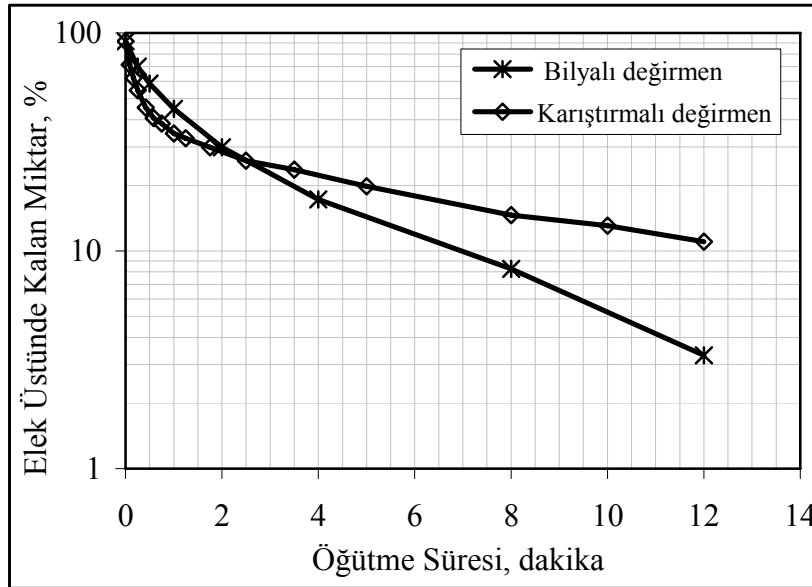
Karıştırmalı değirmende hızlı başlayan kırılma davranışı, öğütme süresine paralel olarak artan ince ürün nedeniyle yavaşlamıştır. Bilyalı değirmende ise, karıştırmalı değirmene göre daha yavaş başlayan kırılma davranışı birinci derece doğrusal kırılma davranışı formundadır. Şekil 4.37'de karıştırmalı ve bilyalı değirmen için kırılma davranışları sunulmuştur.



Şekil 4.37 -1180+850 µm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.

4.3.3.4 -2360+1700 μm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması

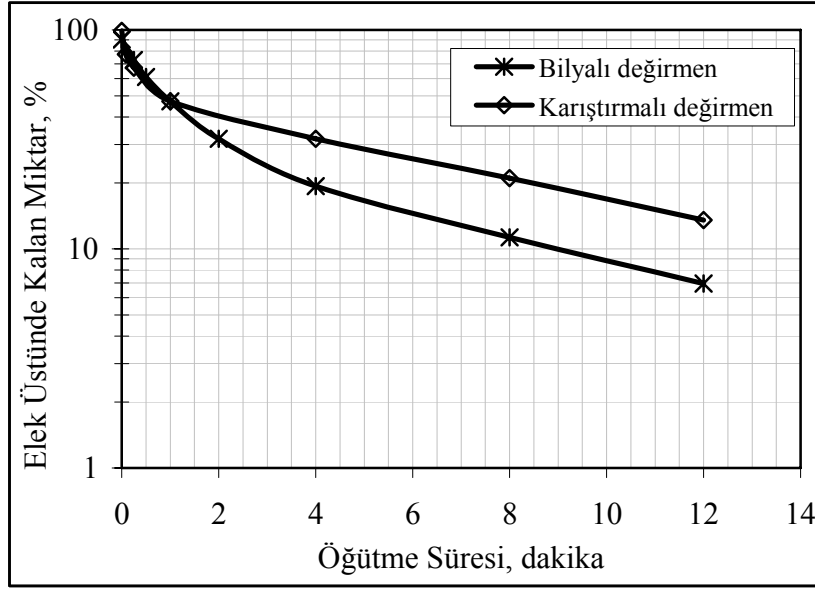
Şekil 4.38’de -2360+1700 μm dar tane boyut grubunda, karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmen için kırılma davranışları sunulmuştur. Şekil 4.38 incelendiğinde; -2360+1700 μm dar tane boyut grubunda karıştırmalı değirmende gerçekleşen kırılma davranışının yaklaşık 1 dakika’ya kadarki süre için bilyalı değirmende gerçekleşen kırılma davranışına kıyasla daha hızlı olduğu görülmektedir. 2 dakika sonrasında, karıştırmalı değirmende kırılma davranışı artan ince malzeme etkisiyle yavaşlamış ve bilyalı değirmende kırılma davranışının daha hızlı kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.38 -2360+1700 μm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.

4.3.3.5 -3350+2360 μm Dar Tane Boyut Grubunda Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.39’da -3350+2360 μm dar tane boyut grubunda, karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmen için kırılma davranışları sunulmuştur. Şekil 4.39 incelendiğinde, kısa süreli öğütmelerde, kırılma hızında belirgin bir farklılık görülmemekle birlikte, 1 dakikaya kadarki öğütme süresinde, karıştırmalı değirmende nispeten de olsa daha hızlı gerçekleşen kırılma davranışının, 1 dakika sonrasında bilyalı değirmen lehine gelişmiş olduğu görülmektedir.



Şekil 4.39 -3350+2360 μm dar tane boyut grubunda kırılma davranışlarının karşılaştırılması.

Nispeten iri dar tane boyut gruplarında (-3350+2360 μm ve -2360+1700 μm) karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende yapılan öğütme testlerinde kırılma davranışının birinci derece doğrusal kırılma formundan uzak olduğu ortaya konmuştur (Şekil 4.38-4.39).

Kırılma ile oluşan ince tanelerin artan öğütme süresine paralel olarak artması sonucu oluşan ince öğütme ürününün değirmen içinde öğütücü ortam üzerine yapışarak yastıklama etkisi yapması ve öğütmeyi yavaşlatması söz konusudur. Kırılma davranışı, başlangıçtaki kısa sürelerde hızlı sonrasında yavaşlayan biçimde gelişmekte ve belli bir süre sonunda (karıştırmalı değirmen için yaklaşık 1 dakika, bilyalı değirmen için yaklaşık 2 dakika) doğrusallıktan sapmaktadır. Bilyalı değirmen de bu durum, -3350+2360 μm ve -2360+1700 μm dar tane boyut gruplarında, karıştırmalı değirmene kıyasla daha etkin öğütmeye doğru gelişmektedir. Yani, kısa süreli öğütmelerde nispeten yavaş gelişen kırılma davranışı, artan öğütme sürelerinde oluşan yastıklama etkisinden daha az etkilenmektedir. -212+150 μm ve -425+300 μm dar tane boyut gruplarında ise karıştırmalı değirmende kırılma davranışı, bilyalı değirmene kıyasla oldukça hızlı gerçekleşmiştir (Şekil 4.35–4.36).

Sonuç olarak; nispeten iri boyutlarda bilyalı değirmen karıştırmalı değirmene kıyasla daha efektif öğütme gerçekleştirirken, ince boyutlarda (yaklaşık -850 μm) karıştırmalı değirmen bilyalı değirmene tercih edilmelidir şeklinde yorumda bulunmak yerinde olacaktır.

Literatürde farklı malzemeler için çeşitli araştırmacılar tarafından (Mankosa et al. 1986, Orumwense 1992, Gao and Forssberg 1995, Tüzün et al. 1995, Cho et al.1996, Karbstein et al. 1996, Zhenhua et al. 1998, Bilgili et al. 2005,2006, Bilgili 2007) yapılan çalışmalarda karıştırmalı değirmenlerde, doğrusal olmayan (non-first-order, non-linear) öğütme kinetiği geliştiği belirtilmiştir. Başka bir deyişle, kırılma davranışı, öğütme süresi arttıkça yavaşlama göstermektedir.

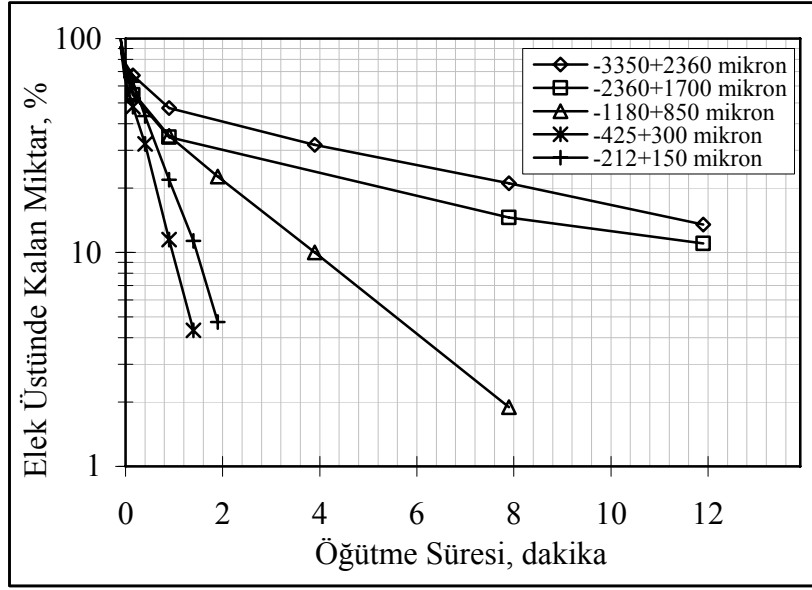
Schönert (1986) öğütmedeki yavaşlamanın arkasında yatan mekanizmayı açıklayıcı yaklaşımlar sunmuştur. Malzemeler belirli boyutun altına indiğinde kırılma tavrı terk ederek plastik davranışa geçer. Bu boyut sınırından sonra malzemenin boyutunda küçülme değil, şekil değiştirme meydana gelmektedir. Ayrıca, “yastıklama etkisi” olarak belirtilen, iri tanelerin ince tanelere gelecek darbelere karşı kalkan görevini görmesi, ince tanelerin öğütücü kuvvetlerle karşılaşmasını ve ufalanmasını engellemektedir (Orumwense 1992). Tanelerin ufalmasıyla yüzey özelliklerindeki elektriksel değişim ile taneler birbiriyle birleşmektedir. Bu da yastıklama etkisi meydana getirebilmektedir.

4.3.4 Öğütme Sonuçlarının Kinetik Açıdan Değerlendirilmesi

Karıştırmalı değirmende ve bilyalı değirmende yapılan öğütme çalışmaları ile elde edilen sonuçlar, özgül kırılma hızı ve kırılma dağılım fonksiyonlarının belirlenmesiyle kinetik açıdan değerlendirilmiştir.

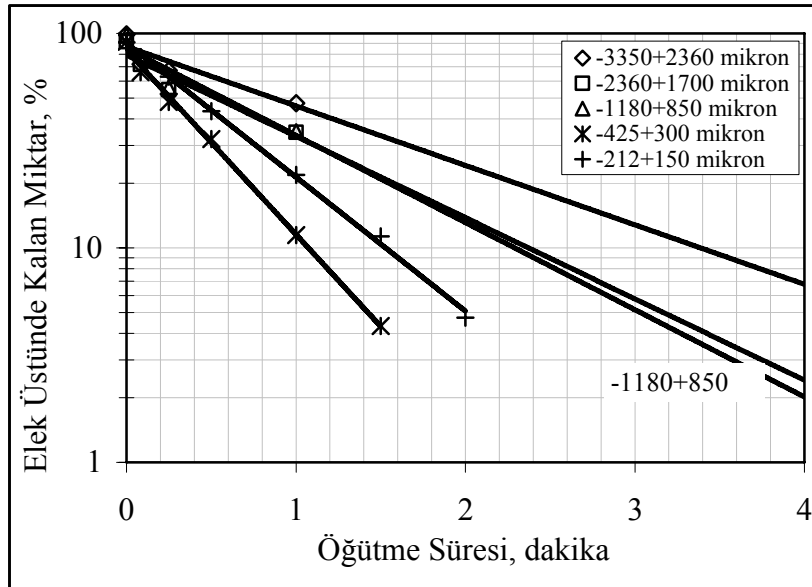
4.3.4.1 Karıştırmalı Değirmende Özgül Kırılma Hızı ve Kırılma Dağılım Fonksiyonlarının Değerlendirilmesi

Dar tane boyut gruplarında hazırlanmış olan malzemeler değişen sürelerde öğütülmüş ve her bir öğütme süresi sonunda en 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_i) belirlenmiştir. 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 ise tamamen doğrusal kırılma davranışından uzaklaşmıştır. Kırılma davranışları çalışılan tüm dar tane boyut grupları için Şekil 4.40’da birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.40 Karıştırmalı değirmende dar tane boyut gruplarında kırılma davranışı.

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 kırılma davranışları Şekil 4.41’de verilmiştir.



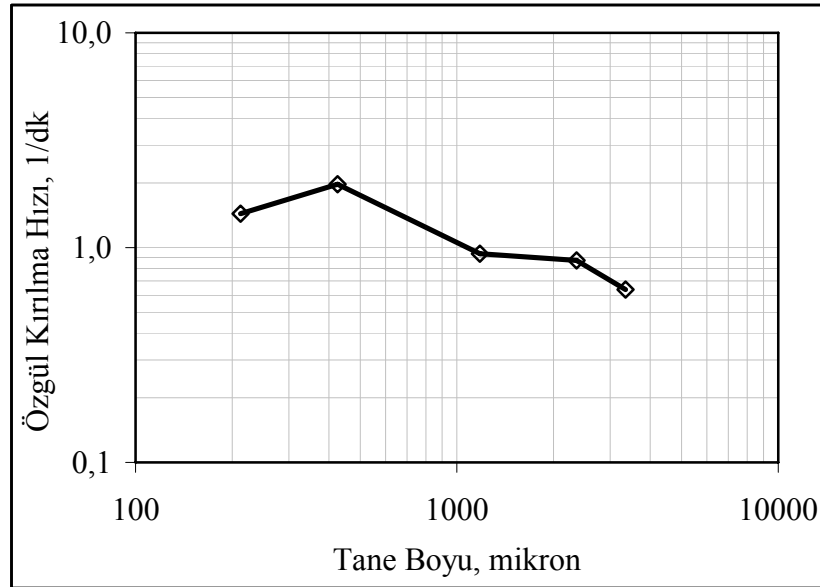
Şekil 4.41 Karıştırmalı değirmende birinci derece kırılma davranışı.

Doğruların eğimlerinden özgül kırılma hızları hesaplanmış ve Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Karıştırma değirmende özgül kırılma hızları.

Dar Tane Boyut Grubu (mikron)	Özgöl Kırılma Hızı, S_i
-3350+2360	0,6382
-2360+1700	0,8728
-1180+850	0,9359
-425+300	1,9757
-212+150	1,4385

Hesaplanan özgül kırılma hızlarının, elek aralıklarının üst değerlerine göre logaritmik olarak grafikleri çizilmiş ve aşağıda Şekil 4.42’de verilmiştir.



Şekil 4.42 Karıştırma değirmende kırılma hızlarının tane boyutu ile değişimi.

Özgöl kırılma hızı 425 μm tane boyutunda maksimuma ulaşmış, sonrasında azalmaya başlamıştır. Şekil 4.42’deki grafikten $a_T=1,08$ ve $\alpha=0,51$ olarak hesaplanmıştır.

Kırılma dağılım fonksiyonlarının belirlenmesinde BII hesaplama yöntemi kullanılmıştır (Austin et al. 1984). Başlangıç boyutunun yaklaşık olarak %20-30’unun öğütüldüğü en kısa öğütme süresi olan 5 saniye temel alınarak, bu öğütme süresi sonunda alınan ürünlerin komple elek analizleri yapılmıştır. Daha önce verilen ve aşağıda tekrarlanan Eşitlik 3.17 (Austin ve Luckie BII yöntemi) yardımıyla kırılma dağılımları belirlenmiştir.

$$B_{i,1} = \frac{\log[(1 - P_i(0))/(1 - P_i(t))]}{\log[(1 - P_2(0))/(1 - P_2(t))]}, \quad i > 1$$

Burada;

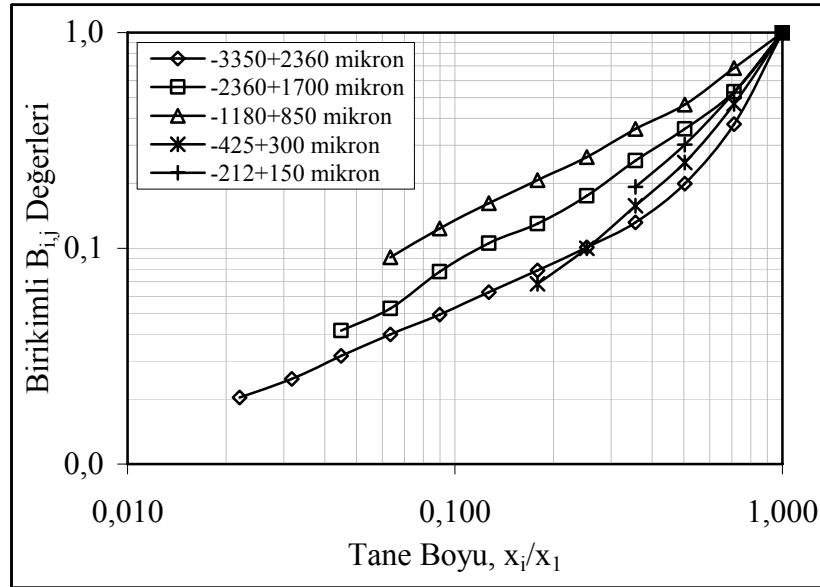
$P_i(0)$: i boyut aralığında beslenen malzemenin birikimli elek altı %'si,

$P_2(0)$: ikinci boyut aralığında beslenen malzemenin birikimli elek altı %'si,

$P_i(t)$: i boyut aralığında t anındaki malzemenin birikimli elek altı %'si,

$P_2(0)$: ikinci boyut aralığında t anındaki malzemenin birikimli elek altı %'si' dir.

Kırılma dağılım fonksiyonlarının tane boyu ile değişimi grafiğinde (Şekil 3.3), ince tane boylarına karşılık gelen kısımdan çizilen teğetin eğiminden γ bu teğetin x eksenindeki en büyük tane boyutundan y eksenine dik çizilen doğruyu kestiği yerden de Φ değerleri belirlenmiştir. Eğrinin büküm yaptığı noktadan yani iri tane boylarına karşılık gelen eğri ile ince boylar için çizilen teğet arasındaki farkla bunlara karşılık gelen tane boyutlarına karşı grafikleri çizilmiştir. Buradan elde edilen doğrunun eğiminden de β değeri elde edilmiştir. Eşitlik 3.17 ile deneysel kırılma dağılımı değerleri ($B_{i,1}$) hesaplanmış ve kırılma dağılım değerlerinin tane boyu ile değişimi eğrileri Şekil 4.43'de gösterilmiş ve Ek Açıklamalar E'de Çizelge E.1 ile verilmiştir.



Şekil 4.43 Karıştırmalı değirmende kırılma dağılım değerlerinin tane boyu ile değişimi.

Deneysel kırılma dağılımı değerleri ($B_{i,1}$), daha önce verilen ve aşağıda tekrarlanan Eşitlik 3.31 yardımıyla yeniden hesaplatılmıştır.

$$B_{i,l} = \Phi \left(\frac{x_{i,l}}{x_1} \right)^\gamma + (1 - \Phi) \left(\frac{x_{i-1}}{x_1} \right)^\beta, \quad i > 1$$

Sonuçta; deneysel kırılma dağılım değerleri ve hesaplanmış kırılma dağılım değerleri yardımıyla, doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak ölçülen ile hesaplanan değerler arasındaki farkların kareleri toplamı minimum olacak şekilde Φ , γ ve β parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen parametre değerleri ve bunların tane boyutu ile değişimleri aşağıda Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Karıştırmalı değirmende kırılma dağılım parametreleri.

Dar Tane Boyut Grubu (mikron)	Kırılma Dağılım Parametreleri		
	ϕ	γ	β
-3350+2360	0,23	0,64	4,00
-2360+1700	0,63	0,90	5,50
-1180+850	0,66	0,70	2,48
-425+300	0,38	1,00	3,28
-212+150	0,15	0,31	2,23

Çizelge 4.5’de verilen sonuçların incelenmesiyle, kırılma dağılım parametrelerinin tane boyutu ile değiştiği görülmektedir. Yani, kırılma dağılım parametrelerinin normalize edilemediği dolayısıyla malzemenin başlangıç boyutlarına bağlı oldukları görülmüştür. Daha önce verilen ve aşağıda tekrarlanan Eşitlik 3.32 ve Eşitlik 3.33 yardımıyla Φ , γ , β ve δ parametreleri doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile tekrar hesaplatılmıştır.

$$B_{i,j} = \Phi_j \left(\frac{x_{i,l}}{x_1} \right)^\gamma + (1 - \Phi_j) \left(\frac{x_{i-1}}{x_1} \right)^\beta, \quad 0 \leq \Phi_j \leq 1$$

$$\Phi_j = \Phi_1 \left[\frac{x_j}{x_1} \right]^{-\delta}$$

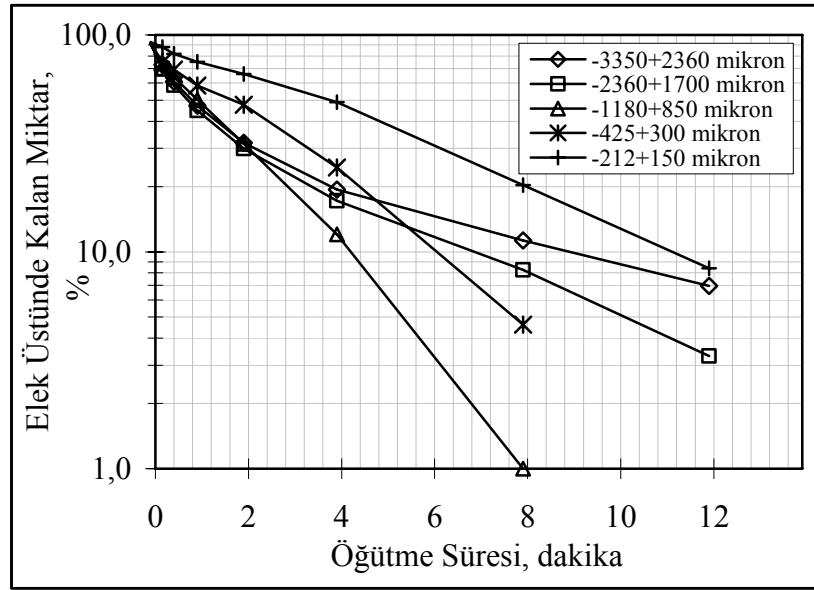
Sonuçta; kırılma dağılım parametreleri $\Phi=0,59$, $\gamma=1,81$, $\beta=2,71$ ve $\delta=1,00$ olarak bulunmuştur.

4.3.4.2 Bilyalı Değirmende Özgöl Kırılma Hızı ve Kırılma Dağılım Fonksiyonlarının Değerlendirilmesi

Bilyalı değirmende yapılan çalışmalarda, dar tane boyut gruplarında hazırlanmış olan malzemeler değişen sürelerde öğütülmüş ve her bir öğütme süresi sonunda en üst tane boyu aralığında kalan malzeme fraksiyonlarının öğütme sürelerine karşı yarı logaritmik grafikleri çizilmiştir.

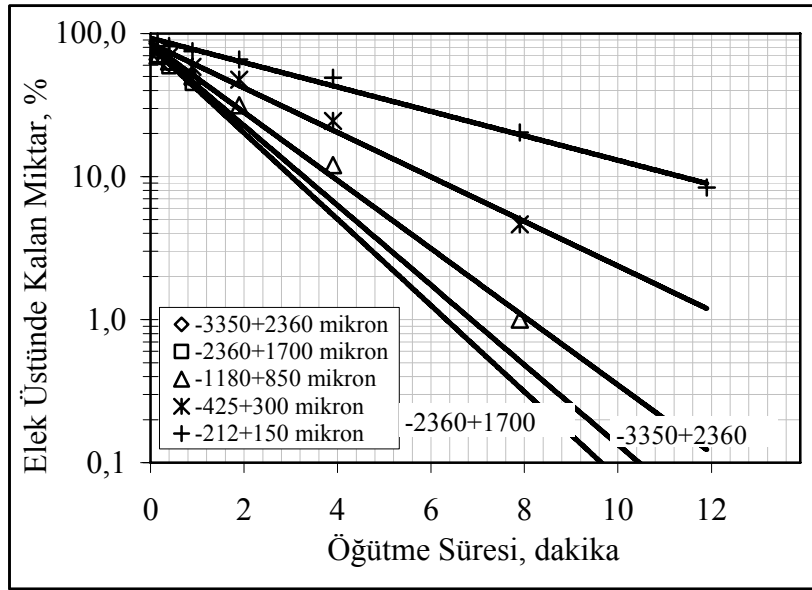
Bilyalı değirmende öğütmede birinci derece kırılma davranışı $-1180+850\ \mu\text{m}$, $-425+300\ \mu\text{m}$ ve $-212+150\ \mu\text{m}$ dar tane boyut gruplarında gerçekleşmiştir. $-3350+2360\ \mu\text{m}$ ve $-2360+1700\ \mu\text{m}$ dar tane boyut gruplarında ise tamamen doğrusal kırılma davranışından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

Kırılma davranışları Şekil 4.44’de çalışılan tüm dar tane boyut grupları için birlikte sunulmuştur.



Şekil 4.44 Bilyalı değirmende dar tane boyut gruplarında kırılma davranışı.

Şekil 4.44’de 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 4.45’de verilmiştir.



Şekil 4.45 Bilyalı değirmende birinci derece kırılma davranışı.

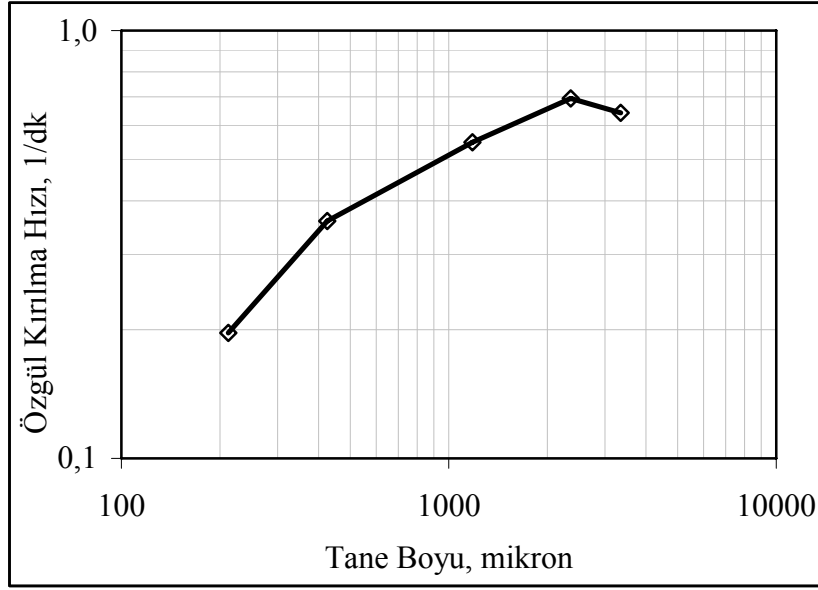
Doğruların eğimlerinden özgül kırılma hızları hesaplanmıştır. Bilyalı değirmende, çalışılan dar tane boyut grupları için hesaplanan özgül kırılma hızları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Bilyalı değirmende özgül kırılma hızları.

Dar Tane Boyut Grubu (mikron)	Özgül Kırılma Hızı, S_i
-3350+2360	0,6416
-2360+1700	0,6943
-1180+850	0,5484
-425+300	0,3586
-212+150	0,1966

Hesaplanan özgül kırılma hızlarının, elek aralıklarının üst değerlerine göre logaritmik olarak grafikleri çizilerek Şekil 4.46’da sunulmuştur.

Şekil 4.46’nın incelenmesi ile kırılma hızlarının belirli bir tane boyuta kadar arttığı ve bir maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Bilyalı değirmende söz konusu maksimum değer karıştırmalı değirmene kıyasla daha iri boyutta gerçekleşmiştir. Bilyalı değirmende, özgül kırılma hızı 2360 μm tane boyutunda maksimuma ulaşmış, sonrasında azalmaya başlamıştır.



Şekil 4.46 Bilyalı değirmende kırılma hızlarının tane boyutu ile değişimi.

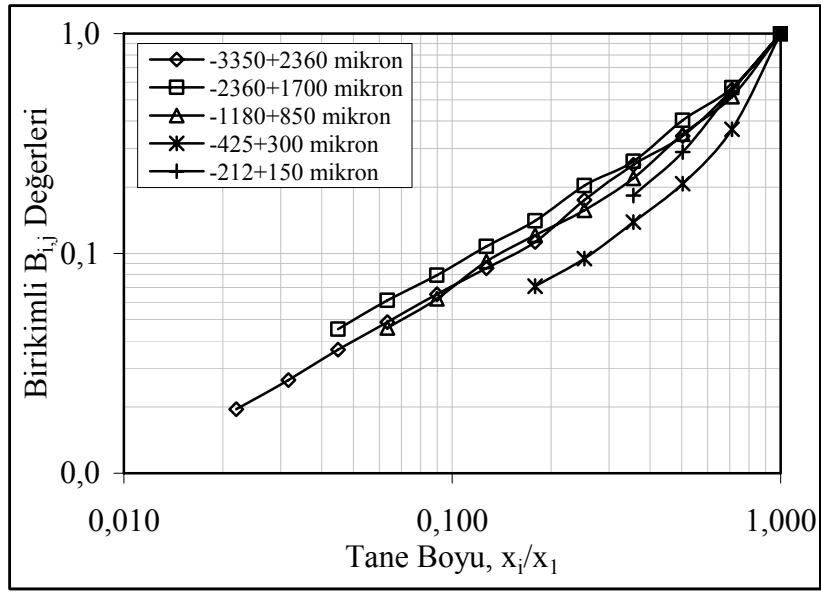
Bu noktada, daha önce verilen ve aşağıda tekrarlanan Eşitlik 3.20 yardımıyla, sonuçlar eşitliğe uydurulmuştur.

$$S_i = a_T \left(\frac{x_i}{x_1} \right)^\alpha \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu} \right)^\Lambda}$$

Doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle ölçülen ile hesaplanan değerler arasındaki farkları en aza indirecek şekilde ÇATES numunesi için bilyalı değirmende a_T , α , μ ve Λ 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.

Başlangıç boyutunun yaklaşık olarak %20-30'unun öğütüldüğü en kısa öğütme süresi olan 0,25 dakika temel alınarak, bu öğütme süresi sonunda alınan ürünlerin komple elek analizleri yapılmış kırılma dağılımları belirlenmiştir.

DeneySEL kırılma dağılımı değerleri ($B_{i,1}$) hesaplanmış ve kırılma dağılım değerlerinin tane boyu ile değişimi eğrileri aşağıda Şekil 4.47'de gösterilmiş ve Ek Açıklamalar E'de Çizelge E.2 ile verilmiştir.



Şekil 4.47 Bilyalı değirmende kırılma dağılım değerlerinin tane boyu ile değişimi.

Sonuçta; deneysel kırılma dağılım değerleri ve hesaplanmış kırılma dağılım değerleri yardımıyla, doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak ölçülen ile hesaplanan değerler arasındaki farkların kareleri toplamı minimum olacak şekilde Φ , γ ve β parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen parametre değerleri ve bunları tane boyutu ile değişimleri aşağıda Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Bilyalı değirmende kırılma dağılım parametreleri.

Dar Tane Boyut Grubu (mikron)	Kırılma Dağılım Parametreleri		
	ϕ	γ	β
-3350+2360	0,58	0,91	3,42
-2360+1700	0,74	0,94	6,62
-1180+850	0,62	0,96	5,16
-425+300	0,38	0,98	5,25
-212+150	0,10	0,49	1,96

Çizelge 4.7’de yer alan sonuçlar, kırılma dağılım parametrelerinin tane boyutu ile değiştiği göstermektedir. Kırılma dağılım parametrelerinin normalize edilemediği ve malzemenin başlangıç boyutlarına bağlı kaldığı görülmektedir. Bu durumda Φ , γ , β ve δ parametreleri doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile tekrar hesaplatılmıştır. Sonuçta, bilyalı değirmen için, kırılma dağılım parametreleri $\Phi=0,45$, $\gamma=0,89$, $\beta=3,39$ ve $\delta=0,10$ olarak bulunmuştur.

4.4 JKSİMMET SİMULASYON PROGRAMI İLE ÖĞÜTME ÜRÜNLERİNİN BOYUT DAĞILIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

ÇATES numunesi ile yapılan öğütme deneylerinde elde edilen sonuçlar, eğitim lisansı ile alınmış olan JKSimMet simülasyon programı yardımıyla simüle edilmiştir. Ek Açıklamalar F’de Şekil F.1 ile simülasyon ekran çıktısı sunulmuştur. Deneysel ve simülasyon ürün boyut dağılımları birlikte incelenerek, sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

4.4.1 JKSimMet Simülasyon Programı Hakkında Genel Bilgiler

JKSimMet programı cevher hazırlama operasyonlarında, boyut küçültmeden sınıflandırmaya kadar geniş bir aralıkta kullanılmaktadır. Yöntemin temelinde, simülasyonu yapılan modelin, sistemin gerçek bir parçasını temsil etmesi yatar. Yani modelin davranışı gerçek sistemin davranışıyla aynıdır (JKMRC 2001). JKSimMet simülasyon programı ile deneysel çalışmalardan elde edilen veriler sistemdeki madde denkliği dikkate alınarak, deneysel sonuçlara en uygun yaklaşımı verecek şekilde istatistiksel olarak yeniden değerlendirilir ve hesaplanır. Sonuçta, deneylerde kullanılan devrenin ya da kullanılan ekipmanın bir kısmının performanslarının değerlendirilmesi mümkün olmaktadır (Benzer vd. 2001). JKSimMet Simulator ile bilyalı değirmen modellemesinde “mükemmel karışım modeli” kullanılır. Mükemmel karışım modelinde, herhangi bir tane boyut fraksiyonu için kararlı durumda madde denkliği Eşitlik 4.1 ve 4.2 ile tanımlanır (Whiten 1976, Doğru ve Ergün 2004).

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^i a_j \left[\frac{r_j}{d_j} \right] p_j - \left[\frac{r_i}{d_i} \right] p_i = 0 \quad (4.1)$$

$$p_i = d_i s_i \quad (4.2)$$

Burada;

f_i ve p_i : i boyut fraksiyonunda değirmene giren ve çıkan malzeme miktarları (t/s),

a_{ij} : Boyut küçültme işlemi sırasında j boyut fraksiyonundaki malzemenin kendinden ince boyutlara hangi oranlarda dağılacağını gösteren kırılma dağılım fonksiyonu,

r_i ve d_i : i boyut fraksiyonundaki malzemenin kırılma hızı ve taşınma hızı (s^{-1}),

r_i/d_i : Kırılma hızı parametresi,

s_i : i boyut fraksiyonunun değirmen içindeki tonajı.

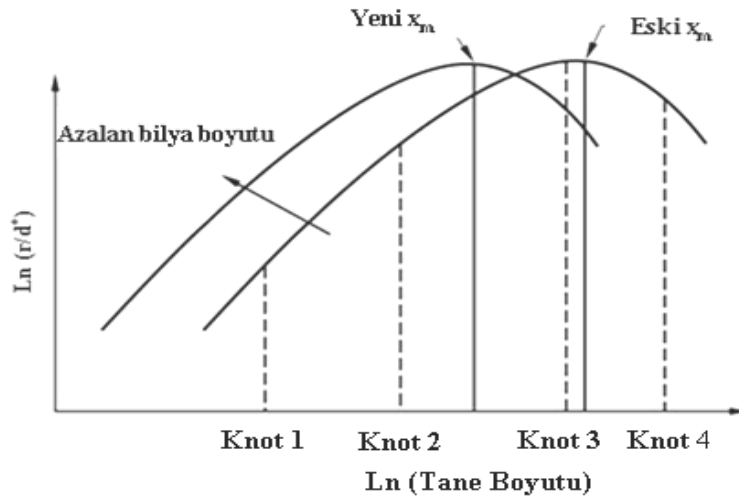
Besleme malı ve ürüne ait r_i/d_i oransal ifadesi, her bir boyut fraksiyonu için “görünüm fonksiyonu” (appearance function) ile tanımlanır (Napier Munn et al. 1996, JKMRC 2001). Görünüm fonksiyonu tane boyutundan bağımsızdır. Bu sebeple sadece bir boyut grubu için görünüm fonksiyonunun sisteme girilmesi yeterlidir. JKSImMet diğer boyutlar için görünüm fonksiyonunu otomatik olarak hesaplar. ‘i’ boyut fraksiyonundaki malzemenin taşınma hızı (d_i), değirmen hacmi ve hacımsal besleme oranı (Q) üzerinden hesaplandığında eşitlik 4.3 ile verilen forma dönüşür.

$$d^*_i = \left[\frac{D^2 L}{4Q} \right] d_i \quad (4.3)$$

D : Değirmen çapı (m),

L : Değirmen uzunluğu (m).

(r/d^*) fonksiyonu, Şekil 4.48’de verilen bükümlü (spline) eğri formunda temsil edilir (JKMRC 2001, Whiten 1972).



Şekil 4.48 (r/d^*) eğri fonksiyonu gösterimi.

Bilyalı değirmen için (r/d^*) eğri fonksiyonu tane boyutuna bağlı olarak düğüm (knot) olarak adlandırılan 3 ya da 4 değerden hesaplanır (Napier Munn et al. 1996, Whiten. 1972). Sonuçta; JKSImMet simulasyon programı, kütle denkliği yardımıyla kullanıcının belirlediği knot değerlerine karşılık (r/d^*)’yi hesaplar ve simulasyon çıktılarını, deneysel ölçümleri mümkün olduğunca en iyi derecede karşılayacak şekilde ayarlar (JKMRC 2001).

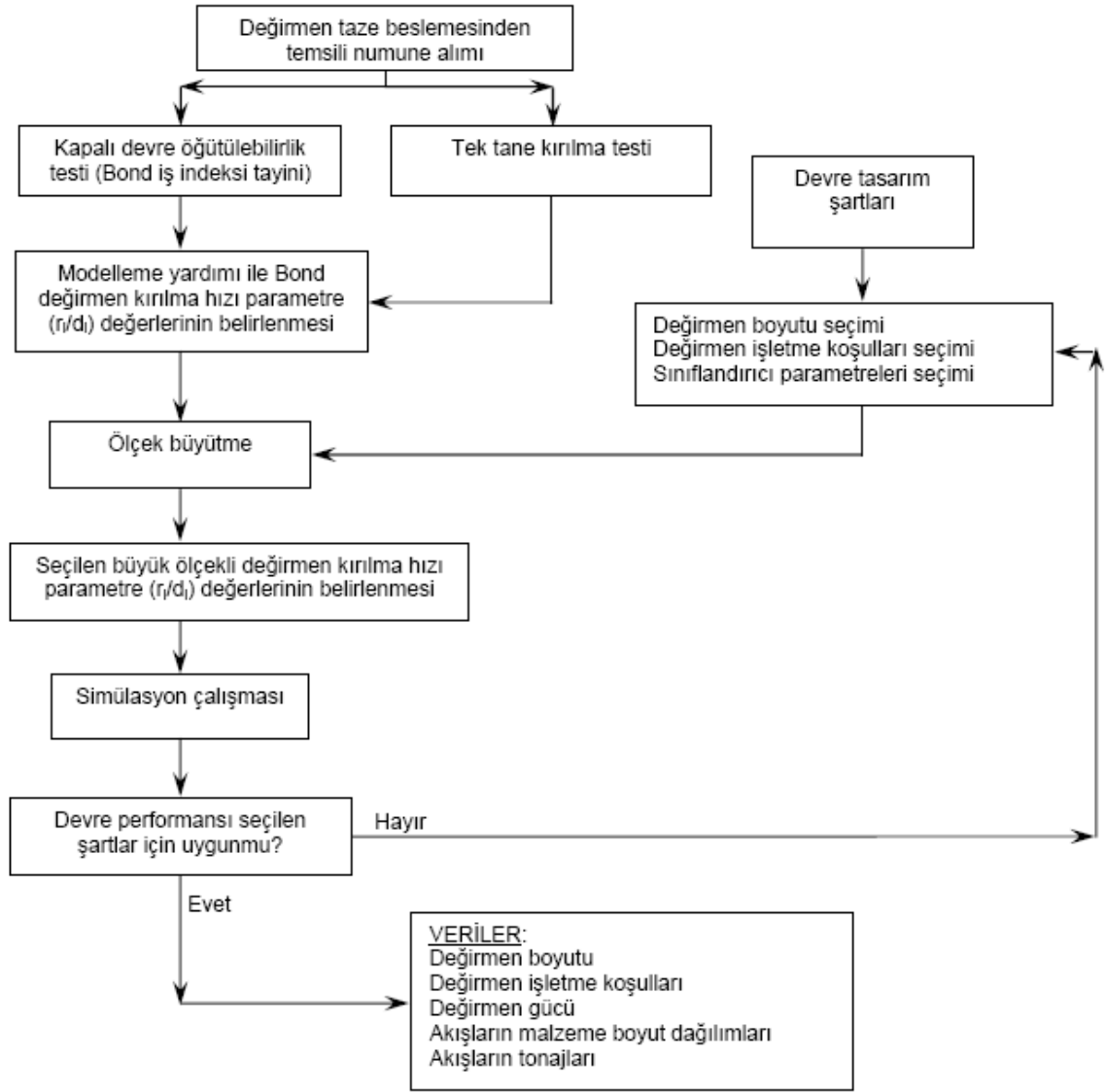
Matematiksel modelleme ve simulasyon tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, özellikle öğütme devrelerinin optimizasyonunda önemli gelişmeler sağlanmıştır. Tasarım alanında modellerin kullanımı daha azdır. Herbst ve Fuerstenau (1980), Austin vd. (1982), Kavetsky ve Whiten (1984), Morrell ve Man (1997) bu konuda yaklaşımlar önermişlerdir. Modelleme ve simulasyonu temel alan yöntemler devreyi bir bütün olarak ele aldığı için diğer ekipmanlarla bilyalı değirmen arasındaki etkileşim belirlenebilmekte, dolayısıyla tasarım ve işletme değişkenlerinde yapılacak herhangi bir değişikliğin akış tonajları ile tane boyu dağılımları üzerine etkisi hesaplanabilmektedir. Morrell ve Man (1997), konvansiyonel bilgileri modelleme yaklaşımıyla birleştirmeyi amaçlayan ve yaş öğütmede yaygın kullanılan boğazdan taşmalı bilyalı değirmenler için, Bond öğütülebilirlik testinin son çeviriminde elde edilen boyut dağılımlarını kullanan modelleme destekli bir ölçek büyütme yöntemi önermişlerdir. Önerilen ölçek büyütme yönteminde; ilk aşamada, değirmen taze besleme numunesi kullanılarak yapılan tek tane kırılma testi sonucunda kırılma dağılım fonksiyonu değerleri ($a_{i,j}$) ve Bond bilyalı değirmen öğütülebilirlik testi ile de testin son çevirimindeki değirmen besleme ve ürün tane boyut dağılımları belirlenmektedir. Daha sonra, Eşitlik 4.1’de verilen Whiten (1974)’ın mükemmel karışım modeli kullanılarak model kalibrasyonu yardımıyla Bond bilyalı değirmenin kırılma hızı parametre değerleri (r_i/d_i) belirlenmekte ve belirlenen bu değere, Bond bilyalı değirmen ile seçilen büyük ölçekli değirmen arasındaki işletme ve tasarım farklılıkları, ölçek büyütme işlemine yansıtılarak, büyük ölçekli değirmen kırılma hızı parametre değerleri (r_i/d_i) belirlenmektedir. Son aşamada ise, hesaplanan bu kırılma hızı parametre değerleri ve büyük ölçekli değirmen besleme tane boyu dağılımı kullanılarak, devre performansı tahmin edilmektedir. Sonuç olarak; prosese uygun değirmen seçilmekte, devredeki akışların boyut dağılımları ve tonajları belirlenmektedir. Morrell ve Man ölçek büyütme yöntemi Eşitlik 4.4 ile ifade edilmiş ve şematik gösterimi de Şekil 4.49’da sunulmuştur.

$$\frac{(r/d)_{\text{büyük ölçekli değirmen}}}{(r/d)_{\text{lab. ölçekli değirmen}}} = \frac{(P_{\text{net}} \times Q^{-1} \times f(D_b))_{\text{büyük ölçekli değirmen}}}{(P_{\text{net}} \times Q^{-1} \times f(D_b))_{\text{lab. ölçekli değirmen}}} \quad (4.4)$$

$f(D_b)$: En büyük bilya boyutuna bağlı bir fonksiyon,

P_{net} : Öğütücü ortamın çektiği güç (net güç), (kWs/t),

Q : Değirmen beslemesi hacimsel akış hızı, (m^3/s).



Şekil 4.49. Morrell ve Man ölçek büyütme yönteminin şematik gösterimi

Ölçek büyütmede, tasarım ve işletme değişkenlerinin etkisi Eşitlik 4.5 ile de hesaplanabilir.

$$\frac{r/d_{\text{yeni}}}{r/d_{\text{eski}}} = \left(\frac{D_{\text{yeni}}}{D_{\text{eski}}} \right)^{0,5} \times \left(\frac{1 - E_{\text{yeni}}}{1 - E_{\text{eski}}} \right) \times \left(\frac{E_{\text{yeni}}}{E_{\text{eski}}} \right) \times \left(\frac{C_{s_{\text{yeni}}}}{C_{s_{\text{eski}}}} \right) \times \left(\frac{W_{\text{yeni}}}{W_{\text{eski}}} \right)^{0,8} \quad (4.5)$$

r/d : Kırılma hızı parametresi

D : Değirmen çapı (m)

E : Değirmen şarj oranı (%)

C_s : Değirmen kritik hız yüzdesi (%)

W : İş indeksi değeri, kWs/t

Bu noktada, Bond bilyalı değirmen ve büyük ölçekli değirmenlerde kullanılan besleme malzemesi boyut dağılımları arasındaki farklılık, her bir tane boyu fraksiyonunda kalan malzemenin % ağırlıkları arasındaki orandan yararlanılarak ölçek büyütme yansıtılmaktadır (Man 2000).

Sonuç olarak; prosese uygun değirmen seçilebilmekte ve kullanılması düşünülen havalı sınıflandırıcı ve ara bölme ızgarasının modellerinin tesis verileriyle oluşturulması durumunda devre tasarımı için gerekli bilgiler sağlanmaktadır (Erdem vd. 2007).

4.4.2 Bilyalı Değirmende Öğütme-Simulasyon Çalışmaları

Simulasyon çalışmaları için ÇATES numunesi, bilyalı değirmende 1 dk, 4 dk, 8 dk, 12 dk ve 24 dk öğütülmüştür. Tamamı 3350 μm altında olan malzemenin d_{80} boyutu yaklaşık 2100 μm 'dir. Öğütme süreleri sonunda d_{80} boyutları öğütme sürelerine göre sırasıyla 1802 μm , 1130 μm , 324 μm , 167 μm ve 81 μm olarak elde edilmiştir.

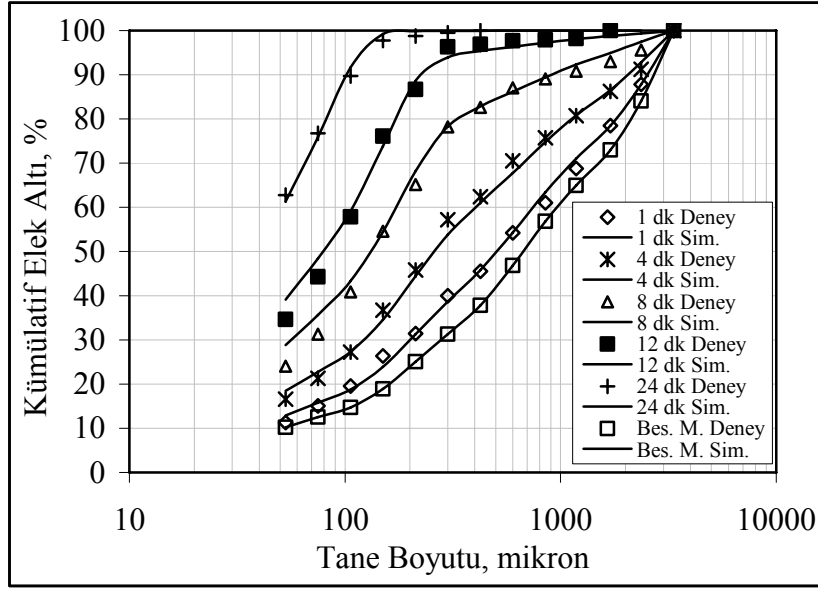
Bu noktada, ÇATES numunesi ve değişen sürelerde öğütme sonucu elde edilen öğütme ürünlerine ait deneysel verilerin JKSImMet simulasyon programı ile simulasyonu yapılmıştır.

Öğütme sürelerine ve tane boyutuna bağlı olarak, simulasyonda kullanılan 4 knot için r/d^* değerleri aşağıda Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Bilyalı değirmende knot'lara karşı r/d^* değerleri.

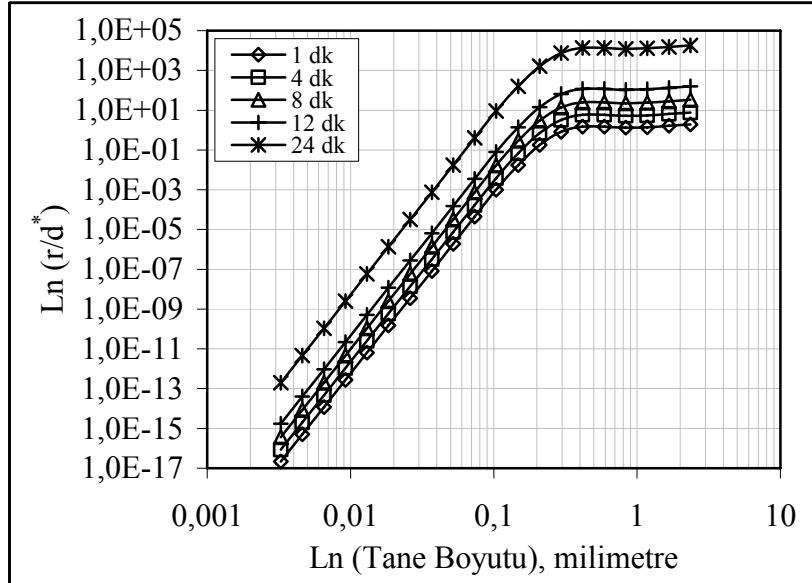
Knot	$\text{Ln}(r/d^*)$				
0,09	-9,80	-8,43	-6,97	-5,42	-0,67
0,35	-0,20	1,17	2,63	4,18	8,93
0,9	0,30	1,67	3,13	4,68	9,43
2	0,50	1,87	3,33	4,88	9,63
Öğütme Süresi	1 dk.	4 dk.	8 dk.	12 dk.	24 dk.

Sonuçta; ÇATES numunesi ve öğütme ürünlerine ait deneysel ve simulasyon elek altı eğrileri birlikte çizilmiş, Şekil 4.50'de gösterilmiş ve sonuçlar Ek Açıklamalar F'de Çizelge F.1 ile verilmiştir.



Şekil 4.50 Bilyalı değirmende deneysel ve simülasyon elek altı eğrileri.

Şekil 4.50’den görüldüğü üzere, deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları oldukça iyi benzeşim göstermiştir. Simülasyon da sonuçların tutarlı olabilmesi için $\ln$ (Tane Boyutu)’na karşılık çizilen $\ln (r/d^*)$ grafiğinin Şekil 4.48’de gösterilen formda olması gereklidir. Şekil 4.51’de bilyalı değirmende, $\ln$ (Tane Boyutu)’na karşılık çizilen $\ln (r/d^*)$ eğrileri tüm öğütme süreleri için gösterilmiştir.



Şekil 4.51 Bilyalı değirmen $\ln$ (Tane Boyutu)’na karşı $\ln (r/d^*)$ eğrileri.

Şekil 4.51’de, (r/d^*) eğrilerindeki zamana bağlı paralel değişim, deneysel sonuçların simülasyon verileri ile olan uyumunu ifade etmektedir.

4.4.3 Karıştırılmalı Değirmende Öğütme-Simulasyon Çalışmaları

ÇATES numunesi, karıştırılmalı değirmende 0,25 dk, 0,50 dk, 1 dk ve 4 dk öğütülmüştür. Sonuçta; tamamı 3350 μm altında olan malzemenin sözkonusu öğütme süreleri sonunda d_{80} boyutları öğütme sürelerine göre sırasıyla 190 μm , 102 μm , 78 μm ve 28 μm olarak elde edilmiştir.

ÇATES numunesinin değişen sürelerde öğütülmesi sonucu elde edilen öğütme ürünlerine ait deneysel veriler JKSimMet simulasyon programı ile bilyalı değirmen modeli üzerinden simule edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan model bilyalı değirmen için geliştirilmiş bir modeldir ve JKMRC tarafından yapılan çalışmalar halen sürmekle birlikte karıştırılmalı değirmene ait henüz bir modelleme yoktur. Bilyalı değirmenlerin aksine, yüksek devirlerde çalışmaları nedeniyle karıştırılmalı değirmenler simulasyon çalışmalarının yapılmasını sınırlamıştır (Napier Munn et al. 1996).

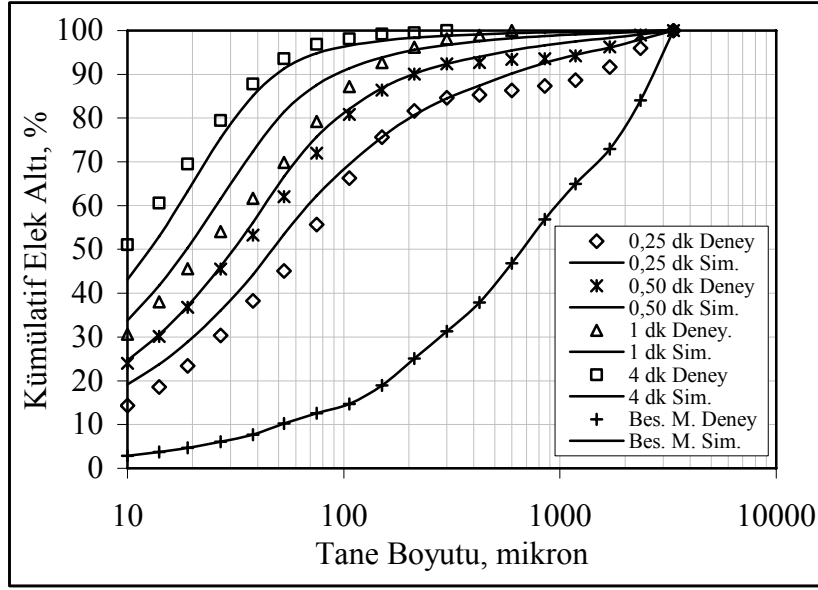
Karıştırılmalı değirmende öğütme sürelerine ve tane boyutuna bağlı olarak, simulasyonda kullanılan 4 knot için (r/d^*) değerleri aşağıda Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Karıştırılmalı değirmende knot’lara karşı r/d^* değerleri.

Knot	$\ln(r/d^*)$			
0,01	-8,00	-7,50	-6,00	-4,70
0,05	-2,50	-2,00	-0,90	0,40
0,2	0,10	0,80	1,60	3,00
2	1,00	1,90	3,00	4,50
Öğütme Süresi	0,25 dk	0,50 dk	1 dk	4 dk

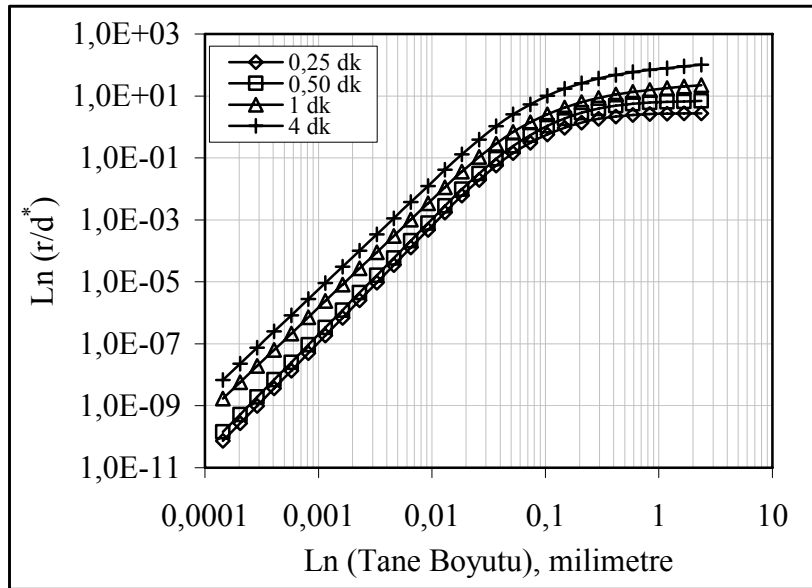
Sonuçta; ÇATES numunesi ve öğütme ürünlerine ait deneysel ve simulasyon elek altı eğrileri birlikte çizilmiş ve Şekil 4.52’de gösterilmiş ve Ek Açıklamalar F’de Çizelge F.2 ile verilmiştir.

Simulasyon eğrileri incelendiğinde, yaklaşık 100 μm boyutundan daha ince üründe modelden sapmanın arttığı görülmektedir. Modelin karıştırılmalı değirmene özel olmayışından bu sonuç doğaldır. Buna rağmen, iki değirmen için (r/d^*) eğrilerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. 4 dakika karıştırılmalı testin (r/d^*) eğrisel gösteriminin aynı süreli bilyalı değirmeninkinden daha yüksek çıkması beklenmektedir.



Şekil 4.52 Karıştırıcı değirmende deneysel ve simulasyon elek altı eğrileri.

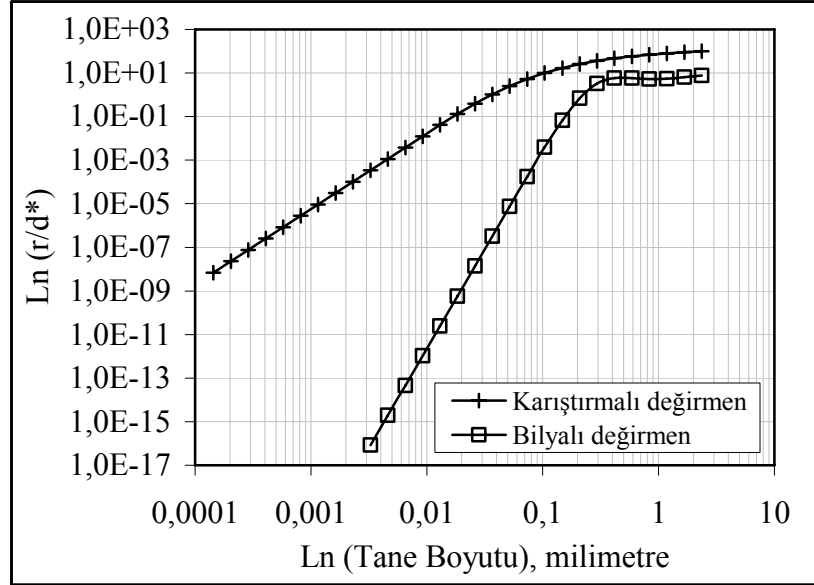
Şekil 4.53’de, karıştırıcı değirmene ait $\ln$ (Tane Boyutu)’na karşılık çizilen $\ln (r/d^*)$ eğrileri tüm öğütme süreleri için gösterilmiştir.



Şekil 4.53 Karıştırıcı değirmen $\ln$ (Tane Boyutu)’na karşı $\ln (r/d^*)$ eğrileri.

Şekil 4.53 incelendiğinde, (r/d^*) eğrilerinin zamana bağlı olarak bilyalı değirmen testlerinde olduğu gibi paralel kaydığını görülmektedir.

Bu noktada, testlerde ortak öğütme süresi olan 4 dakika temel alındığında (r/d^*) değerinin etkin öğütme verimine paralel olarak karıştırmalı değirmende, bilyalı değirmene göre daha yüksek gerçekleştiği aşağıda Şekil 4.54’de görülmektedir.



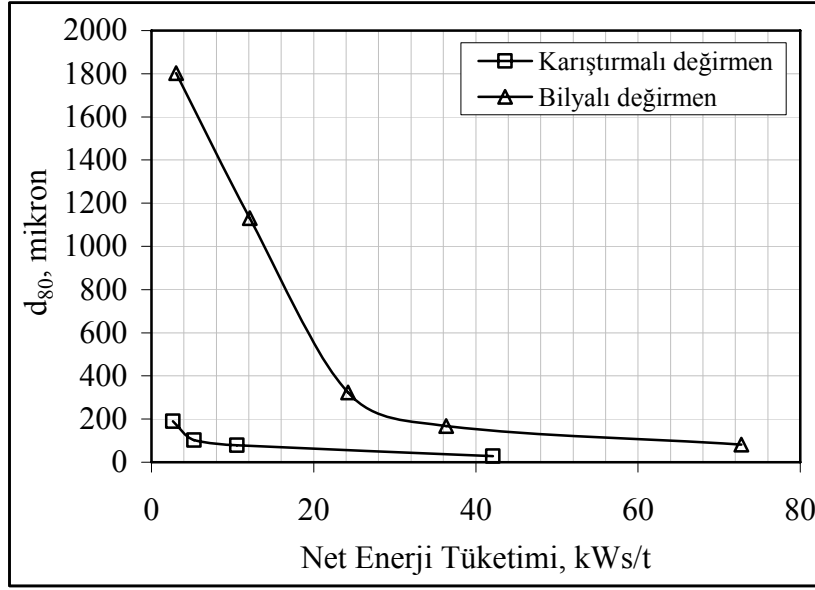
Şekil 4.54 Ln (Tane Boyutu)’na karşılık Ln (r/d^*) eğrilerinin karşılaştırılması.

Karıştırmalı değirmende simulasyon eğrileri, deneysel sonuçlarla benzeşim göstermese de, (r/d^*) eğrileri göreceli de olsa tutarlı sonuç vermiştir. Yani, karıştırmalı değirmenin, bilyalı değirmene göre daha etkin öğütme yaptığını ortaya koyan deneysel sonuçlarla tutarlılık göstermiştir.

4.5 LABORATUVAR ÖLÇEKLİ BİLYALI DEĞİRMEN VE KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE ENERJİ HARCAMALARI

ÇATES numunesinin, bilyalı değirmen ve karıştırmalı değirmende değişen sürelerde öğütülmesi sırasında harcanan enerjiler, öğütme sistemlerine inverter üzerinden bağlı olan elektrik sayacından kW’s cinsinden ölçülmüştür.

Bilyalı değirmen ve karıştırmalı değirmende ÇATES numunesinin, değişen sürelerde öğütülmesi sırasında harcanan enerjiler, d_{80} boyutu temel alınarak aşağıda Şekil 4.55’de gösterilmiş ve Ek Açıklamalar G’de Çizelge G.1 ile verilmiştir.



Şekil 4.55 Öğütmede harcanan enerjilerin karşılaştırılması.

Bilyalı değirmende 24 dakika sonunda öğütmede harcanan enerji 72,73 kWs/t olarak hesaplanmıştır. Bu süre sonunda elde edilen üründe $d_{80}=81 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. Karıştırıcı değirmende 4 dakika öğütmede harcanan enerji ise 42,12 kWs/t olarak hesaplanmıştır. 4 dakika sonunda karıştırıcı değirmende elde edilen üründe $d_{80}=28 \mu\text{m}$ 'dir. Bilyalı değirmeninde 4 dakika öğütme süresi göz önüne alındığında elde edilen üründe $d_{80}=1130 \mu\text{m}$ 'dir. Bilyalı değirmende ve karıştırıcı değirmende 4 dakika öğütme süresi sonunda alınan ürünler, boyut ve harcanan enerji açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçta; laboratuvar ölçeğinde düşünüldüğünde, karıştırıcı değirmende bilyalı değirmene göre daha az enerji tüketimi ile çok daha ince ürün boyutuna ulaşılabilirdiği belirlenmiştir.

Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmende, d_{80} boyutu $200 \mu\text{m}$ 'den ince istendiğinde, artan enerji tüketimine karşılık boyut küçültme hızının çok yavaş gerçekleşmiş olduğu görülmüştür. d_{80} boyutu $80 \mu\text{m}$ 'den ince ürün elde etmenin ise oldukça zor olduğu söylenebilir. Karıştırıcı değirmende ise $d_{80}=80 \mu\text{m}$ 'den ince ürün elde etmek mümkündür. Son yıllarda ince öğütülmüş ürün istenen bir çok sanayi dalında, öğütme devrelerinde genel eğilimin, bilyalı değirmen sonrasında karıştırıcı değirmen kullanımı yönünde olması, deneysel sonuçları desteklemektedir. Bu durum, daha az enerji tüketimi ile kısa sürede ve ince ürün eldesinde beraberinde getirmiştir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çatalağzı termik santral (ÇATES) numunesinin öğütülebilirlik özellikleri, iki kategoride yapılan deneyler sonucunda değerlendirilmiştir. Birincisi, Bond bilyalı değirmende yapılan deneyler sonucunda belirlenen “Bond iş indeksi”dir. Bond öğütme testleri sonunda, ÇATES numunesinin Bond iş indeksi 16,93 kWs/t olarak belirlenmiştir. İkinci kategori ise, Hardgrove cihazı ile yapılan deneyler sonucunda belirlenen “Hardgrove indeksi”dir. Hardgrove öğütülebilirlik deneyleri sonucunda ÇATES numunesinin Hardgrove indeksi (HGI) 77,45 olarak belirlenmiştir. Sonuçta; ÇATES katı fosil yakıtının orta zor öğütülebilir bir yapıda olduğu söylenebilir.

ÇATES’de elektrik üretimi Kozlu, Üzülmüş ve Çatalağzı lavvarlarından ve özel sahalardan elde edilen katı fosil yakıt ile yapılmaktadır. Santral yakıtı kesinlikle homojen bir yapıda olmayıp, öğütülebilirlikleri ve yanma karakteristikleri birbirinden çok farklı malzemelerin istenen kül ve kalori bazında harmanlanarak hazırlanmasıyla elde edilmektedir. Katı fosil yakıtın homojen olmayan yapısının ortaya konulabilmesi için kömür yıkama testleri (Yüzdürme- batırma testleri) yapılmıştır. Yüzdürme-batırma testleri için tamamı 3350 µm altına kırılmış ÇATES numunesi -3350+500 µm ve -500 µm olmak üzere iki ayrı boyut grubunda sınıflandırılmıştır. -3350+500 µm arasındaki malzeme kül oranı %54,58 ve 500 µm altındaki malzeme kül oranı %39,69’dur. Numune ile yapılan yüzdürme-batırma testleri -3350+500 µm arasındaki malzemede 1,4 gr/cm³ yoğunlukta yüzen miktar %26,50 ve kül oranı %8,00’dur. 1,9 gr/cm³ yoğunlukta batan miktar %58,61 ve kül oranı %80,32’dur. 500 µm altındaki malzemede ise 1,4 gr/cm³ yoğunlukta yüzen miktar %24,47 ve bu kısmın kül oranı %8,84’dür. 1,9 gr/cm³ yoğunlukta batan miktar %38,30 ve kül oranı %76,00 olarak belirlenmiştir. Birleştirilen yıkama test sonuçlarına göre, kül oranı %47,58 olan numunede 1,4 gr/cm³ yoğunlukta yüzen miktar %25,56, kül oranı %8,40’dur. 1,9 gr/cm³ yoğunlukta batan miktar %49,21 ve kül oranı %78,61’dur. Sonuç olarak; ÇATES’de kullanılan yakıtın, yüksek küllü şist ağırlıklı yapı içinde yer alan düşük küllü kömürden oluştuğu sonucuna varılmıştır.

ÇATES numunesi, Russel elek kullanarak -3350+2360 μm , -2360+1700 μm , -1180+850 μm , -425+300 μm ve -212+150 μm olmak üzere 5 ayrı dar tane boyut grubunda sınıflandırılmıştır. Öğütme deneyleri karıştırmalı değirmende ve bilyalı değirmende yapılmıştır. Karıştırmalı değirmende başlangıç deneylerinde; öğütücü ortam çapı, karıştırma hızı ve sürenin öğütme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla hazırlanan -2360+1700 μm dar tane boyut grubundaki malzeme kullanılmıştır. Farklı çaplarda (6 mm, 4 mm, 2,36 mm ve bunların ağırlıkça 1/3 oranlı karışımları) bilyalarla öğütme çalışmaları yapılmıştır. 6 mm çaplı bilyanın söz konusu dar tane boyut grubu için öğütmede daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Kırılma davranışı bilya boyutu küçüldükçe azalma eğilimindedir. 1/3 ağırlıksal oranlı bilya karışımları ile yapılan öğütme ile elde edilen kırılma davranışı, 2,36 mm boyutlu bilyaya kıyasla daha hızlı gerçekleşmekle birlikte, diğer bilya çaplarına kıyasla düşük kalmıştır. Karıştırmalı değirmende laboratuvar ölçekli yapılan çalışmalarda; 1440 dev/dk, 720 dev/dk ve 360 dev/dk karıştırma hızlarında 1 dakika öğütme süresi sonunda değirmenden çekilen enerjilerin sırasıyla 73,68 kWs/t, 27,37 kWs/t ve 10,53 kWs/t olduğu hesaplanmıştır.

Karıştırmalı değirmende öğütme çalışmaları sonunda, -425+300 μm ve -212+150 μm dar tane boyut gruplarında birinci derece kırılma davranışı gerçekleşmiştir. -1180+850 μm dar tane boyut grubunda kısmen doğrusal kırılma davranışı söz konusu iken, -3350+2360 μm ve -2360+1700 μm dar tane boyut gruplarında ise doğrusal kırılma davranışından tamamen uzaklaşmıştır. Tane boyutuna bağlı olarak kırılma davranışını değerlendirebilmek için 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. Birinci derece kırılma davranışının elde edildiği doğruların eğimlerinden de özgül kırılma hızları hesaplanmıştır. Karıştırmalı değirmende ve bilyalı değirmende kırılma davranışlarını karşılaştırabilmek için söz konusu dar tane boyut gruplarında bilyalı değirmen ile de öğütme çalışmaları yapılmıştır. Bilyalı değirmende birinci derece kırılma davranışı -1180+850 μm , -425+300 μm ve -212+150 μm dar tane boyut gruplarında gerçekleşmiş, -3350+2360 μm ve -2360+1700 μm dar tane boyut gruplarında ise doğrusal kırılma davranışından tamamen uzaklaşmıştır. Karıştırmalı değirmende yapıldığı gibi, kırılma davranışının doğrusallıktan uzaklaştığı kısımlar göz ardı edilmiş ve her bir dar tane boyut grubu için birinci derece kırılma davranışının var olduğu süreler dikkate alınmış ve doğruların eğimlerinden özgül kırılma hızları hesaplanmıştır. Sonuçta; karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende gerçekleşen özgül kırılma hızları Çizelge 5.1’de birlikte sunulmuştur.

Çizelge 5.1 Özgül kırılma hızlarının karşılaştırılması.

Dar Tane Boyut Grubu (mikron)	Karıştırmalı Değirmende Özgül Kırılma Hızı, S_i	Bilyalı Değirmende Özgül 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 μm tane boyutunda maksimuma ulaşırken, bilyalı değirmende özgül kırılma hızı 2360 μm 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.

Başlangıç boyutunun yaklaşık olarak %20-30'unun öğütüldüğü en kısa öğütme süresi temel alınarak, bu öğütme süresi sonunda alınan ürünlerin komple elek analizleri yapılmış kırılma dağılımları belirlenmiştir. Karıştırmalı değirmende bu süre 5 sn, bilyalı değirmende ise 30 sn olarak alınmıştır. Sonuçlar, Çizelge 5.2'de birlikte sunulmuştur.

Çizelge 5.2 Kırılma dağılım parametrelerinin karşılaştırılması.

Dar Tane Boyut Grubu (mikron)	Karıştırmalı Değirmende Kırılma Dağılım Parametreleri			Bilyalı Değirmende Kırılma Dağılım Parametreleri		
	ϕ	γ	β	ϕ	γ	β
-3350+2360	0,23	0,64	4,00	0,58	0,91	3,42
-2360+1700	0,63	0,90	5,50	0,74	0,94	6,62
-1180+850	0,66	0,70	2,48	0,62	0,96	5,16
-425+300	0,38	1,00	3,28	0,38	0,98	5,25
-212+150	0,15	0,31	2,23	0,10	0,49	1,96

Karıştırmalı değirmende ve bilyalı değirmende kırılma dağılım parametrelerinin tane boyutu ile değiştiği ve normalize edilemediği, dolayısıyla malzemenin başlangıç boyutlarına bağlı

oldukları belirlenmiştir. Bu noktada Φ , γ , β ve δ parametreleri doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile tekrar hesaplatılmıştır. Karıştırmalı değirmende kırılma dağılım parametreleri $\Phi=0,59$, $\gamma=1,81$, $\beta=2,71$ ve $\delta=1,00$ olarak hesaplanırken, bilyalı değirmende $\Phi=0,45$, $\gamma=0,89$, $\beta=3,39$ ve $\delta=0,10$ olarak hesaplanmıştır. Boyuttan bağımsız hesaplanmış $B_{i,1}$ değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3 Boyuttan bağımsız hesaplanmış kırılma dağılım değerleri ($B_{i,1}$).

x_i/x_1	Karıştırmalı Değirmen	Bilyalı Değirmen
	Hesaplanmış $B_{i,1}$	Hesaplanmış $B_{i,1}$
1,000	1,0000	1,0000
0,712	0,5175	0,5134
0,503	0,3135	0,3126
0,356	0,2179	0,2146
0,253	0,1639	0,1570
0,179	0,1267	0,1173
0,127	0,0991	0,0889
0,090	0,0771	0,0674
0,063	0,0597	0,0512
0,045	0,0460	0,0389
0,032	0,0353	0,0296
0,022	0,0266	0,0222

Hesaplanmış kırılma dağılım değerleri, ince boyutlarda karıştırmalı değirmenin bilyalı değirmene kıyasla ortaya koyduğu etkin öğütme nedeniyle daha yüksektir. Bu durumun, karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende $-212+150 \mu\text{m}$ ve $-425+300 \mu\text{m}$ dar tane boyut gruplarında yaklaşık olarak sırasıyla 5,5 ve 7 kat karıştırmalı değirmen lehine gerçekleşen kırılma davranışı hızlarının sonucu olduğu düşünülmektedir.

Literatürde farklı malzemeler için çeşitli araştırmacılar tarafından (Mankosa et al. 1986, Orumwense 1992, Gao and Forssberg 1995, Tüzün et al. 1995, Cho et al.1996, Karbstein et al. 1996, Zhenhua et al. 1998, Bilgili et al. 2005, 2006, Bilgili 2007) yapılan çalışmalarda karıştırmalı değirmenlerde öğütme işlemlerinde, doğrusal olmayan (non-first-order, non-linear) öğütme kinetiği geliştiği belirtilmiştir. 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 (yastıklama etkisi) 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 bakılmıştır. Şekil 5.4’de dar tane boyut gruplarında yapılan çalışma sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.4 Karıştırmalı değirmende 30 sn öğütme sonuçları.

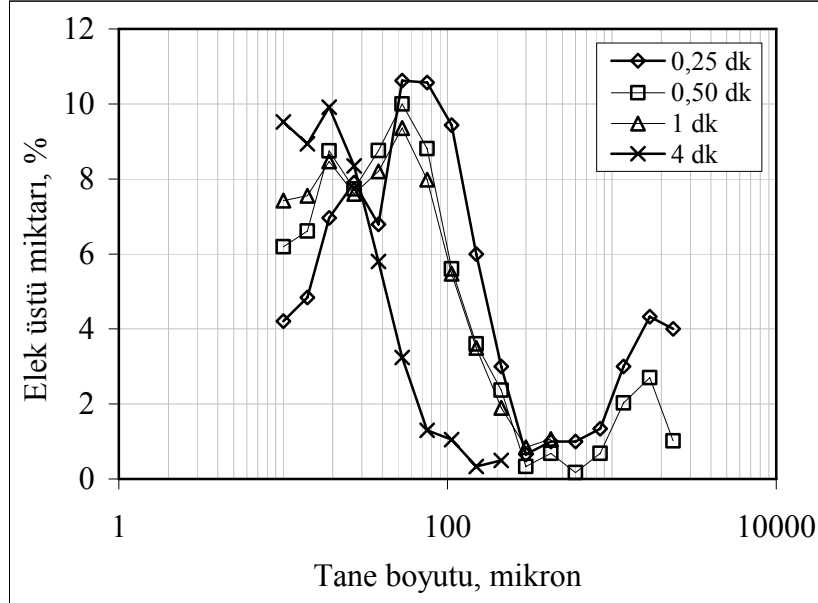
Dar Tane Boyut Grubu, Mikron	Elek Üstündeki Malzeme Miktarı, %	Elek Üstündeki Malzemede Kül, %	Elek Altındaki Malzeme Miktarı, %	Elek Altındaki Malzemede Kül, %	Hesapla Besleme Malı Kül, %	Ölçülen Besleme Malı Kül, %
-3350+2360	57,89	80,08	42,11	51,47	68,03	68,62
-2360+1700	52,52	72,87	47,48	48,25	61,18	61,59
-1180+850	47,70	67,81	52,30	40,42	53,48	53,89
-425+300	31,58	51,29	68,42	32,88	38,69	39,45
-212+150	50,11	43,33	49,89	32,11	37,73	36,85

Çizelge 5.4 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.

Tamamı 3350 μm altında olan ÇATES numunesinde d_{80} boyutu yaklaşık 2100 μm ’dir. Karıştırmalı değirmende 0,25 dk, 0,50 dk, 1 dk ve 4 dk öğütülen ÇATES numunesi öğütme ürünlerine ait d_{80} boyutları öğütme sürelerine göre sırasıyla 190 μm , 102 μm , 78 μm ve 28 μm olarak elde edilmiştir. Bilyalı değirmende 1 dk, 4 dk, 8 dk, 12 dk ve 24 dk öğütülen ÇATES

numunesi öğütme ürünlerine ait d_{80} boyutları ise öğütme sürelerine göre sırasıyla 1802 μm , 1130 μm , 324 μm , 167 μm ve 81 μm olarak belirlenmiştir. Karıştırmalı değirmende gerçekleşen öğütme, bilyalı değirmene göre çok daha hızlı olmuştur.

Karıştırmalı değirmende ÇATES numunesinin öğütülmesi sonunda elek üstünde kalan malzeme dağılımlarına ait grafik gösterim Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1 Karıştırmalı değirmende öğütme ürünü dağılım eğrisi.

Şekil 5.1’den, karıştırmalı değirmen öğütme ürününün, malzemenin homojen olmayan yapısından ötürü değişik bölgelerde dağılım göstermekle birlikte, 4 dk öğütme süresi göz önüne alındığında 10–100 μm tane boyut aralığında sınırlandığı yani karıştırmalı değirmenin dar tane boyut aralığında ürün verdiği söylenebilir.

Bilyalı değirmen ve karıştırmalı değirmende, değişen sürelerde öğütülen ÇATES numunesi ve elde edilen öğütme ürünleri, ZKÜ eğitim lisansı ile alınan JKSimMet simülasyon programı yardımıyla simüle edilmiştir. Deneysel ve simülasyon ürün boyut dağılımları birlikte incelenerek, sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. JKSimMet simülasyon programı ile deneysel çalışmalardan elde edilen veriler sistemdeki madde denkliği dikkate alınarak, deneysel sonuçlara en uygun yaklaşımı verecek şekilde istatistiksel olarak yeniden değerlendirilmiş ve hesaplanmıştır. Sonuçta; deneylerde kullanılan devrenin

performanslarının değerlendirilmesi mümkün olmuştur. JKSImMet Simulator ile bilyalı değirmen modellemesinde “mükemmel karışım modeli” kullanılmıştır. JKMRC tarafından yapılan çalışmalar halen sürmekle birlikte karıştırılmalı değirmene ait henüz bir modelleme yoktur. Bilyalı değirmenlerin aksine, yüksek devirlerde çalışmaları nedeniyle karıştırılmalı değirmenler simülasyon çalışmalarının yapılmasını sınırlamıştır. Kullanılan modelin bilyalı değirmen için geliştirilmiş bir model olması, karıştırılmalı değirmende simülasyonda sadece bir yaklaşım olabilmesi yönünden ele alınmıştır. Bilyalı değirmende deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları iyi uyum göstermiştir. Karıştırılmalı değirmende ise sapmalar belirlenmiştir. Yaklaşık 100 μm 'ye kadarki iri boyutlarda deneysel-simülasyon uyumu nispeten daha iyi iken, bu boyutdan daha ince üründe modelden sapma artmaktadır. Modelin karıştırılmalı değirmene özel olmayışından ötürüde bu sonuç doğaldır. Simülasyon çalışmalarında, her iki değirmen için (r/d^*) hesaplanarak birbirleri ile göreceli olarak karşılaştırma yapabilmek amaçlanmıştır. Karıştırılmalı değirmende 4 dakika öğütme süresi için çizilen (r/d^*) eğrisinin, bilyalı değirmende aynı süreye karşılık çizilen (r/d^*) eğrisinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, karıştırılmalı değirmende, bilyalı değirmenden daha etkin öğütmenin gerçekleştiğini desteklemiştir.

ÇATES numunesinin, laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen ve karıştırılmalı değirmende değişen sürelerde öğütülmesi sırasında harcanan enerjiler, d_{80} boyutu baz alınarak karşılaştırılmıştır. Bilyalı değirmende 24 dakika sonunda öğütmede harcanan enerji 72,73 kW/t olarak hesaplanmıştır. Bu süre sonunda elde edilen üründe d_{80} boyutu 81 μm olarak tespit edilmiştir. Karıştırılmalı değirmende 4 dakika öğütmede harcanan enerji ise 42,12 kW/t olarak hesaplanmıştır. 4 dakika sonunda elde edilen üründe d_{80} boyutu 28 μm 'dir. Bilyalı değirmende 4 dakika öğütme süresi göz önüne alındığında elde edilen üründe d_{80} boyutu 1130 μm 'dir. Laboratuvar ölçekte bilyalı değirmende ve karıştırılmalı değirmende öğütmede harcanan enerjiler karşılaştırıldığında, karıştırılmalı değirmende çok daha ekonomik öğütme gerçekleşmiştir.

Boyut küçültme işleminin yoğun olarak yapıldığı endüstriyel tesislerin başında yer alan termik santrallerde, yüksek ısı kapasitesi ve yüksek yanma verimliliği için kömürün mikronize boyuta öğütülerek yakılması (pulverize enjeksiyon yöntemi) zorunluluğu, öğütme sistemlerinin harcanan enerji ve boyut küçültme randımanları açısından değerlendirilmesi zorunluluğunu da beraberinde getirmiştir. Elektrik enerjisi üretiminde yapılan toplam harcama içinde, öğütme maliyetleri önemli bir yer kaplamaktadır. Öğütülebilirlik özellikleri

birbirinden çok farklı homojen yapıda olmayan malzemelerin, sadece istenilen kül ve kalori özelliklerini sağlayacak şekilde harmanlanarak değirmenlerde aynı öğütme koşullarında öğütülmeleri, öğütme sistemine bağlı olarak az çok değişmekle birlikte, değirmen içinde ve yakma kazanında sorunlara neden olmaktadır.

Yapılan bu doktora tez çalışması ile karıştırmalı tip değirmenin basit işletim koşulları, yüksek boyut küçültme oranlarında mikronize öğütme yapabilmeleri ve düşük enerji sarfı nedeniyle termik santral katı fosil yakıtlarının öğütülmesinde mevcut öğütme sistemlerine alternatif olabileceği ortaya konulmaya çalışılmıştır.

ÇATES’de mevcut çarpmalı değirmenler saatte 26 ton kömür öğütmektedir. Değirmenden alınan öğütülmüş üründe d_{80} boyutu yaklaşık 100 μm ’dir. Öğütme sırasında değirmen 470 kWs enerji çekmektedir. Yani, öğütmede harcanan enerji yaklaşık olarak 18 kWs/t’dur. Laboratuvar ölçekte karıştırmalı değirmende mevcut çalışma şartları ile (motor-redüktör tipi) yapılan deney çalışmaları, d_{80} boyutu 102 μm ’ye 0,5 dk öğütme süresi sonunda 5,27 kWs/t enerji harcanarak ulaşıldığını ortaya koymuştur. Endüstriyel ölçekte sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek bu noktada uzak olmakla birlikte, mevcut veriler, ölçek büyütme çalışmaları yapıldığında, karıştırmalı değirmende öğütmenin hali hazırda kullanılan değirmenlere alternatif olabileceği yönünde iyimser sonuçlar ortaya koymuştur.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hardgrove indeksi 77,45 ve Bond iş indeksi 16,93 kWs/t olan ÇATES katı fosil yakıtının öğütülebilirliğinin, orta derecede zor olduğu söylenebilir.

ÇATES’de kullanılan yakıtın, yüksek küllü şist ağırlıklı yapı içinde yer alan düşük küllü kömürden oluştuğu belirlenmiştir. Homojen olmayan söz konusu şist-kömür özellikli katı fosil yakıtın, santraldeki değirmenlerde karşılaşılan öğütme problemlerinin temelini oluşturduğu düşünülmektedir.

Laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmende, bilya çapı/değirmene beslenen maksimum tane boyutu arasında en az 2,5 gibi bir oransal ilişki olduğunda kırılma hızının optimal değere ulaşabileceği belirlenmiştir.

Laboratuvar ölçekte 360 dev/dk karıştırma hızının enerji tüketiminde ekonomik olduğu ortaya konmuştur. Ancak, endüstriyel ölçekte düşünüldüğünde, uygun redüktör ve motor bağlantısı ile laboratuvar ölçekli deneylerde daha ince öğütmenin gerçekleştiği 760 dev/dk karıştırma hızının teknik ve ekonomik açıdan incelenmesi yerinde olacaktır.

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, karıştırmalı değirmende bilyalı değirmene kıyasla daha hızlı öğütmenin yapıldığının, başka bir deyişle daha ince öğütme ürünü eldesinin bir sonucudur.

ÇATES numunesinin öğütülmesi sırasında, düşük küllü (kömür özellikli) kısım yüksek küllü (şist özellikli) kısma göre daha hızlı kırılmaya uğramaktadır. Sonuçta; gelişen öğütme süresine paralel olarak, elek üstünde kalan kısım daha zor öğütülebilir özellikli olan şistlerden ibaret olmakta ve kırılma davranışı yavaşlamaktadır. Ayrıca, hızla kırılan düşük küllü kısmın

oluşturduğu ince taneler öğütücü ortam ve iri malzeme üzerini kaplamakta ve bu durumda öğütme hızında yavaşlamaya neden olmaktadır. Deneysel çalışmalarla belirlenen kırılma davranışındaki doğrusallıktan sapma da bu sebeple ortaya çıkmıştır.

Bilyalı değirmenden elde edilen öğütme ürünlerinde, deneysel sonuçlar ile simulasyon sonuçları oldukça iyi benzeşim göstermiştir. Karıştırmalı değirmende ise deneysel sonuçlar ile simulasyon eğrilerinin, uygulanan modelin karıştırmalı değirmene özel olmayışından dolayı uyumlu olmadığı belirlenmiştir. Karıştırmalı değirmende 4 dakika öğütme testine ait (r/d^*) eğrisin aynı süreli bilyalı değirmendekinden yüksek çıkması, karıştırmalı değirmende daha etkin öğütmenin gerçekleştiğini desteklemiştir.

Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmende ve karıştırmalı değirmende öğütmede harcanan enerjiler karşılaştırıldığında, karıştırmalı değirmende çok daha ekonomik öğütme gerçekleşmiştir.

Karıştırmalı değirmende gerçekleşen öğütme, bilyalı değirmene göre çok daha hızlı olmuştur. 4 dakika öğütme süresi için d_{80} boyutundaki değişim oranı baz alınır (d_{80} bilyalı değirmen/ d_{80} karıştırmalı değirmen=1130/28≈40), karıştırmalı değirmen ürününde d_{80} boyutunun bilyalı değirmen ürününden 40 kat ince olduğu belirlenmiştir.

Karıştırmalı değirmen 4 dakika öğütme süresi göz önüne alındığında, öğütme ürününün 10–100 μ m tane boyut aralığında sınırlandığı yani karıştırmalı değirmenin dar tane boyut aralığında ürün verdiği söylenebilir.

Bu çalışma kapsamında sunulan laboratuvar ölçekli deneysel veriler, öğütme sonucunda alınan ürünlerin boyutları ve harcanan enerji değerleri açısından yorumlanmıştır. Sonuç olarak; karıştırmalı değirmende ölçek büyütme çalışmalarının da yapılması durumunda, karıştırmalı değirmende yapılacak öğütme işleminin, ÇATES’de mevcut çarpmalı tip değirmenlerden daha etkin ve ekonomik olarak gerçekleşeceği yönünde iyimser sonuçlar ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

- Anon.** (2002) Energy saving ultra fine grinding with the SALA agitated mill. *Zement-Kalk-Gips*, 46: 600-601.
- Arslan V** (2006) Kuru kömür hazırlama yöntemleri. *Madencilik dergisi*, 45(3), 9-18.
- 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 and Bahatia V K** (1971) Experimental methods for grinding studies in laboratory mills. *Powder Technology*, 5: 261-266.
- Austin L G and Luckie P T** (1971) Methods for determination of breakage distribution parameters. *Powder Technology*, 5: 215-222.
- Austin L G, Shoji K, Bahatia V K, Jindal V, Savage K and 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, Bagga P and Celik M** (1981) Breakage properties of some materials in a laboratory ball mill. *Powder Technology*, 28: 235-241.
- Austin L G, Shoji K and Bell D** (1982a) Rate equations for non-linear breakage in mills due to material effects. *Powder Technology*, 31: 127-133.
- Austin L G, Klimpel R R, Luckie P T and Rogers R S C** (1982b) Simulation of grinding circuits for design. *Design and Installation of Communitaion Circuits, SME/AIME*, 301-324.
- Austin L G and Brame K** (1983) A comparison of the bond method for sizing wet tumbling ball mills with a size-mass balance simulation model, *Powder Technology*, 34: 261-274.
- Austin L G, Klimpel R R and Luckie P T** (1984) The process engineering of size reduction: ball milling. *SME-AIME*, New York, 561 pp.
- Aydoğan N A ve Ergün L** (2004) Yüksek basınçlı merdaneli değirmenler, *Madencilik dergisi*, 43 (3): 27-37.
- Benzer F, Ergün L, Lynch A J, Oner M, Gunlu A, Celik I B and Aydogan N** (2001) Modelling cement grinding circuits. *Minerals Engineering*, 14(11): 1469-1482.
- 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.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- 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 and Scarlett B** (2004) Production of pigment nanoparticles using a wet stirred mill with polymeric media. *China Particuology*, 2(3): 93-100.
- Bilgili E, Hamey R and 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 and 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.
- Bond F K and Maxon WL** (1938) Standart grindabilty test and calculations. *Trans. SME/AIME*, 153: 362-372.
- Bond F C** (1947) Standart grindabilty test and calculations. *Trans. SME/AIME*, 183: 313-329.
- Bond F C** (1951) Third theory of comminution. *Trans. AIME*, 193: 484-494.
- Bond F C** (1961) Crushing and grinding with pyroprocessing. *Pit and Quarry*, 162-166.
- Bowdish F K** (1960) Theoretical and experimental studies of kinetics of grinding in a ball mill. *Trans. SME/AIME*, 217: 194-202.
- 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.
- ÇATES (2007)** Çatalağzı termik santralı teknik notları, Çatalağzı, Zonguldak, 36 s.
- Deniz V** (2004) Relationship between bond's grindability and breakage parameters of grinding kinetic on limestone. *Powder Technology*, 139: 208-213.
- Ding H, Lu S, Dendg Y and Du G** (2007) Mechano-activated surface modification of calcium carbonate in wet stirred mill and it's properties. *Transections of Nonferrous Metals Society of China*, 17: 1100-1104.
- 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.
- Doğru T ve Ergün L** (2004) KBİ Samsun bakır izabe tesisleri curuf öğütme devresinin modellenmesi ve simulasyonu. *Madencilik*, 43(3): 13-26.
- Epstein B** (1948) Logarithmico-normal distribution in breakage of solids. *Ind. Eng. Chem.*, 40: 289-291.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Erdem A S, Ergün L ve Benzer H** (2005) Modelleme yardımıyla çimento öğütme devresi tasarımı Morrell ve Man yönteminin sınanması, *Madencilik dergisi*, 44 (4): 3-7.
- Erdem A S, Ergün Ş L ve Benzer H** (2007) Modelleme ve simulasyon yardımıyla çimento öğütme devresi tasarımı ve kamaralı bilyalı değirmen seçimi, *Madencilik dergisi*, 46(4): 21-30.
- Ereğli Lafarge** (2006) Çimento Fabrikası öğütme tesisi eğitim notları, 9 s.
- Ergin H** (1999) *Boyut Küçültme Teknolojisi: Çimento Öğütme Devrelerinin Modelleme ve Simulasyonlu Optimizasyonu*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento Endüstrisi-Üniversite İşbirliği Araştırma Projesi Raporu (ÜNİPR 96/09), 133 s.
- Fadhel H and Frances C** (2001) Wet batch grinding of alumina in a stirred bead mill. *Powder Technology*, 119: 257-268.
- Finch J A and Ramirez Castro J** (1981) Modelling mineral size reduction in the closed circuit ball mill at the pine point mines concentrator. *International Journal of Mineral Processing*, 8: 61-78.
- Fuerstenau D W, De A and Kapur P C** (2004) Linear and nonlinear particle breakage process in comminution systems. *International Journal of Mineral Processing*, 74: 317-327.
- Gardner R P and Austin L G** (1962) A chemical engineering treatment of batch grinding, Part I and II. *Symposium Zerleinen*, Duddeldorf, pp. 217-248.
- 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.
- Gumtz G D and Fuerstenau D W** (1970) Simulation of locked-cycle grinding. *Trans. SME/AIME*, 247: 330-335.
- Güher M** (2007) Kişisel görüşme, Çatalağzı Termik Santrali, Zonguldak.
- Hardgrove R M** (1938) Grindability of coal. *Trans. ASME, Fuels and Steam Power FSP*, 54(5): 37-46.
- Herbst J A and Fuerstenau D W** (1968) The zero order production of fine sizes in comminution and its implications in simulation. *Trans. SME/AIME*, 241: 538-548.
- Herbst J A and Fuerstenau D W** (1972) Influence of mill speed and ball loading on the parameters of the batch grinding equation. *Trans. SME/AIME*, 252: 169-176.
- Herbst J A and Fuerstenau D W** (1980) Scale-up procedure for continuous grinding mill design population balance models. *International Journal of Mineral Processing*, 7: 1-31.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Horst W E** (1985) General aspects of comminution. *SME Mineral Processing Handbook*, ed. N L Weis, Littleton, Colorado, 2: 4-6.
- Hukki R T** (1961) Proposal for solomonic settlement between the theories of Von Rittinger, Kick and Bond. *Trans. AIME*, 220: 403-408.
- İpek H** (2003) Seramik Hammadde Karışımlarının Öğütülebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi (yayımlanmamış), Osmangazi Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Müh. Anabilim Dalı, Eskişehir, 181 s.
- İpek H, Üçbaş Y, Yekeler M and Hoşten C** (2005) Dry grinding kinetics of binary mixtures of ceramic raw materials by bond milling. *Ceramic International*, 31(8): 1065-1071.
- İpekoğlu Ü ve Tanrıverdi M** (2002) *Cevher Hazırlama Ders Notları*, Dokuz Eylül Üniv., Müh. Fak. Maden Mühendisliği Bölümü, 3. baskı, İzmir, 194 s.
- 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)*, 2: 291-297.
- Kapur P C** (1970a) Kinetics of batch grinding, Part A: reduction of grinding equation. *Trans. SME/AIME*, 247: 299-303.
- Kapur P C** (1970b) Kinetics of batch grinding, Part B: an approximate solution to the grinding equation. *Trans. SME/AIME*, 247: 309-313.
- Karbstein H, Müller F and Polke R** (1996) Scale-up for grinding in stirred ball mills. *Aufbereitungs-Technik*, 37 (10): 469-479.
- Kavetsky A and Whiten W J** (1982) Scale-up relations for industrial ball mills. *Proceedings of AusIMM*, 282: 47-55.
- Kaytaz Y** (1990) *Cevher Hazırlama*, İTÜ Matbaası, İstanbul, 125 s.
- Kelsall D F, Reid K J and Restarick C J** (1967) Continuous grinding in a small wet ball mill, Part I: A study of the influence of ball diameter. *Powder Technology*, 1: 291-300.
- Kick F** (1885) *Das Gesetz der Proportionalem Widerstand und Seine Anverdung*, Leipzig.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Klimpel R R and 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.
- Klimpel R R and Austin L G** (1977) The back calculation of specific rates of breakage and non-normalized breakage distribution parameters from batch grinding data. *International Journal of Mineral Processing*, 4: 7-32.
- Kwade A, Blecher L and Schwedes J** (1996) Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 2: stress intensity and its effect on comminution. *Powder Technology*, 86: 69-76.
- Kwade A** (1999) Wet comminution in stirred media mills-research and its practical application. *Powder Technology*, 105: 14-20.
- Kwade A and 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** (1977) *Mineral Crushing and Grinding Circuits: Their Simulation, Optimisation, Design and Control*, Elsevier Scientific Publishing Company, 342 pp.
- Lynch A J and Lees M J** (1985) Simulation and modeling. *Mineral Processing Handbook*, Chap. 3, Sec. 6, SME/AIME Publ. N. Y.
- Lynch A J, Whiten W J and 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 and Moys M H** (2006) Towards optimising ball-milling capacity: effect of lifter design. *Minerals Engineering*, 19: 1439-1445.
- Man Y T** (2000) A model-based procedure for scale-up of wet overflow ball mills. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre Department of Mining, Minerals and Materials Engineering, Degree of Doctor of Philosophy, The University of Queensland, Australia.
- 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.
- Mcintyre A and Plitt L R** (1980) The interrelationship between Bond and Hardgrove grindabilities. *CIM Bulletin*, 149-155.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Miranda S and Yaeger S** (1998) Homing on the best size reduction method. *Chemical Engineering*, 105: 102-110.
- Morrell, S., Man, Y. T., 1997**; Using modelling and simulation for the design of full scale ball mill circuits, *Minerals Engineering*, 10(12): 1311-1327.
- Murphy A, Gao M and Vargas A** (2000) IsaMill: New tool for improving plant recoveries, mount isa mines ltd., 12 pp.
- Napier Munn T J, Morrell S, Morrison R D and Kojovic T** (1996) *Mineral comminution circuits their operation and optimisation*, ed. T. J. Napier Munn, 413 pp.
- Orumwense O A and Forssberg E** (1992) Super-fine and ultra-fine grinding - a literature survey. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 11(1-2): 107-127.
- Önal G ve Ateşok G** (1994) *Cevher Hazırlama El Kitabı*, İstanbul, 501 s.
- Özdağ H** (2000) *Cevher Hazırlama*. Osmangazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Maden Mühendisliği Bölümü, II. Baskı, Eskişehir, 115 s.
- Özkan A and Yekeler M** (2003) Fine dry grinding of zeolite in a laboratory ball mill. *Particle&Particle Systems Characterization*, 20: 276-282.
- Pilevneli C C** (2003) Bilyalı Bir Karıştırılmalı Değirmende İnce Boyutlu Klinker Öğütmesinin İncelenmesi. Doktora Tezi (yayımlanmamış), Karaelmas Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 159 s.
- Pilevneli C C, Kızıgut S, Toroğlu İ, Çuhadaroğlu D and Yiğit E** (2003), Open and closed circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical stirred mill. *Powder Technology*, 139: 165-174.
- Prasher C L** (1987) *Crushing and Grinding Process Handbook*, John Wiley&Sons Ltd., GB, 474 pp.
- Reid K J** (1965) A solution to the batch grinding equation. *Chem. Eng. Science*, 20: 953-963.
- Rittinger P R** (1867) *Lehrbuch der Aufbereitungs Kunde*, Ernst and Korn, Berlin.
- Roberts E J** (1950) The probability theory of wet ball milling and it's applications. *Trans. SME/AIME*, 187: 267-272.
- Rowland C A** (1982) Selection of rod mills, ball mills, pebble mills and regrind mills. *Design and Installation of Comminution Circuits*, SME/AIME, 393-438.
- Schmidt R C and Huber M A** (1996) Turbine classifiers for coal pulverizers. *Cement Industry Technical Conference*, 0-7803-3014-51/96 IEEE-IAS, 201-224.
- Schönert K** (1979) Aspects of the physics of breakage relevant to comminution. 4th *Tewksbury Symposium*, University of Melbourne, Australia, 3.1-3.30.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Schönert K und Knobloch O** (1984) Energetische aspekte des zerkleinerns spröder stoffe. *Zement-Kalk-Gips*, 37(11): 563-568.
- Schönert K** (1988) Aspects of very fine grinding, *Challenges in Mineral Processing*, Society of Mining Engineers, California, USA.
- 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.
- Sinnott M, Clearly P W and Morrison R** (2006) Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 2- coherent flow structures, liner stres and wear, mixing and transport. *Minerals Engineering*, 19: 1551-1572.
- Su O, Akçın N A ve Toroğlu İ** (2004) Kömürün öğütülebilirliği ile dayanım ve indeks özellikleri arasındaki ilişkiler, *Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, Zonguldak, 77-86.
- Sönmez B** (1992) Gümüş Cevherinin Kırılma Parametrelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Öğütme Devresinin Benzetimi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Ün., Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 112 s.
- Swedala** (1993) Energy-saving ultra-fine grinding with the SALA agitated mill, *Zement-Kalk-Gips*, 46(9): 600-601.
- Teke E** (1999) Kalsit ve Baritin İnce Öğütme Kinetiğinin Analizi. Doktora Tezi (yayımlanmamış), Cumhuriyet Ün., Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas, 134 s.
- Teke E, Yekeler M, Ulusoy U and Canbazoglu 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 and 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.
- T.S.E** (1989) Öğütme iş indeksi tayini, TS 7700.
- URL-1** (2008) <http://www.metsominerals.com>, crushing, Barmac brochure, 14.06.2008.
- URL-2** (2008) http://www.pall.com/pdf/PGCOALENa_3_071107.pdf, Pall, Ring-Roll mills, 20.06.2008.
- Wang Y and Forssberg E** (2000) Product size distribution in stirred media mills. *Minerals Engineering*, 13: 459-465.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- 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., 8 pp.
- Whiten W J** (1976) Ball mill simulation using small calculators. *Proceedings AusIMM*, 258: 47-53.
- Wills B A** (1985) *Mineral Processing Technology*, 3rd Ed., Pergamon Press, GB, 630 pp.
- Yang R Y, Jayasundara C T, Yu A B and Curry D** (2006) DEM Simulation of the flow of grinding media in Isa mill. *Minerals Engineering*, 19: 984-994.
- Yekeler M, Ozkan O, Kaya O ve Coskun F** (1999) Klinkerin öğütme kinetiği ve ürünlerin boyut dağılımının simülasyonu. 3. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 201-207.
- Yekeler M, Ozkan O and Austin L G** (2001) Kinetics of fine wet grinding in a laboratory ball mill. *Powder Technology*, 114: 224-228.
- 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 s.
- Yıldırım İ ve Kaytaş Y** (1996) Boyut küçültme teknolojisindeki gelişmeler, *I. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, 287-301.
- Yıldız N** (1999) *Öğütme Teorisi, Uygulaması: Değirmenler ve Sınıflandırıcılar*. Kozan Ofset Matbaacılık ve Tic. Ltd. Şti., Ankara, 219 s.
- Yiğit E** (1997) *Cevher Hazırlama*. ZKÜ Müh. Fak. Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, 182 s.
- Young M F and Gao M** (2000) performace of the Isa Mills in the George Fisher flowsheet. *Proceedings of AusIMMM Seventh Mill Operators' Conference*, Kalgoorlie, western Australia, 12-14 October, s.75-81.
- Yue J and Klein B** (2005) Particle breakage kinetics in horizontal stirred mills. *Minerals Engineering*, 18: 325-331.
- Zhenhua M, Sian H, Shaoming Z and Xinzhang P** (1998) Breakage behavior of quartz in a laboratory stirred ball mill. *Powder Technology*, 100(1): 69-73.

EK AÇIKLAMALAR A

YIKAMA (YÜZDÜRME-BATIRMA) TEST SONUÇLARI

Çizelge A.1 ÇATES numunesi -3350+500 µm yıkama sonuçları.

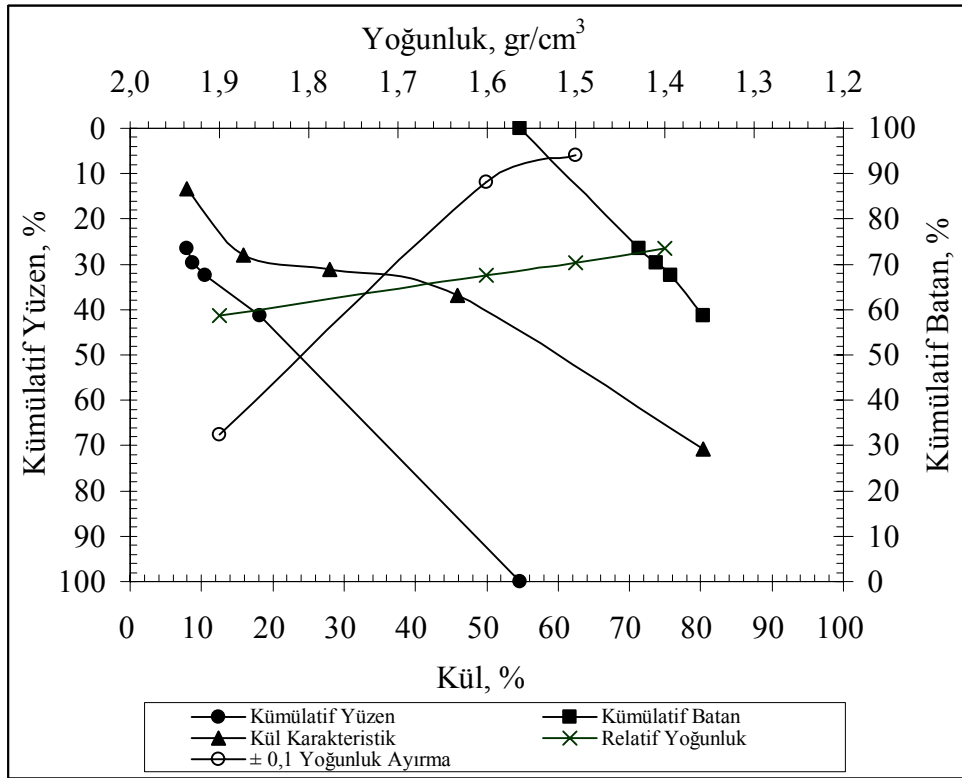
Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzen Malda			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan			y=a ₀ +a ₁ /2
	% Ağ.	% Kül	İçerik	% Ağ.	İçerik	% Kül	% Ağ.	İçerik	% Kül	
Yüzen - 1,4	26,50	8,00	212,03	26,50	212,03	8,00	100,00	5458,04	54,58	13,25
1,4 - 1,5	3,06	15,86	48,50	29,56	260,53	8,81	73,50	5246,01	71,38	28,03
1,5 - 1,6	2,96	27,94	82,60	32,52	343,13	10,55	70,44	5197,51	73,79	31,04
1,6 - 1,9	8,87	45,90	407,06	41,39	750,19	18,13	67,48	5114,91	75,80	36,95
Batan - 1,9	58,61	80,32	4707,85	100,00	5458,04	54,58	58,61	4707,85	80,32	70,69
Toplam	100,00	54,58								

Çizelge A.2 ÇATES numunesi -500 µm yıkama sonuçları.

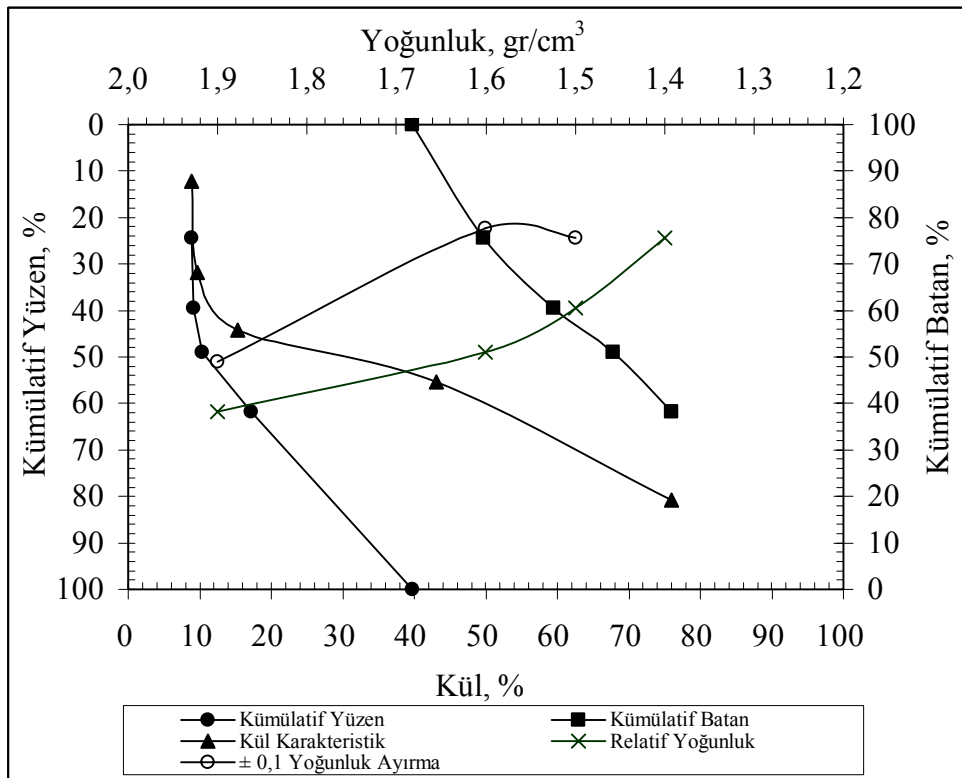
Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzen Malda			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan			y=a ₀ +a ₁ /2
	% Ağ.	% Kül	İçerik	% Ağ.	İçerik	% Kül	% Ağ.	İçerik	% Kül	
Yüzen - 1,4	24,47	8,84	216,31	24,47	216,31	8,84	100,00	3969,33	39,69	12,24
1,4 - 1,5	14,89	9,71	144,58	39,36	360,90	9,17	75,53	3753,02	49,69	31,92
1,5 - 1,6	9,57	15,32	146,61	48,93	507,51	10,37	60,64	3608,44	59,51	44,15
1,6 - 1,9	12,77	43,15	551,03	61,70	1058,53	17,16	51,07	3461,83	67,79	55,32
Batan - 1,9	38,30	76,00	2910,80	100,00	3969,33	39,69	38,30	2910,80	76,00	80,85
Toplam	100,00	39,69								

Çizelge A.3 ÇATES numunesi -3350 µm (birleştirilmiş) yıkama sonuçları.

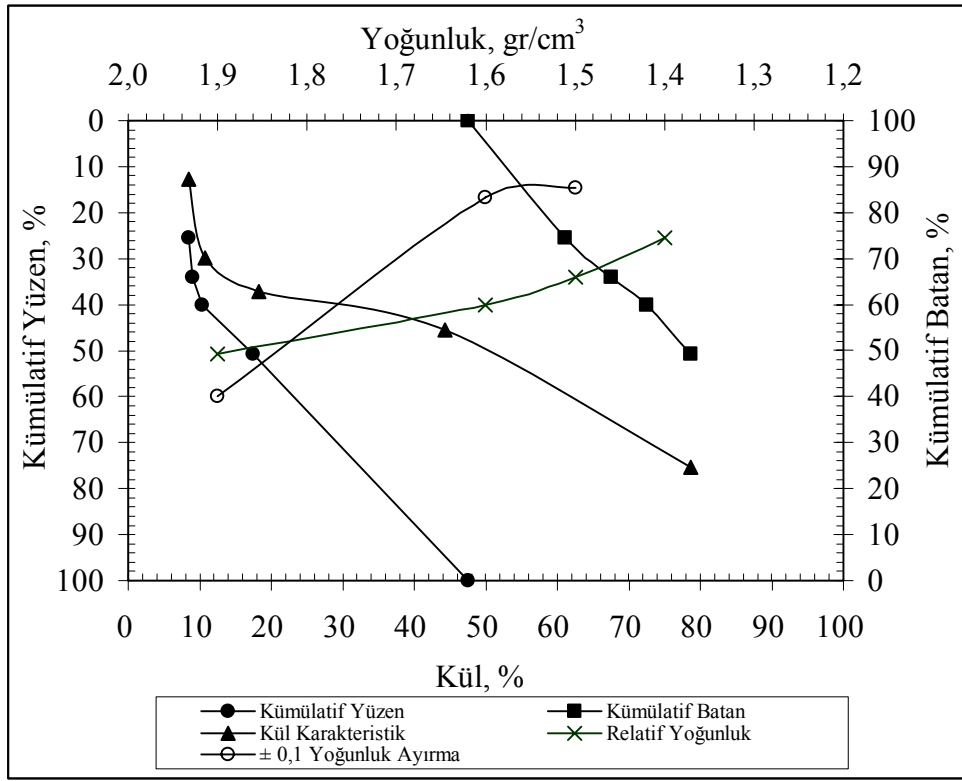
Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzen Malda			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan			y=a ₀ +a ₁ /2
	% Ağ.	% Kül	İçerik	% Ağ.	İçerik	% Kül	% Ağ.	İçerik	% Kül	
Yüzen - 1,4	25,56	8,40	214,80	25,56	214,80	8,40	100,00	4757,80	47,58	12,78
1,4 - 1,5	8,54	10,76	91,84	34,10	306,64	8,99	74,44	4542,99	61,03	29,83
1,5 - 1,6	6,02	18,30	110,13	40,12	416,77	10,39	65,90	4451,16	67,54	37,11
1,6 - 1,9	10,67	44,28	472,66	50,79	889,43	17,51	59,88	4341,03	72,49	45,45
Batan - 1,9	49,21	78,61	3868,37	100,00	4757,80	47,58	49,21	3868,37	78,61	75,40
Toplam	100,00	47,58								



Şekil A.1 -3350+500 µm yıkama sonuçlarını değerlendirme eğrileri.



Şekil A.2 -500 µm yıkama sonuçlarını değerlendirme eğrileri.



Şekil A.3 -3350 µm yıkama sonuçlarını değerlendirme eğrileri.

EK AÇIKLAMALAR B

BİLYALI DEĞİRMENDE BOND TESTLERİ

Çizelge B.1 ÇATES numunesi elek analiz sonuçları (Şekil 4.2).

Elek Boyutu (mikron)	Ağırlık (%)	E.A. (%)	E.Ü. (%)
-3350+2360	15,96	100,00	15,96
-2360+1700	11,12	84,04	27,07
-1700+1180	7,98	72,93	35,05
-1180+850	8,10	64,95	43,15
-850+600	10,00	56,85	53,15
-600+425	8,99	46,85	62,14
-425+300	6,57	37,86	68,71
-300+212	6,18	31,29	74,89
-212+150	6,19	25,11	81,08
-150+106	4,22	18,92	85,30
-106+75	2,14	14,70	87,44
-75+53	2,31	12,56	89,75
-53+38	1,91	10,25	91,66
-38	8,34	8,34	100,00

Çizelge B.2 Bond deney ürünü elek analiz sonuçları (Şekil 4.2).

Elek Boyutu (mikron)	Ağırlık (%)	E.A. (%)	E.Ü. (%)
-150+141	12,48	100,00	12,48
-141+121	7,13	87,52	19,61
-121+104	7,15	80,39	26,76
-104+89	6,70	73,24	33,46
-89+76	6,20	66,54	39,65
-76+66	5,67	60,35	45,32
-66+56	5,13	54,68	50,45
-56+48	4,61	49,55	55,06
-48	44,94	44,94	100,00

Çizelge B.3 ÇATES numunesi Bond öğütülebilirlik deney sonuçları.

Elek Açıklığı, μm	150							
Besleme miktarı, x (gr)	918,60							
Besleme F_{80} , μm	2100							
Ürün P_{80} , mikron	120							
Beslemedeki -150 μm %'si	18,92							
İdeal ürün, (x/3,5)	262,46							
Öğütülebilirlik, G_{bp}	1,3963							
İş İndeksi, kWs/t	16,93							
Deney No	Devir Sayısı (dev./dk)	Üründeki +150 μm (gr)	Yeni Besleme (gr)	Yeni Beslemedeki -150 μm (gr)	Net Ürün (gr)	G_{bp}	Devreden Yük %250	Sonraki Devir Sayısı
Başlama			918,6	173,80				100,00
1	100	549,60	369,0	69,81	195,20	1,9520	192,64	98,69
2	99	674,10	244,5	46,26	174,69	1,7701	216,20	122,14
3	122	682,20	236,4	44,73	190,14	1,5567	217,73	139,86
4	140	663,80	254,8	48,21	210,07	1,5020	214,25	142,65
5	143	664,80	253,8	48,02	205,59	1,4413	214,44	148,78
6	149	660,50	258,1	48,83	210,08	1,4120	213,62	151,29
7	151	658,60	260,0	49,19	211,17	1,3958	213,27	152,80
8	153	656,20	262,4	49,65	213,21	1,3954	212,81	152,51
9	153	655,80	262,8	49,72	213,15	1,3976	212,74	152,21

EK AÇIKLAMALAR C

KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE DAR TANE BOYUT GRUPLARINDA KIRILMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Çizelge C.1 1440 dev/dak karıştırma hızında yapılan deneylerin sonuçları (Şekil 4.4).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn		10 sn		15 sn	
	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)
-2360+1700	15,81	100,00	8,48	100,00	6,76	100,00
-1700+1180	17,86	84,19	13,67	91,52	10,61	93,24
-1180+850	10,55	66,33	7,04	77,84	5,15	82,63
-850+600	6,76	55,78	4,59	70,80	3,05	77,48
-600+425	6,71	49,02	4,44	66,21	2,99	74,43
-425	42,31	42,31	61,78	61,78	71,44	71,44

Çizelge C.2 720 dev/dak karıştırma hızında yapılan deneylerin sonuçları (Şekil 4.5).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn		10 sn		15 sn	
	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)
-2360+1700	42,83	100,00	32,90	100,00	23,38	100,00
-1700+1180	23,22	57,17	23,77	67,10	23,21	76,62
-1180+850	9,43	33,95	10,44	43,33	11,25	53,41
-850+600	5,33	24,51	6,10	32,88	6,64	42,16
-600+425	4,44	19,18	5,02	26,78	6,09	35,51
-425	14,74	14,74	21,76	21,76	29,43	29,43

Çizelge C.3 360 dev/dak karıştırma hızında yapılan deneylerin sonuçları (Şekil 4.6).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn		10 sn		15 sn	
	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)
-2360+1700	71,65	100,00	62,01	100,00	54,56	100,00
-1700+1180	16,17	28,35	19,19	37,99	21,59	45,44
-1180+850	3,81	12,18	5,53	18,79	6,78	23,86
-850+600	1,82	8,37	2,71	13,26	3,52	17,08
-600+425	1,36	6,55	2,25	10,55	3,11	13,56
-425	5,19	5,19	8,31	8,31	10,44	10,44

Çizelge C.4 Öğütme süresinin kırılma davranışına etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları (Şekil 4.7).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn		10 sn		15 sn		25 sn		35 sn	
	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)
-2360+1700	71,65	100,00	62,01	100,00	54,56	100,00	45,44	100,00	40,64	100,00
-1700+1180	16,17	28,35	19,19	37,99	21,59	45,44	23,56	54,56	23,41	59,36
-1180+850	3,81	12,18	5,53	18,79	6,78	23,86	7,75	31,00	8,96	35,95
-850+600	1,82	8,37	2,71	13,26	3,52	17,08	4,49	23,24	4,22	26,99
-600+425	1,36	6,55	2,25	10,55	3,11	13,56	3,81	18,75	3,98	22,78
-425	5,19	5,19	8,31	8,31	10,44	10,44	14,94	14,94	18,79	18,79

Çizelge C.4 Öğütme süresinin kırılma davranışına etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları (devam ediyor).

Elek Boyutu (mikron)	45 sn		1 dk		1,25 dk		1,75 dk		2,5 dk	
	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)
-2360+1700	38,35	100,00	34,53	100,00	32,88	100,00	29,89	100,00	25,89	100,00
-1700+1180	21,93	61,65	22,06	65,47	21,44	67,12	19,92	70,11	19,09	74,11
-1180+850	8,60	39,72	8,73	43,41	8,22	45,68	7,56	50,19	6,72	55,02
-850+600	4,94	31,12	4,66	34,68	4,22	37,46	4,13	42,63	3,28	48,31
-600+425	4,17	26,19	4,03	30,02	3,43	33,24	3,09	38,50	2,20	45,02
-425	22,01	22,01	26,00	26,00	29,81	29,81	35,40	35,40	42,82	42,82

Çizelge C.4 Öğütme süresinin kırılma davranışına etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları (devam ediyor).

Elek Boyutu (mikron)	3,5 dk		5 dk		8 dk		10 dk		12 dk	
	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)
-2360+1700	23,56	100,00	19,75	100,00	14,57	100,00	13,05	100,00	11,02	100,00
-1700+1180	16,50	76,44	15,34	80,25	14,23	85,43	12,63	86,95	10,99	88,98
-1180+850	6,04	59,94	4,94	64,92	4,46	71,20	3,58	74,32	3,22	77,99
-850+600	2,48	53,90	1,95	59,98	1,62	66,74	1,06	70,74	0,87	74,77
-600+425	1,42	51,42	1,04	58,03	0,88	65,12	0,49	69,68	0,40	73,90
-425	50,00	50,00	56,99	56,99	64,24	64,24	69,19	69,19	73,50	73,50

Çizelge C.5 4 mm boyutlu bilya ile yapılan deneylerin sonuçları (Şekil 4.9).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn		10 sn		15 sn		2,5 dk		5 dk		8 dk	
	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)
-2360+1700	74,58	100,00	64,75	100,00	54,39	100,00	29,79	100,00	25,94	100,00	23,43	100,00
-1700+1180	16,81	25,42	19,67	35,25	25,42	37,92	25,96	70,21	23,58	74,06	7,83	79,34
-1180+850	2,15	8,60	4,50	15,58	5,69	16,62	8,54	44,25	7,96	50,48	3,85	55,91
-850+600	1,21	6,46	2,25	11,08	3,01	12,47	5,23	35,71	4,42	42,52	2,14	48,08
-600+425	1,00	5,25	2,02	8,83	2,52	10,19	4,21	30,48	2,77	38,10	42,09	44,23
-425	4,25	4,25	6,81	6,81	8,97	8,39	26,27	26,27	35,33	35,33	40,08	42,09

Çizelge C.6 2,36 mm boyutlu bilya ile yapılan deneylerin sonuçları (Şekil 4.10).

Elek Boyutu (mikron)	15 sn		1 dk		3,5 dk		12 dk	
	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)
-2360+1700	77,69	100,00	66,78	100,00	55,71	100,00	44,89	100,00
-1700+1180	15,63	22,31	20,19	33,22	22,70	44,29	22,72	55,11
-1180+850	1,46	6,68	3,36	13,03	5,28	21,59	7,48	32,39
-850+600	0,74	5,22	1,73	9,67	3,05	16,31	4,93	24,91
-600+425	0,66	4,47	1,71	7,94	2,58	13,26	4,35	19,98
-425	3,81	3,81	6,23	6,23	10,68	10,68	15,63	15,63

Çizelge C.7 1/3 ağırlıksal oranlı bilya karışımları (2,36-4-6 mm) ile yapılan deneylerin sonuçları (Şekil 4.11).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn		15 sn		45 sn		8 dk		12 dk	
	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)	Ağırlık (%)	E. A. (%)
-2360+1700	83,73	100,00	69,54	100,00	45,35	100,00	27,56	100,00	24,33	100,00
-1700+1180	10,71	16,27	18,19	30,46	24,79	54,65	21,69	72,44	19,94	75,67
-1180+850	1,67	5,56	3,60	12,27	7,06	29,85	11,06	50,75	9,94	55,73
-850+600	0,85	3,90	1,92	8,67	3,85	22,79	7,38	39,69	6,69	45,79
-600+425	0,65	3,04	1,48	6,75	2,94	18,94	6,25	32,31	3,83	39,10
-425	2,40	2,40	5,27	5,27	16,00	16,00	26,06	26,06	35,27	35,27

Çizelge C.8 -212+150 mikron dar tane boyut grubu öğütme sonuçları (Şekil 4.13).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	15 sn	30 sn	1 dk	1,5 dk	2 dk
	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)
-212+150	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-150+106	22,64	37,16	56,55	78,13	88,67	95,27
-106+75	8,11	18,24	31,38	53,13	67,81	82,43
-75+53	4,73	11,49	21,03	39,06	49,32	65,54
-53	3,04	8,11	14,83	27,08	36,99	50,00

Çizelge C.9 -425+300 mikron dar tane boyut grubu öğütme sonuçları (Şekil 4.15).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	15 sn	30 sn	1 dk	1,5 dk
	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)
-425+300	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-300+212	34,10	52,09	67,87	88,53	95,67
-212+150	14,19	27,55	43,74	68,84	85,25
-150+106	7,86	18,18	31,09	56,32	73,89
-106+75	5,04	11,57	21,54	41,23	56,99
-75+53	3,23	7,85	15,38	31,05	43,76
-53	2,22	5,37	11,28	22,63	33,59

Çizelge C.10 -1180+850 mikron dar tane boyut grubu öğütme sonuçları (Şekil 4.17).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	15 sn	30 sn	1 dk	2 dk	4 dk	8 dk
	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)
-1180+850	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-850+600	21,47	43,87	54,47	64,93	77,33	90,00	98,11
-600+425	14,36	31,73	41,39	51,53	67,20	85,75	97,03
-425+300	9,96	22,93	31,51	42,87	61,53	82,25	96,49
-300+212	7,78	18,93	27,04	37,53	58,80	81,50	96,22
-212+150	5,83	13,87	20,29	31,93	53,33	78,50	95,00
-150+106	4,58	11,47	17,36	26,33	48,67	76,75	93,10
-106+75	3,60	8,40	13,22	21,93	42,56	70,99	85,50
-75+53	2,76	6,53	10,81	18,28	35,47	63,32	77,90
-53	2,04	5,07	8,81	14,62	30,40	51,81	70,30

Çizelge C.11 -3350+2360 mikron dar tane boyut grubu öğütme sonuçları (Şekil 4.19).

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	15 sn	1 dk	4 dk	8 dk	12 dk
	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)
-3350+2360	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-2360+1700	22,64	32,80	52,73	68,12	78,97	86,48
-1700+1180	8,85	16,98	34,27	49,68	64,39	74,04
-1180+850	4,79	10,12	24,83	40,19	54,02	64,77
-850+600	3,20	7,23	19,62	35,50	49,90	59,10
-600+425	2,46	5,64	16,47	30,95	46,43	58,00
-425+300	1,93	4,41	13,58	27,33	42,33	53,27
-300+212	1,53	3,62	11,61	24,04	40,01	51,08
-212+150	1,21	2,96	9,88	20,82	36,89	45,64
-150+106	0,98	2,40	8,06	18,01	33,04	41,75
-106+75	0,78	1,85	6,63	15,43	30,16	37,31
-75+53	0,61	1,51	5,47	13,36	26,88	33,76
-53	0,50	1,21	4,42	11,04	23,02	30,20

EK AÇIKLAMALAR D

**BİLYALI DEĞİRMENDE DAR TANE BOYUT GRUPLARINDA KIRILMA
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

Çizelge D.1 -212+150 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları (Şekil 4.23).

Elek Boyutu (mikron)	0,25 dk	0,50 dk	1 dk	2 dk	4 dk	8 dk	12 dk
	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)
-212+150	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-150+106	12,20	18,09	24,78	33,98	51,00	79,71	91,60
-106+75	2,99	4,49	7,64	14,15	25,49	52,29	71,83
-75+53	1,59	2,76	5,21	9,32	17,75	36,47	51,70
-53	1,01	1,73	3,55	6,56	12,26	26,83	38,17

Çizelge D.2 -425+300 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları (Şekil 4.25).

Elek Boyutu (mikron)	0,25 dk	0,50 dk	1 dk	2 dk	4 dk	8 dk
	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)
-425+300	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-300+212	25,11	30,64	41,49	52,31	75,55	95,38
-212+150	7,28	9,05	15,32	23,80	47,16	79,88
-150+106	4,17	5,22	9,61	15,75	31,54	64,48
-106+75	2,81	3,66	6,60	10,36	21,77	44,94
-75+53	1,93	2,51	4,59	7,31	16,33	32,91
-53	1,45	1,83	3,13	5,06	11,61	24,00

Çizelge D.3 -1180+850 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları (Şekil 4.27).

Elek Boyutu (mikron)	0,25 dk	0,50 dk	1 dk	2 dk	4 dk	8 dk
	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)
-1180+850	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-850+600	30,02	36,07	49,70	68,51	87,97	99,00
-600+425	13,14	23,55	33,33	50,70	73,05	96,40
-425+300	9,08	15,13	21,29	34,50	55,11	87,90
-300+212	5,80	11,53	16,07	26,98	44,80	78,70
-212+150	4,19	7,92	11,14	18,51	31,66	58,60
-150+106	3,24	6,31	8,94	14,79	24,45	45,95
-106+75	2,47	4,31	6,26	10,35	17,11	31,71
-75+53	1,68	3,21	4,29	7,69	13,20	24,59
-53	1,24	2,30	3,22	5,92	9,78	18,77

Çizelge D.4 -2360+1700 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları (Şekil 4.29).

Elek Boyutu (mikron)	0,25 dk	0,50 dk	1 dk	2 dk	4 dk	8 dk	12 dk
	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	29,95	41,37	55,22	70,07	82,81	91,75	96,69
-1180+850	14,08	22,70	34,14	50,11	66,54	86,98	94,68
-850+600	10,19	17,08	26,95	41,42	59,21	83,02	93,23
-600+425	6,77	10,69	17,70	28,56	45,13	78,67	90,80
-425+300	5,28	8,78	14,47	23,80	39,81	73,93	88,83
-300+212	3,69	6,07	10,08	16,67	29,25	65,91	85,66
-212+150	2,83	4,57	7,56	12,78	23,02	55,46	78,85
-150+106	2,10	3,35	5,56	9,53	19,13	47,73	69,83
-106+75	1,62	2,51	4,07	7,20	13,51	38,94	59,21
-75+53	1,20	1,82	2,87	5,27	10,05	32,12	49,01
-53	0,80	1,28	1,91	3,39	7,32	26,22	40,32

Çizelge D.5 -3350+2360 µm dar tane boyut grubu öğütme sonuçları (Şekil 4.31).

Elek Boyutu (mikron)	0,25 dk	0,50 dk	1 dk	2 dk	4 dk	8 dk	12 dk
	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)	E. A (%)
-3350+2360	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-2360+1700	27,07	39,12	52,86	68,16	80,62	88,72	93,04
-1700+1180	11,26	16,15	26,92	44,74	65,00	77,00	84,85
-1180+850	7,08	11,23	19,72	33,63	52,21	69,00	79,00
-850+600	5,30	8,08	14,63	27,34	43,83	60,84	74,00
-600+425	3,69	5,97	10,88	20,81	37,08	54,53	66,81
-425+300	2,39	4,11	7,61	16,71	31,86	50,34	63,00
-300+212	1,82	3,07	6,34	12,87	24,63	42,71	56,82
-212+150	1,39	2,11	4,34	10,20	21,47	35,43	48,56
-150+106	1,04	1,54	3,21	8,12	16,39	29,92	40,84
-106+75	0,78	1,21	2,47	5,84	12,61	23,01	30,58
-75+53	0,57	0,84	1,70	4,42	9,09	17,61	23,75
-53	0,42	0,61	1,17	3,13	6,56	12,63	17,54

EK AÇIKLAMALAR E

KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE VE BİLYALI DEĞİRMENDE KIRILMA DAĞILIM DEĞERLERİNİN TANE BOYU İLE DEĞİŞİMİ

Çizelge E.1 Karıştırmalı değirmende, deneysel ve hesaplanan kırılma dağılım değerleri ($B_{i,1}$) (Şekil 4.43).

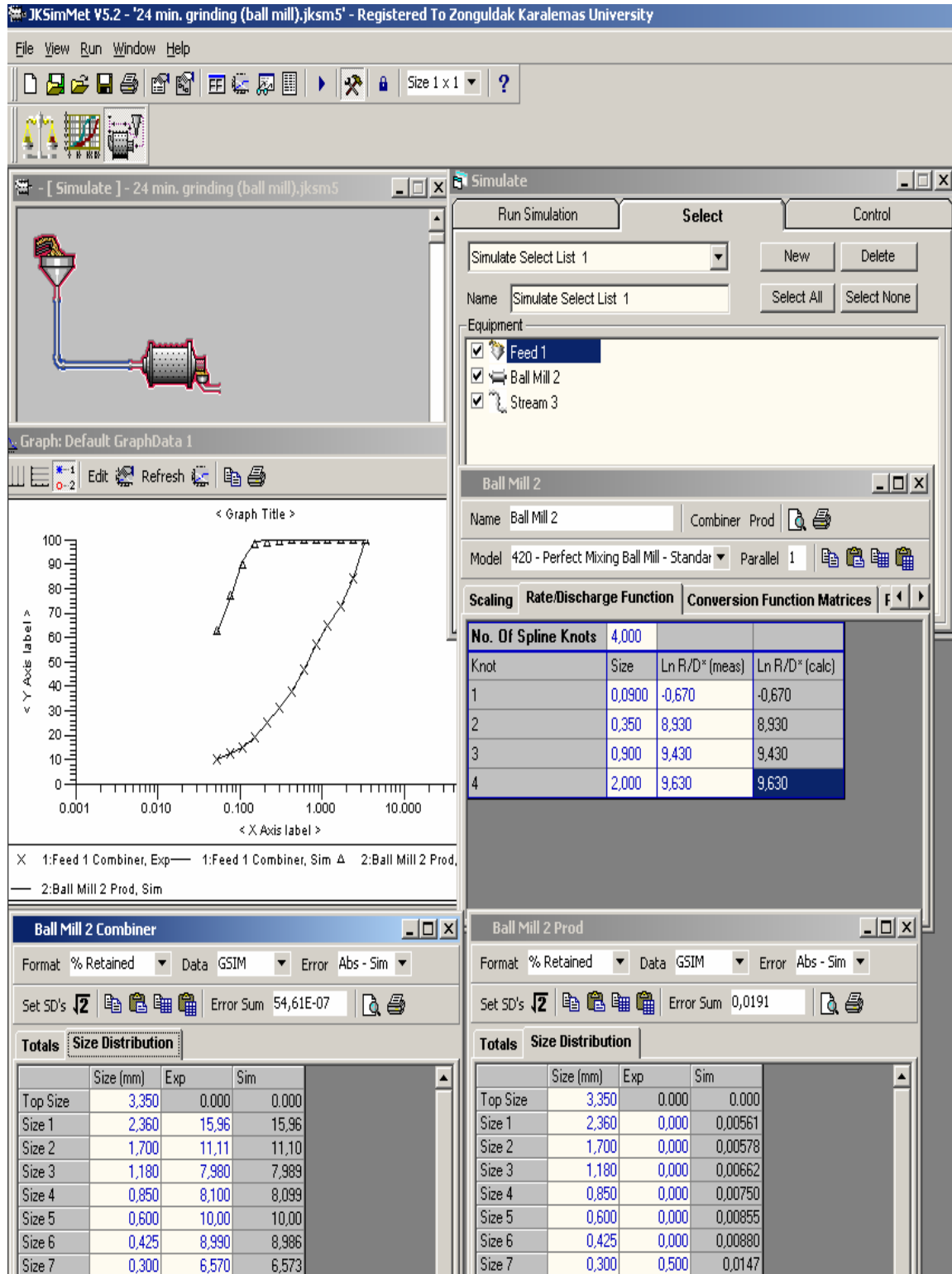
x_i/x_1	-3350+2360 μm		-2360+1700 μm		-1180+850 μm		-425+300 μm		-212+150 μm	
	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$
1,000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,704	0,3760	0,3749	0,5311	0,5332	0,6839	0,6764	0,4663	0,4654	0,5281	0,5281
0,507	0,1992	0,2016	0,3573	0,3491	0,4629	0,4760	0,2494	0,2523	0,3026	0,3026
0,352	0,1317	0,1312	0,2551	0,2555	0,3574	0,3512	0,1576	0,1540	0,1928	0,1928
0,254	0,1011	0,1000	0,1750	0,1862	0,2651	0,2655	0,0999	0,1010		
0,179	0,0791	0,0783	0,1300	0,1366	0,2069	0,2041	0,0684	0,0689		
0,127	0,0625	0,0624	0,1056	0,0999	0,1618	0,1585				
0,090	0,0494	0,0498	0,0780	0,0732	0,1235	0,1235				
0,063	0,0399	0,0399	0,0527	0,0537	0,0909	0,0967				
0,045	0,0318	0,0320	0,0415	0,0393						
0,032	0,0248	0,0256	0,0361	0,0288						
0,022	0,0203	0,0206								

Çizelge E.2 Bilyalı değirmende, deneysel ve hesaplanan kırılma dağılım değerleri ($B_{i,1}$) (Şekil 4.47).

x_i/x_1	-3350+2360 μm		-2360+1700 μm		-1180+850 μm		-425+300 μm		-212+150 μm	
	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$	Deneysel $B_{i,1}$	Hesapla $B_{i,1}$
1,000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,704	0,5552	0,5503	0,5681	0,5706	0,5171	0,5211	0,3673	0,3675	0,5486	0,5406
0,507	0,3413	0,3559	0,4023	0,3858	0,3493	0,3338	0,2071	0,2065	0,2892	0,3019
0,352	0,2532	0,2375	0,2624	0,2816	0,2192	0,2330	0,1385	0,1384	0,1833	0,1770
0,254	0,1748	0,1712	0,2030	0,2026	0,1571	0,1654	0,0947	0,0971		
0,179	0,1125	0,1229	0,1408	0,1464	0,1208	0,1182	0,0710	0,0690		
0,127	0,0855	0,0893	0,1075	0,1054	0,0918	0,0846				
0,090	0,0652	0,0648	0,0796	0,0760	0,0622	0,0605				
0,063	0,0487	0,0472	0,0612	0,0549	0,0458	0,0434				
0,045	0,0365	0,0344	0,0453	0,0396						
0,032	0,0266	0,0250	0,0301	0,0286						
0,022	0,0196	0,0183								

EK AÇIKLAMALAR F

**BİLYALI DEĞİRMEN VE KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE SİMULASYON
ÇALIŞMALARI**



Şekil F.1 Bond Bilyalı değirmen ÇATES numunesinin 24 dk öğütülmesi sonrası, JKSimMet simulyon programı ile değerlendirilmesini gösterir ekran çıktısı (Şekil 4.50).

Çizelge F.1 Bond Bilyalı değirmeninde ÇATES numunesi ve öğütme ürünlerine ait deneysel ve simulasyon boyut dağılımları (Şekil 4.50).

Elek Boyutu (mikron)	ÇATES Numunesi				1 dk				4 dk			
	Deneysel		Simulasyon		Deneysel		Simulasyon		Deneysel		Simulasyon	
	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)
-3350+2360	15,96	100,00	15,96	100,00	12,20	100,00	12,19	100,00	8,80	100,00	7,20	100,00
-2360+1700	11,11	84,05	11,10	84,04	9,33	87,80	9,34	87,81	5,00	91,20	6,25	92,80
-1700+1180	7,99	72,94	7,99	72,94	9,67	78,47	7,46	78,47	5,50	86,20	5,76	86,54
-1180+850	8,10	64,95	8,10	64,95	7,80	68,80	7,62	71,00	5,00	80,70	6,03	80,79
-850+600	10,00	56,85	10,00	56,85	6,80	61,00	9,14	63,39	5,20	75,70	7,03	74,76
-600+425	8,99	46,85	8,99	46,85	8,67	54,20	8,41	54,24	8,10	70,50	6,73	67,72
-425+300	6,57	37,86	6,57	37,86	5,50	45,53	7,15	45,83	5,20	62,40	7,20	61,00
-300+212	6,18	31,29	6,18	31,29	8,56	40,03	7,39	38,68	11,39	57,20	9,41	53,80
-212+150	6,19	25,11	6,19	25,11	5,10	31,47	7,36	31,30	9,11	45,81	9,80	44,39
-150+106	4,22	18,92	4,22	18,92	6,81	26,37	5,19	23,94	9,47	36,70	7,26	34,60
-106+75	2,14	14,70	2,14	14,70	4,48	19,57	2,93	18,75	5,92	27,23	4,59	27,34
-75+53	2,31	12,56	2,31	12,56	3,76	15,09	2,94	15,82	4,74	21,31	4,28	22,75
-53	10,25	10,25	10,25	10,25	11,33	11,33	12,88	12,88	16,58	16,58	18,47	18,47

Çizelge F.1 Bond Bilyalı değirmeninde ÇATES numunesi ve öğütme ürünlerine ait deneysel ve simulasyon boyut dağılımları (devam ediyor).

Elek Boyutu (mikron)	8 dk				12 dk				24 dk			
	Deneysel		Simulasyon		Deneysel		Simulasyon		Deneysel		Simulasyon	
	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)
-3350+2360	4,40	100,00	2,56	100,00	-	-	0,62	100,00	-	-	-	-
-2360+1700	2,60	95,60	2,49	97,44	-	-	0,63	99,38	-	-	0,01	100,00
-1700+1180	2,20	93,00	2,63	94,95	1,80	100,00	0,71	98,74	-	-	0,01	99,99
-1180+850	1,73	90,80	2,88	92,32	0,30	98,20	0,80	98,03	-	-	0,01	99,99
-850+600	2,07	89,07	3,30	89,44	0,20	97,90	0,91	97,23	-	-	0,01	99,98
-600+425	4,40	87,00	3,30	86,14	0,80	97,70	0,93	96,32	-	-	0,01	99,97
-425+300	4,40	82,60	4,59	82,84	0,60	96,90	1,48	95,39	0,50	100,00	0,01	99,96
-300+212	13,04	78,20	10,08	78,25	9,63	96,30	5,32	93,91	0,75	99,50	0,07	99,95
-212+150	10,62	65,16	13,76	68,17	10,59	86,67	14,77	88,59	1,00	98,75	0,69	99,88
-150+106	13,63	54,54	11,08	54,41	18,26	76,08	14,69	73,82	8,00	97,75	7,51	99,18
-106+75	9,62	40,90	7,68	43,33	13,52	57,82	10,72	59,13	13,01	89,74	15,79	91,67
-75+53	7,22	31,28	6,78	35,65	9,63	44,30	9,25	48,41	14,01	76,74	14,56	75,88
-53	24,06	24,06	28,87	28,87	34,67	34,67	39,16	39,16	62,73	62,73	61,32	61,32

Çizelge F.2 Karıştırmalı değirmende ÇATES numunesi ve öğütme ürünlerine ait deneysel ve simulasyon boyut dağılımları (Şekil 4.52).

Elek Boyutu (mikron)	ÇATES Numunesi				0,25 dk				0,50 dk			
	Deneysel		Simulasyon		Deneysel		Simulasyon		Deneysel		Simulasyon	
	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)
-3350+2360	15,96	100,00	15,96	100,00	4,00	100,00	2,08	100,00	1,02	100,00	0,90	100,00
-2360+1700	11,11	84,05	11,10	84,04	4,33	96,00	1,78	97,92	2,70	98,98	0,80	99,10
-1700+1180	7,99	72,94	7,99	72,94	3,00	91,67	1,70	96,13	2,03	96,28	0,79	98,30
-1180+850	8,10	64,95	8,10	64,95	1,34	88,67	1,83	94,44	0,68	94,25	0,88	97,51
-850+600	10,00	56,85	10,00	56,85	1,00	87,33	2,43	92,60	0,17	93,57	1,20	96,63
-600+425	8,99	46,85	8,99	46,85	1,00	86,33	2,73	90,17	0,68	93,40	1,41	95,43
-425+300	6,57	37,86	6,57	37,86	0,66	85,33	2,98	87,44	0,33	92,72	1,65	94,02
-300+212	6,18	31,29	6,18	31,29	3,00	84,67	3,75	84,47	2,37	92,39	2,23	92,37
-212+150	6,19	25,11	6,19	25,11	6,00	81,67	5,06	80,72	3,60	90,02	3,32	90,14
-150+106	4,22	18,92	4,22	18,92	9,43	75,67	6,25	75,66	5,60	86,42	4,72	86,81
-106+75	2,14	14,70	2,14	14,70	10,57	66,24	7,17	69,41	8,81	80,82	6,41	82,10
-75+53	2,31	12,56	2,31	12,56	10,62	55,67	8,78	62,23	10,00	72,01	9,04	75,69
-53+38	2,60	10,25	2,59	10,25	6,79	45,05	9,27	53,45	8,76	62,01	10,55	66,65
-38+27	1,58	7,65	1,59	7,66	7,90	38,26	8,143	44,18	7,73	53,25	10,00	56,10
-27+19	1,39	6,07	1,384	6,07	6,96	30,36	7,142	36,04	8,75	45,52	8,993	46,10
-19+14	0,97	4,68	0,972	4,68	4,84	23,40	5,134	28,90	6,61	36,77	6,525	37,11
-14+10	0,84	3,71	0,839	3,71	4,21	18,56	4,623	23,76	6,19	30,16	5,901	30,58
-10	2,87	2,87	2,87	2,87	14,35	14,35	19,14	19,14	23,97	23,97	24,68	24,68

Çizelge F.2 Karıştırmalı değirmende ÇATES numunesi ve öğütme ürünlerine ait deneysel ve simulasyon boyut dağılımları (devam ediyor).

Elek Boyutu (mikron)	1 dk				4 dk			
	Deneysel		Simulasyon		Deneysel		Simulasyon	
	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)	(%)	(E.A)
-3350+2360	-	-	0,29	99,99	-	-	0,10	99,99
-2360+1700	-	-	0,28	99,70	-	-	0,09	99,90
-1700+1180	-	-	0,30	99,43	-	-	0,10	99,80
-1180+850	-	-	0,36	99,12	-	-	0,13	99,70
-850+600	-	-	0,53	98,76	-	-	0,19	99,57
-600+425	1,07	100,00	0,67	98,23	-	-	0,24	99,38
-425+300	0,85	98,93	0,82	97,56	-	-	0,31	99,14
-300+212	1,90	98,08	1,14	96,74	0,50	100,00	0,44	98,83
-212+150	3,50	96,18	1,73	95,60	0,33	99,50	0,70	98,39
-150+106	5,47	92,68	2,53	93,87	1,05	99,17	1,10	97,69
-106+75	7,98	87,21	3,74	91,34	1,30	98,12	1,81	96,59
-75+53	9,36	79,23	6,20	87,60	3,24	96,82	3,47	94,78
-53+38	8,20	69,87	9,07	81,40	5,80	93,58	6,26	91,31
-38+27	7,60	61,67	10,83	72,33	8,35	87,78	9,66	85,05
-27+19	8,47	54,07	11,16	61,50	9,91	79,43	12,12	75,39
-19+14	7,55	45,60	8,58	50,34	8,94	69,52	10,28	63,27
-14+10	7,42	38,05	7,94	41,76	9,52	60,58	9,88	52,99
-10	30,63	30,63	33,82	33,82	51,06	51,06	43,11	43,11

EK AÇIKLAMALAR G

**LABORATUVAR ÖLÇEKLİ BİLYALI DEĞİRMEN VE KARIŞTIRMALI
DEĞİRMENDE ENERJİ HARCAMALARI**

Çizelge G.1 Enerji tüketim değerleri (Şekil 4.55).

Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı Değirmen		
Öğütme Süresi, dk	d ₈₀ , µm	Enerji Tüketimi, kWs/t	Öğütme Süresi, dk	d ₈₀ , µm	Enerji Tüketimi, kWs/t
0	2100	-	0	2100	-
-	-	-	0,25	190	2,63
-	-	-	0,50	102	5,27
1	1802	3,03	1	78	10,53
4	1130	12,12	4	28	42,12
8	324	24,24	-	-	-
12	167	36,36	-	-	-
24	81	72,73	-	-	-

ÖZGEÇMİŞ

Selçuk SAMANLI 1969 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlkokulu Kayseri'de okudu. Orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 1988 yılında kaydolduğu İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nü, 1993 yılında bitirdi. 1994 yılında yedek subay olarak askerlik hizmetini tamamladı. 1998 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Bilim Dalından Maden Yüksek Mühendisi ünvanı alarak mezun oldu. 1998–2001 yılları arasında Maden Mühendisi olarak Park Holding bünyesindeki, Park Enerji Madencilik San. Tic. Aş.'de Soma/Manisa ve Çayırhan/Ankara'da çalıştı. 2002 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi'nde (ZKÜ) Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2003 yılında ZKÜ'de Doktora eğitimine başladı. Üniversitede çeşitli projelerde araştırmacı olarak yer almıştır. Selçuk Samanlı evli ve bir kız çocuğu babasıdır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Bahçelievler Mah., Işıkyönder Cad.,
Latif Apt., No:27, D:7, Site/ZONDULDAK

Tel (Ev) : 03722571930

GSM : 05058736194

E-posta : selcuksamanli@karaelmas.edu.tr
selcuksamanli@hotmail.com

Selçuk SAMANLI