

Atritör Değirmende Özgöl Yüzey Alanı ve Kırılma Hızına Bağlı
Kesikli Öğütme Modelinin Geliştirilmesi

Hasan Serkan Gökçen

DOKTORA TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2017

Development of Batch Grinding Model for Attritor Mill
Based On Specific Surface Area and Breakage Rate

Hasan Serkan Gökçen

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Mining Engineering

January 2017

Atritör Değirmende Özgöl Yüzey Alanı ve Kırılma Hızına Bağlı
Kesikli Öğütme Modelinin Geliştirilmesi

Hasan Serkan Gökçen

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Cevher Hazırlama Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Yaşar Uçbaş

Bu Tez TÜBİTAK tarafından “112R008” no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir
Bu Tez ESOGU BAP tarafından “201315028” no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir

Ocak 2017

ONAY

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Hasan Serkan Gökçen'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Atritör Değirmende Özgül Yüzey Alanı ve Kırılma Hızına Bağlı Kesikli Öğütme Modelinin Geliştirilmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Yaşar Uçbaş

İkinci Danışman : -

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Yaşar Uçbaş

Üye : Prof. Dr. Volkan Bozkurt

Üye : Prof. Dr. Halil İpek

Üye : Prof. Dr. A. Hakan Benzer

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakan Dündar

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Yaşar Uçbaş danışmanlığında hazırlamış olduğum “Atritör Değirmende Özgül Yüzey Alanı ve Kırılma Hızına Bağlı Kesikli Öğütme Modelinin Geliştirilmesi” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 24/01/2017

Hasan Serkan Gökçen

İmza

ÖZET

Bu tezde, mikanın atritör değirmende kuru ve yaş olarak özgül yüzey alanının artırılmasında çeşitli işlem parametrelerinin etkisi araştırılmış ve atritör değirmen modellenmiştir. Araştırılan işlem parametreleri; öğütme süresi, karıştırma hızı, bilya oranı, malzeme miktarı (boşluk doldurma oranı/pülp yoğunluğu), bilya boyutu ve bilya cinsidir. Sonuçlar; ürün özgül yüzey alanı, özgül enerji tüketimi ve kapasite göz önüne alınarak değerlendirilmiştir.

Kuru ve yaş öğütme deney sonuçlarından, belirli bir enerji tüketiminde, karıştırma hızı, bilya oranı, bilya boyutu, bilya yoğunluğu arttıkça ve malzeme miktarı azaldıkça, elde edilen ürünlerin ve özgül yüzey alanlarının arttığı saptanmıştır. Yaş öğütme ile daha az enerji tüketilerek daha yüksek özgül yüzey alanlı ürünler elde edilmiştir. Kuru öğütme ile 30 dakikalık öğütme süresinde (85,281 kWs/t enerji tüketiminde) özgül yüzey alanı 8470 cm²/g olan bir ürün 0,324 kg/s kapasite ile elde edilir iken; yaş öğütme ile 30 dakikalık öğütme süresinde (70,409 kWs/t enerji tüketiminde) yüzey alanı 13677 cm²/g olan bir ürün aynı kapasite ile elde edilmiştir. Yaş öğütme, aynı kapasitede, enerji tüketimini %17,4 azaltmış ve yüzey alanını %61,5 arttırmıştır.

Bu tez kapsamında ayrıca özgül yüzey alanına ve kırılma hızına bağlı kesikli öğütme modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller kullanılarak atritör değirmene beslenen mikanın özgül yüzey alanı, boyut dağılımı ve değirmenin parametre değerleri bilindiğinde değirmenden elde edilecek ürünlerin yüzey alanı ve boyut dağılımı tahmin edilebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Atritör, Karıştırmalı bilyalı değirmen, Mika, Özgül Yüzey alanı, Kırılma hızı, Kesikli öğütme modeli.

SUMMARY

In this thesis, the effect of various process parameters to increase specific surface area of mica in the case of dry and wet grinding conditions were investigated using an attritor mill and a mathematical model of the mill was developed. The studied parameters were; grinding time, stirrer speed, ball amount, feed amount (ball filling ratio/pulp density), ball size and ball density. The results were evaluated based upon specific surface area of ground product, specific energy consumption and capacity.

As a result of dry and wet grinding tests, it was determined that at a certain energy consumption, the specific surface area of ground product increases with an increasing stirrer speed, ball amount, ball size, ball density and a decreasing feed amount. By wet grinding, products having higher specific surface area were obtained with less energy consumption. While in the dry grinding conditions, at 30 minutes of grinding time (85.281 kWh/t, energy consumption), a product having 8470 cm²/g surface area were obtained with a capacity of 0.324 kg/h, in the wet grinding conditions, at 30 minutes of grinding time (70.409 kWh/t, energy consumption), a product having 13677 cm²/g surface area were obtained with the same capacity. In wet grinding conditions compare to dry grinding conditions at the same capacity, the energy consumption was decreased by 17.4% and the specific surface area was increased by 61.5%.

Within the scope of this thesis, batch grinding models related to specific surface area and breakage rate were also developed. By using these models, in an attritor mill; when the specific surface area, particle size distribution and the mill process parameters were known, the surface area and the particle size distribution of ground products could be estimated.

Keyword: Attritor, Stirred ball mill, Mica, Specific surface area, Breakage rate, Batch grinding model.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ'a, kendi tez öğrencisiymiş gibi sahip çıkan, yardımlarını esirgemeyen ve emek veren değerli hocam Prof. Dr. Volkan BOZKURT'a teşekkürlerimi sunarım. 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. Ahmet Hakan BENZER'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının her aşamasında yanımda olan, her anlamda desteğini esirgemeyen, çok yakın dostum ve iş arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Serkan ÇAYIRLI'ya, tüm çalışma arkadaşlarıma ve bölümümüz hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarımda kullandığım malzemelerin temininde ve analizlerinde sağlamış oldukları imkânlardan dolayı Kaltun Madencilik Tic. San. AŞ.'ye teşekkür ederim. Tezimi maddi olarak destekleyen 112R008 no'lu proje ile TÜBİTAK'a, 201315028 no'lu proje ile Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Ayrıca, manevi desteklerinden dolayı Erhan UZUNKOL'a ve değerli ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Bugünlere gelmemde büyük özveri gösteren, maddi ve manevi destekleyen rahmetli annem Kıymet GÖKÇEN'e ve rahmetli babam İbrahim İzzet GÖKÇEN'e, ayrıca manevi desteklerinden dolayı, varlıklarından onur duyduğum ablam Gaye GÜVENÇ'e, kardeşim Tuğçe GÖKÇEN'e, eniştem Coşkun GÜVENÇ'e ve yeğenim Eylül GÜVENÇ'e sonsuz sevgi ve minnettarlığımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xx
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Atritör Değirmenler (Karıştırmalı Bilyalı Değirmenler).....	3
2.1.1. Atritör değirmenlerde öğütmeyi etkileyen değişkenler.....	7
2.1.1.1. <u>Öğütme tipinin etkisi</u>	8
2.1.1.2. <u>Pülp yoğunluğunun etkisi</u>	9
2.1.1.3. <u>Ortam boyutu, miktarı ve yoğunluğunun etkisi</u>	10
2.1.1.4. <u>Karıştırma hızının etkisi</u>	13
2.1.1.5. <u>Beslenen cevher boyutunun etkisi</u>	14
2.1.1.6. <u>Öğütme yardımcılarının etkisi</u>	14
2.2. Özgül Yüzey Alanı.....	19
2.2.1. Özgül yüzey alanı ölçüm yöntemleri	21
2.2.2. Özgül yüzey alanı ölçüm cihazları	21
2.3. Öğütmenin Matematiksel Modellenmesi	21
2.3.1. Matris model	27
2.3.2. Kinetik model.....	30
2.3.3. Boyut kütle denkliği modeli.....	35
2.3.4. Mükemmel karışım modeli	36
2.3.5. Çok bölmeli değirmen modeli.....	39
2.3.6. Ayrık eleman yöntemi (DEM)	41
2.3.7. Pozitron emisyon parçacık izleme (PEPT) yöntemi	42
2.3.8. Stres model.....	43
2.3.9. Kırılma dağılım fonksiyonu modeli	44

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.3.9.1. <u>İkiz sarkaç testi</u>	47
2.3.9.2. <u>Ağırlık düşürme testi</u>	47
2.3.9.3. <u>Hopkinson basınç çubuğu</u>	48
2.3.9.4. <u>Çok hızlı yük hücresi</u>	49
3. MALZEME VE YÖNTEM	50
3.1. Malzeme	50
3.1.1. Mika	50
3.1.2. Tanım	50
3.1.3. Sınıflandırma.....	51
3.1.4. Kullanım.....	52
3.1.5. Üretim yöntemi ve teknolojisi.....	55
3.1.6. İthalat ve ihracat	56
3.1.7. Fiyatlar	57
3.1.8. Ülkemizde durum.....	57
3.1.9. Sekizinci plan döneminde beklenen gelişmeler ve öneriler	57
3.2. Analizler	58
3.2.1. Örneğin hazırlanması ve Malvern-Mastersizer 2000 ile boyut analizleri	58
3.2.2. Örneğin XRD ve XRF analizleri	58
3.2.3. Örneğin yoğunluk analizi	59
3.2.4. Özgül yüzey alanı ölçümleri	59
3.3. Hesaplamalar.....	59
3.3.1. Tüketilen enerji miktarının (ölgül enerji tüketiminin) hesabı	59
3.3.2. Bilya doluluk oranının (bilya miktarının) hesabı	59
3.3.3. Boşluk doldurma oranının (malzeme miktarının) hesabı.....	60
3.3.4. Ağırlıkça katı oranının (pülp yoğunluğunun) hesabı	61
3.4. Deneysel Yöntem	62
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	65
4.1. Kuru Ögütme Deneyleri	65
4.1.1. Karıştırma hızının yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi.....	65
4.1.2. Bilya doluluk oranının yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi.....	69

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.1.3. Boşluk doldurma oranının yüzey alanı, enerji tüketimi ve kapasite üzerine etkisi	72
4.1.4. Bilya boyutu ve cinsinin yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi.....	76
4.1.5. Kuru öğütme sonuçları	84
4.2. Yaş Öğütme Deneyleri	86
4.2.1. Karıştırma hızının yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi.....	86
4.2.2. Bilya doluluk oranının yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi.....	89
4.2.3. Katı oranının yüzey alanı, enerji tüketimi ve kapasite üzerine etkisi.....	92
4.2.4. Bilya boyutu ve cinsinin yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi.....	96
4.2.5. Yaş öğütme sonuçları	104
4.3. Kuru ve Yaş Öğütmenin Optimum Koşullarında Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	106
4.4. Modelleme Çalışmaları	106
4.4.1. Yüzey alanına bağlı matematiksel modelin geliştirilmesi.....	107
4.4.2. Kırılma hızının (r/d) matematiksel modellenmesi	122
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	140
5.1. Kuru Öğütme Deneyleri	140
5.1.1. Karıştırma hızı deneyleri (300-600 d/d).....	140
5.1.2. Bilya oranı deneyleri (J: 0,42-0,82)	141
5.1.3. Boşluk doldurma oranı deneyleri (U: 0,58-1,20)	141
5.1.4. Bilya boyutu ve cinsi deneyleri (İri ve ince; alümina, cam ve çelik).....	142
5.2. Yaş Öğütme Deneyleri	144
5.2.1. Karıştırma hızı deneyleri (300-600 d/d).....	144
5.2.2. Bilya oranı deneyleri (J: 0,42-0,82)	145
5.2.3. Katı oranı deneyleri (K: 0,35-0,65).....	146
5.2.4. Bilya boyutu ve cinsi deneyleri (İri ve ince; alümina, cam ve çelik).....	147
5.3. Kuru ve Yaş Öğütmenin Optimum Koşullarında Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	149
5.4. Modelleme Çalışmaları	149
5.4.1. Yüzey alanına matematiksel model.....	149

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.4.2. Kırılma hızına bağlı matematiksel model	149
5.5. Öneriler.....	149
EK AÇIKLAMALAR	150
Ek Açıklama-A Ölçülen ve Hesaplanan Tane Boyu Dağılımları	150
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	165
ÖZGEÇMİŞ	176



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Düşey atritör değirmenin şematik gösterimi	4
2.2. Atritör ve bilyalı değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketimi arasındaki ilişki.....	6
2.3. Öğütmede tane boyutu ile enerji arasındaki ilişki	26
2.4. Birinci derece kırılma hızının gösterimi	32
2.5. Belirli bir boyuttaki malzemenin kırılarak daha alt tane boyutlarına geçen malzeme fraksiyonunun gösterimi	33
2.6. Birincil kırılma dağılım fonksiyonunun bar grafik olarak gösterilişi.....	34
2.7. Her bir tane boyu fraksiyonu etrafında kurulan kütle denkliği	36
2.8. Mükemmel karışım model mekanizması.....	37
2.9. Bilyalı değirmen taşınma hızı fonksiyonu.....	38
2.10. Bilyalı değirmen kırılma hızı faktörü	38
2.11. İri beslemenin artmasıyla çok bölmeli modeldeki boşaltım oranının tipik değişimi .	39
2.12. İri beslemenin artmasıyla çok bölmeli modeldeki kırılma hızının tipik değişimi	40
2.13. Çok bölmeli değirmen modelleme yapısının şekilsel gösterimi.....	40
2.14. Kule ve pinli değirmendeki kayma gerilmeleri, soldaki Kule değirmen (kırmızı alan 3kPa), sağdaki Pinli değirmen (kırmızı alan 6 kPa).....	42
2.15. Karıştırmalı değirmenin şematik diyagramı ve değirmenin PEPT'deki konumu	43
2.16. Stres yoğunluğu ve özgül enerjinin bir fonksiyonu olarak ürün inceliği	44
2.17. Kırma testleri	46
2.18. İkiz sarkaç test aleti	47
2.19. JKMRC Ağırlık düşürme test cihazı	48
2.20. Hopkinson basınç çubuğu test cihazı	49
2.21. Çok hızlı yük hücresi.....	49
3.1. Deneylerde kullanılan -425 µm mika örneğinin boyut dağılımı	58
3.2. Atritör değirmen	62
3.3. Değirmenin tankı, şaftı ve karıştırma kolu	63
3.4. 3 ve 5 mm çaplı alumina bilyalar	63
4.1. Farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	68
4.2. Farklı karıştırma hızlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	68
4.3. Farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	69
4.4. Farklı bilya oranlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	71

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

4.5. Farklı bilya oranlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	72
4.6. Farklı bilya oranlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	72
4.7. Farklı boşluk doldurma oranlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	75
4.8. Farklı boşluk doldurma oranlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	75
4.9. Farklı boşluk doldurma oranlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi ..	76
4.10. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	80
4.11. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	81
4.12. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	81
4.13. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	82
4.14. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	82
4.15. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	83
4.16. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	83
4.17. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	84
4.18. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	84
4.19. Farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	88
4.20. Farklı karıştırma hızlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	88
4.21. Farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	89
4.22. Farklı bilya oranlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	91
4.23. Farklı bilya oranlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	92
4.24. Farklı bilya oranlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	92
4.25. Farklı katı oranlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	95
4.26. Farklı katı oranlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	95
4.27. Farklı katı oranlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	96
4.28. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	100
4.29. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	101
4.30. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkis	101
4.31. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	102
4.32. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	102
4.33. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	103
4.34. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi	103
4.35. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi	104

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.36. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi	104
4.37. Kuru öğütme koşullarında ve farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi	108
4.38. Yaş öğütme koşullarında ve farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi	109
4.39. Kuru öğütme koşullarında ve farklı bilya oranlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi.....	109
4.40. Yaş öğütme koşullarında ve farklı bilya oranlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi.....	110
4.41. Kuru öğütme koşullarında ve farklı boşluk doldurma oranlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi.....	110
4.42. Yaş öğütme koşullarında ve farklı boşluk doldurma oranlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi.....	111
4.43. Kuru öğütme koşullarında ve alumina bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi	111
4.44. Yaş öğütme koşullarında ve alumina bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi	112
4.45. Kuru öğütme koşullarında ve cam bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi.....	112
4.46. Yaş öğütme koşullarında ve cam bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi.....	113
4.47. Kuru öğütme koşullarında ve çelik bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi.....	113
4.48. Yaş öğütme koşullarında ve çelik bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi.....	114
4.49. Farklı karıştırma hızlarının $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi.....	117
4.50. Farklı bilya doldurma oranlarının $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi	117
4.51. Farklı boşluk doldurma oranlarının $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi.....	118
4.52. İri bilya için bilya yoğunluğunun $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi	118
4.53. İnce bilya için bilya yoğunluğunun $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi.....	119
4.54. Eşitlik 4.4'ten elde edilen işlem parametresi değerinin $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi	120
4.55. Katı oranı değişiminin k değeri üzerine etkisi.....	120
4.56. Eşitlik 4.5'ten elde edilen işlem parametresi değerinin $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi	121
4.57. Eşitlik 4.6 dan elde edilen işlem parametresi değerinin $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi	122

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

4.58. Kuru öğütme koşullarında farklı öğütme koşullarında 5 dakikalık öğütme süresi için indirgenmiş tane boyu dağılımı eğrileri	123
4.59. Yaş öğütme koşullarında farklı öğütme koşullarında 5 dakikalık öğütme süresi için indirgenmiş tane boyu dağılımı eğrileri	124
4.60. Kuru ve yaş öğütme koşullarında farklı karıştırma hızlarında 5 dakikalık öğütme süresi için indirgenmiş tane boyu dağılımı eğrileri.....	124
4.61. Kuru ve yaş öğütme koşullarında farklı öğütme süreleri için indirgenmiş tane boyu dağılımı eğrileri.....	125
4.62. Modelleme çalışmalarında kullanılan kırılma dağılım fonksiyonu tane boyu ilişkisi....	126
4.63. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için farklı karıştırma hızlarının kırılma hızına etkisi.....	127
4.64. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için bilya doldurma oranının kırılma hızına etkisi.....	128
4.65. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için farklı bilyalar arası boşluk doldurma oranının kırılma hızına etkisi	128
4.66. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için iri boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi	129
4.67. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için ince boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi	129
4.68. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için iri boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi	130
4.69. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için bilya doldurma oranının kırılma hızına etkisi	130
4.70. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için farklı bilyalar arası boşluk doldurma oranının kırılma hızına etkisi	131
4.71. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için iri boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi	131
4.72. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için ince boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi	132
4.73. Kuru öğütme koşulları için 600 d/d karıştırma hızında kırılma hızı parametreleri belirlenirken ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları.....	133
4.74. Yaş öğütme koşulları için 600 d/d karıştırma hızında kırılma hızı parametreleri belirlenirken ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları.....	133
4.75. Farklı karıştırma hızlarının a değeri üzerine etkisi	134
4.76. Farklı bilya doldurma oranlarının a değeri üzerine etkisi	134

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.77. Farklı boşluk doldurma oranlarının a değeri üzerine etkisi	135
4.78. 5 mm bilya için bilya yoğunluğunun a değeri üzerine etkisi	135
4.79. 3 mm bilya için bilya yoğunluğunun a değeri üzerine etkisi	136
4.80. Eşitlik 4.4'ten elde edilen işlem parametresi değerinin a değeri üzerine etkisi.....	137
4.81. Eşitlik 4.5'ten elde edilen işlem parametresi değerinin a değeri üzerine etkisi.....	137
4.82. Eşitlik 4.6'dan elde edilen işlem parametresi değerinin a değeri üzerine etkisi.....	138
4.83. α parametresinin öğütme süresi ile değişimi	139
A.1. Kuru öğütme koşullarında 300 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	150
A.2. Kuru öğütme koşullarında 400 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	150
A.3. Kuru öğütme koşullarında 500 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	151
A.4. Kuru öğütme koşullarında J:0,63 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	151
A.5. Kuru öğütme koşullarında J:0,42 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	152
A.6. Kuru öğütme koşullarında J:0,72 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	152
A.7. Kuru öğütme koşullarında J:0,82 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	153
A.8. Kuru öğütme koşullarında U:1,00 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	153
A.9. Kuru öğütme koşullarında U:0,80 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	154
A.10. Kuru öğütme koşullarında U:1,20 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	154
A.11. Kuru öğütme koşullarında 3 mm alumina bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları.....	155
A.12. Kuru öğütme koşullarında 5 mm cam bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	155
A.13. Kuru öğütme koşullarında 3,15 mm cam bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	156
A.14. Kuru öğütme koşullarında 4,76 mm çelik bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları.....	156

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
A.15. Kuru öğütme koşullarında 3,17 mm çelik bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları.....	157
A.16. Yaş öğütme koşullarında 300 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	157
A.17. Yaş öğütme koşullarında 400 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	158
A.18. Yaş öğütme koşullarında 500 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	158
A.19. Yaş öğütme koşullarında J:0,63 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	159
A.20. Yaş öğütme koşullarında J:0,42 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	159
A.21. Yaş öğütme koşullarında J:0,72 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	160
A.22. Yaş öğütme koşullarında J:0,82 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	160
A.23. Yaş öğütme koşullarında U:1,00 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	161
A.24. Yaş öğütme koşullarında U:0,80 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	161
A.25. Yaş öğütme koşullarında U:0,42 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	162
A.26. Yaş öğütme koşullarında 3 mm alumina bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	162
A.27. Yaş öğütme koşullarında 5 mm cam bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	163
A.28. Yaş öğütme koşullarında 3,15 mm cam bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	163
A.29. Yaş öğütme koşullarında 4,76 mm çelik bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	164
A.30. Yaş öğütme koşullarında 3,17 mm çelik bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları	164

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kuru ve yaş öğütmede kullanılan öğütme yardımcıları.....	18
2.2. Özgül yüzey alanının kil mineralinin cinsi ve boyutuna bağlı olarak değişimi	19
2.3. Farklı değirmenlerde öğütülmüş kalsit mineralinin BET yüzey alanları	20
2.4. Öğütme işleminin madde denkliği.....	28
3.1. Yaş, kuru ve mikronize öğütülmüş mikanın kullanıldığı alanlar ve sağladığı etkiler..	54
3.2. Ülkemizin yıllara göre toz mika ihracatı	56
3.3. Ülkemizin 1995 ve 1998 yılları arasındaki toz mika ithalatı	56
3.4. Kuru ve yaş öğütülmüş mikanın 2016 satış fiyatları	57
4.1. Karıştırma hızı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar	68
4.2. Bilya oranı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar	71
4.3. Boşluk doldurma oranı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar	74
4.4. Bilya boyutu ve cinsi deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar	79
4.5. Karıştırma hızı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar ve bu sonuçların kuru öğütme sonuçları ile karşılaştırılması	87
4.6. Bilya oranı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar ve bu sonuçların kuru öğütme sonuçları ile karşılaştırılması	91
4.7. Katı oranı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar ve bu sonuçların kuru öğütme sonuçları ile karşılaştırılması	94
4.8. Bilya boyutu ve cinsi deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar ve bu sonuçların kuru öğütme sonuçları ile karşılaştırılması	98
4.9. Kuru ve yaş öğütmeden elde edilen en verimli sonuçlar (600 d/d, süre: 30 dk., bilya: 5 mm alumina ve 1003 g, örnek: 162 g, J: 0,72, U:0,58, K: 0,45).....	106
4.10. Kuru öğütme koşulları için model ve belirleme katsayıları	115
4.11. Yaş öğütme koşulları için model ve belirleme katsayıları	116

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
d_{80}	Malzemenin % 80'inin geçtiği boyut
d_{50}	Malzemenin % 80'inin geçtiği boyut
dE	Birim ağırlıktaki malzemeyi ufalamak için gerekli olan enerji
J	Bilya doldurma oranı
U	Bilyalar arasındaki boşluğun doldurma oranı
f_c	Malzeme doldurma oranı
S	Kırılma Hızı
r/d	Kırılma Hızı
ρ_b	Bilya yoğunluğu
D_b	Bilya çapı
V	Karıştırma hızıdır
ρ	Pülp yoğunlu
δ_k	Katının özgül ağırlığı
δ_s	Sıvının özgül ağırlığı
S_w	Yüzey alanı

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
DEM	Ayrık eleman yöntemi
PBM	Boyut Kütle Denkliği Modeli
BET	Brunauer, Emmet ve Teller methoduyla ölçülen yüzey alanı
PEPT	Pozitron emisyon parçacık izleme
SI	Stress yoğunluğu

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Bilindiği gibi mika, levha ve mikronize mika (yüksek özgül yüzey alanlı mika) olmak üzere iki şekilde kullanılmaktadır. Ülkemizde zengin levha mika yatakları olmamasına karşın; yüksek özgül yüzey alanlı mika üretimi yapmaya uygun çok geniş yataklar bulunmaktadır. Dünyada mika üzerinde çeşitli araştırmalar yapılırken; Ülkemizde, günümüze kadar, mikanın endüstriyel hammadde olarak değerlendirilmesi yönünde herhangi bir çalışma yapılmamıştır.

Yüksek yüzey alanlı mika iki ayrı yöntemle üretilmektedir. Bu yöntemler, kuru ve yaş öğütmedir. Bu yöntemler sonucu elde edilen ürünler, fiziksel özellikleri ile özellikle görünüm açısından birbirlerinden büyük farklılıklar göstermektedir. Boya endüstrisinde daha çok yaş öğütülmüş mika tercih edilmektedir. Bu yüzden yaş öğütülmüş mikanın fiyatı kuru öğütülmüş mikaya göre oldukça yüksektir.

Kaltun Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'i Ülkemizin en önemli mika üreticilerinden biridir. Üretilen mika cevheri kırma-kurutma-sınıflandırma ve manyetik ayırma aşamalarından geçirildikten sonra piyasaya sunulmaktadır. Zenginleştirmeden elde edilen -425 µm boyutlu malzemenin bir kısmı jet değirmende özgül yüzey alanı artırılarak dış ve iç piyasaya çok daha yüksek fiyatlarla sunulmaktadır. Yüzey alanı artırma işlemi 15000 ton/yıl kapasiteli jet değirmenlerde yapılmakta ve Ülkemiz için bir katma değer yaratılmaktadır. Ancak, tesisin enerji sarfiyatı oldukça yüksektir.

Jet değirmenler ile düşük enerji tüketimlerinde yüksek özgül yüzey alanlı ürünler elde etmek mümkün değildir. Bu yüzden bu tür ürünleri elde etmede atritör değirmenler (attritor, stirred ball mill, media attrition mill, attrition mill) kullanılmaya başlanmıştır. Bunun arkasında yatan temel neden, bu tip değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle özgül enerji tüketiminin oldukça düşük seviyede kalmasıdır(Szegvari ve Yang, 1989; Szegvari, 1994; Ma vd., 1998; Weller ve Gao, 1999; Dikmen ve Ergün, 2004; Orumwense, 2005; Celep ve Alp, 2008).

Atritör değirmenler daha düşük enerji tüketimleriyle yüksek özgül yüzey alanlı mika eldesinde de kullanılabilir. Böylece, öğütmeden elde edilen katma değer daha da arttırılabilir.

Bir öğütme işleminden maksimum verimliliğin elde edilebilmesi, en uygun ekipmanların seçimi; işletme değişkenlerinin iyi tanımlanması ve işletim esnasında bu değişkenlerdeki değişimin ürün üzerindeki etkisinin doğru belirlenebilmesine bağlıdır. Sistemin tasarım, kontrol ve optimizasyonu ancak işletme değişkenlerinde veya besleme özelliklerindeki değişimleri güvenilir bir şekilde tanımlayabilecek matematiksel modellerin tanımlanması ile mümkün olabilmektedir.

Bu nedenle, bu tez kapsamında elde edilen verilerden yararlanılarak, atritör değirmende yüzey alanı oluşumu ve kırılma hızına (r/d) bağlı matematiksel modellerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen modellerden atritör değirmene beslenen mikanın özgül yüzey alanı, boyut dağılımı ve değirmenin parametre değerleri bilindiğinde, ürünlerin yüzey alanı ve boyut dağılımı tahmin edilebilecektir.

Bu çalışmanın amacı, mikanın atritör değirmende kuru ve yaş olarak yüksek özgül yüzey alanlı ürünlere öğütülebilirliğini araştırmak ve değirmende özgül yüzey alanı ve kırılma hızına bağlı kesikli öğütme modellerini geliştirmektir.

Bu tez, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (Proje no: 201315028, Proje başlığı: Karıştırmalı Bilyalı Değirmende Mikanın Mikronize Boyuta Öğütmesinde Özgül Yüzey Alanı Değişiminin İncelenmesi) ve Türkiye Bilimsel Araştırmalar Kurumu (Proje no: 112R008, Proje başlığı: Karıştırmalı Bilyalı Değirmende Mikanın Kuru ve Yaş Olarak Mikronize Boyuta Öğütülmesinin Araştırılması) tarafından desteklenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

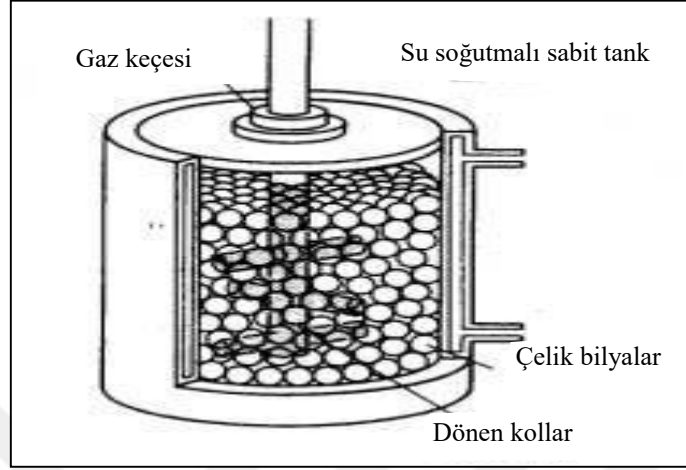
2.1. Atritör Değirmenler (Karıştırılmalı Bilyalı Değirmenler)

Gelişen teknoloji ile birlikte plastik, seramik, boya ve ilaç gibi sanayi kollarında çok ince boyuttaki malzemeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Diğer taraftan artan enerji maliyetleri ve yüksek tenörlü cevher yataklarının işlenerek tükenmesi sonucu düşük tenörlü cevher yataklarından yararlanma çabaları, malzemelerin ince ($<100\ \mu\text{m}$), çok ince ($<10\ \mu\text{m}$) veya süper ince ($<1\ \mu\text{m}$) boyutlarındaki tanelerinin elde edilebilmesi için yeni tekniklerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla kullanılan boyut küçültme cihazları tamburlu, titreşimli, darbeli, jet ve karıştırıcılı bilyalı değirmenler olarak sıralanabilir. Son yıllarda karıştırılmalı bilyalı öğütme tekniğinin, diğer öğütme teknikleriyle karşılaştırıldığında enerji veriminin daha yüksek olması nedeni ile, üzerinde durulmaktadır(Ergün vd., 2008).

Atritör değirmenler ayrıca diğer ince öğütme yapan cihazlara göre kolay işletim, basit yapı, yüksek boyut küçültme oranı, malzemenin öğütme ortamı tarafından az kirlenmesi yönlerinden de son yıllarda oldukça büyük önem kazanmıştır. Dar boyut grubunda ürün istenen endüstri alanlarında tercih edilmektedir. Atritör değirmenler bilyalı değirmen ürününün sınıflandırılması sonrası tekrar öğütmesinde de kullanılmaya başlamıştır (Pilevneli, 2003).

Atritör değirmenler (Şekil 2.1), etrafında aşırı ısınmayı engelleyen bir su ceketini bulanan sabit silindirik bir tank ve içerisinde yüksek hızda dönen (maksimum 2000 devir/dakika) bir karıştırıcıdan oluşmaktadır (Kılınç ve Uslan, 2003). Atritör değirmenler, karıştırıcı tipine (disk, pin, helezon vb.) ve silindirik tankın doğrultusuna (düşey ve yatay) göre sınıflandırılmakla beraber, hangi tip olursa olsun öğütme mekanizması birbirinin aynısıdır. Öğütme işlemi kuru veya yaş olarak gerçekleştirilebilmektedir. Değirmen tankının hacimce % 60-90'ı beslenen tane boyutuna (maksimum 1 mm) bağlı olarak boyutları 0,2-3 mm arasında değişen öğütücü ortam (çelik bilya, silpeps, seramik bilya, kum, çakıltası veya öğütülecek malzemenin kendisi) ile doldurulur. Karıştırıcı yardımı ile istenen hızda karıştırma yapılarak beslenen malzemenin boyutu küçültülür. Ulaşılabilen ürün boyutu

1 μm 'nin altında olabilmektedir. Belirtilen en önemli olumsuzluk değirmen içindeki yüksek hıza bağlı olarak öğütücü ortam ve tank içindeki aşınmanın fazlalığıdır (Ergün vd., 2008).



Şekil 2.1. Düşey atritör değirmenin şematik gösterimi

Temel tasarımı 1920'li yıllara kadar uzanan atritör değirmenler, ilk kez 1960'lı yıllarda kaolin'in öğütülmesinde kullanılmıştır. Bu tip değirmenlerin hızı 4 m/s ve daha az olduğundan atritör (attritors) olarak adlandırılmakta ve son yıllarda da mineral endüstrisinin ilgisini çekmektedir (Feld vd., 1960; Jimenez, 1981; Stehr, 1988; Jankovic, 1999). Karıştırılmalı bilyalı değirmenlerin bir çok endüstride kullanılma nedeni ince ve çok ince öğütme yapabilmesi ve kirlenmeyi azaltmasıdır. Giderek artan önemi göz önüne alındığında, karıştırılmalı bilyalı değirmenlerinin güç özelliklerine ilişkin temel araştırmalar yapılmıştır (Zheng vd., 1996). Çalışma prensibinden dolayı atritör değirmenlerde etkin olan kuvvetler, bilyalı veya çubuklu gibi aktarılan ortamla çalışan değirmenlerden farklıdır. Aktarılan ortamla çalışan değirmenlerde öğütme büyük ölçüde çarpma ve basınçla, kısmen de aşındırma kuvvetleri ile olurken; atritör değirmenlerde aşındırma ve kesme kuvvetleri, çarpmayla birlikte ağırlıklı olarak yer almaktadır. Kesme ve aşındırma kuvvetlerinin etkin olduğu bir değirmenden daha ince boyutlu ürünlerin elde edilebildiği bilinmektedir. Aktarılan ortamla çalışan değirmenlerde tambur hareket ettirilerek ortam (kalın çubuk veya bilya) hareket ettirilirken, atritör değirmenlerde yalnızca bir karıştırıcı yardımı ile ortam (ince bilya) hareket ettirilmektedir. Bu sayede değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarı, tambur değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek olmaktadır. Çünkü aktarılan ortamla çalışan tambur değirmenlerde enerjinin büyük bir bölümü tamburu hareket ettirmek için kullanılmaktadır. Genellikle 100 μm 'nin altındaki

öğütmelelerde enerji tüketiminin geleneksel değirmenlere göre daha az olduğu belirtilmektedir (Pilevneli, 2003; Hacıfazlıoğlu, 2009).

Cevher hazırlama işlemlerinde kullanılan aktarılan ortamla çalışan değirmenlerde 75 μm 'nin altındaki öğütmelelerde verim çok düşmekte ve öğütme ekonomik olmamaktadır. Aktarmalı değirmenlerde ince öğütmede temel problemler, kritik hızın üzerindeki hızlarda santrifüjün oluşmasından dolayı değirmenin düşük hızlarda çalıştırılması zorunluluğu ve aktarmalı değirmenlerde iri ortam kullanıldığı için ortam sayısının az ve bilya doluluğunun düşük olmasıdır. Atritör değirmenlerde yüksek karıştırma hızı ve küçük çaplı bilya kullanımı nedenleriyle birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması sonucu 10 μm 'nin altında bile ekonomik öğütmeleler yapmak mümkündür (Celep vd., 2008).

Aktarmalı bilyalı değirmenlerde öğütme ile atritör değirmenlerde öğütme karşılaştırıldığında, bilyalı değirmenlerde iri boyutlardaki malzemenin azalmasıyla birlikte ince boyutlarda bir artış gözlenir. Fakat yine de iri boyutlarda bir miktar malzeme kalır. Atritör değirmenlerde ise ince boyutta malzeme artışına paralel olarak iri boyutlu malzeme de kaybolur. Atritör değirmenler, aktarmalı bilyalı değirmenlere oranla 10 kat daha fazla kırılma hızı değerleri sağlamaktadır (Pilevneli, 2003).

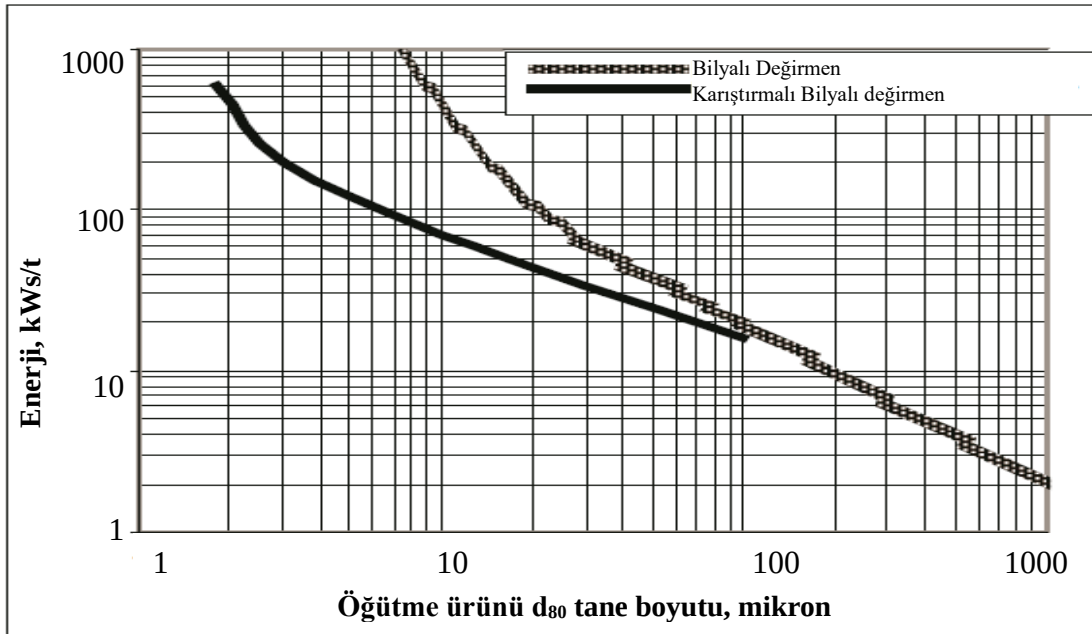
Atritör değirmenlerdeki boyut küçültme işlemleri birinci dereceden olmayan (non linear) öğütme kinetiği göstermektedir. Yani öğütme süresi arttıkça kırılma hızı yavaşlama göstermektedir. Bu nedenle enerji tüketimi belirli bir öğütme süresi (tane inceliği) sonrasında üstel olarak artmaktadır. Öğütmedeki yavaşlamanın nedenleri şunlar olabilir (Pilevneli, 2003):

- Malzemeler belirli boyutun altına indiğinde kırılma davranışı terk ederek plastik davranışa geçer. Bu boyut sınırından sonra malzemenin boyutunda küçülme değil şekil değiştirmenin meydana gelmesi,
- İri tanelerin, ince tanelere gelecek darbelere karşı kalkan görevi görerek (yastıklama etkisi) ince tanelerin öğütücü kuvvetlerle karşılaşmasının ve ufalanmasının engellemesi,
- Tanelerin ufalanmasıyla birlikte taneler birbiriyle birleşir. Bu da bir yastıklama etkisi meydana getirebilir.

Öğütme kinetiğini doğrusallıktan uzaklaştıran incelik sınırı çimento klinkeri için 2,5 μm (d_{50}) olarak bulunmuştur. Kireçtaşı'nın yaş öğütülmesinde ise bu sınır 1-2 μm 'dur (Pilevneli, 2003).

Atritör değirmenlerde tanelerin hareketi incelendiğinde, değirmen içinde enerji dağılımının iki bölgede yoğunlaştığı görülmüştür. Bunlar: karıştırma diskinin uç bölgeleri ve disk karşı duvar çeperleridir. Bu bölgeler değirme hacminin %10'luk bir bölgesini oluşturmasına rağmen, bu bölgelerde harcanan enerji %90'ı bulmaktadır (Pilevneli, 2003).

Atritör değirmenlerde ve bilyalı değirmenlerde ürün tane boyutu ile enerji tüketimi arasındaki ilişki Şekil 2.2'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, ürün tane boyutu azaldıkça atritör değirmenlerde bilyalı değirmenlere göre çok daha az enerji tüketilmektedir (Samanlı, 2010).



Şekil 2.2. Atritör ve bilyalı değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketimi arasındaki ilişki

Atritör değirmenler, kaolin, mika, profillit, talk, mermer, barit ve florit gibi endüstriyel hammaddelerin öğütülmesinde kullanıldığı gibi; kömür, kireçtaşı, kalkopirit konsantresi, pirit, boya ve demir oksit gibi diğer hammaddelerin öğütülmesinde de kullanılmaktadır. 15 μm altına yapılacak öğütmelerde diğer yöntemlere oranla daha ekonomiktir. Uygulamada öğütme inceliğine göre ton başına tüketilen enerji 10 ile 2000

kWs/t arasında olmaktadır. Atritör değirmenler ile d_{50} 'si 6 μm olan ürünler 20 t/s kapasiteyle üretilmektedir. Bu değirmenlerde yapılan öğütmede özgül enerji tüketimi aktarmalı bilyalı değirmenlere oranla %60 daha az olabilmektedir (Pilevneli, 2003).

Ticari olarak çeşitli parçaları değiştirilmiş ve değişik şekillerde tasarlanmış çok sayıda atritör değirmen bulunmaktadır. Bunlardan bazıları: Tower Mill (Vertimill), Isa Mill, Svedala Detritor, Sala Agitated Mill, ANI-Metsoprotech SVM Mill, MaxxMill, Pitt Mill ve Draiss Mill'dir. Tower mill, dikey olarak yerleştirilmiş bir gövde ve dönen helisel kanatçıklardan oluşmaktadır. MaxxMill değirmeninde ise değirmenin gövdesi de dönmekte ve gövde içerisinde bulunan bir plaka yardımıyla bilyaların akışı değiştirilmektedir. Bu sayede daha etkili bir öğütmenin yapıldığı ileri sürülmektedir. Draissmill'de ise öğütme verimliliğini artırmak için öğütme duvarına dik olarak yerleştirilmiş çubuklar (pinler) bulunmaktadır (Hacıfazlıoğlu, 2009).

Üretilen ilk ekipmanlar düşük hızlarda çalışmakta (<6 m/sn) ve aşındırıcı (attritor) olarak adlandırılmışlardır. Çoğunlukla flotasyon öncesinde mineral yüzeylerinin temizlenmesi amacıyla kullanılmışlardır. İlerleyen yıllarda değirmen gövdesinin boy/çap oranının artmasına paralel olarak yüksek karıştırma hızına sahip değirmenler geliştirilmiştir. Günümüzde cevher hazırlama alanında kullanılan birçok atritör değirmen mevcuttur. Bunlar düşük ve yüksek hızlı değirmenler olarak ikiye ayrılmaktadır. Düşük hızlı değirmenler normalde 3 m/s hızda yaklaşık d_{80} : 15 μm , yüksek hızlı değirmenler 15 m/s hızda yaklaşık d_{80} : 5 μm öğütme ürün inceliğinde çalışmaktadırlar (Celep vd., 2008).

2.1.1. Atritör değirmenlerde öğütmeyi etkileyen değişkenler

Atritör değirmenlerin performansına etki eden pek çok değişken vardır. Bu değişkenler minimum enerji tüketimiyle istenen ürün inceliğine ulaşmak için optimize edilmelidir. Bu değişkenler tasarım ve işlem değişkenleri (parametreleri) olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır (Celep vd., 2008).

Tasarım değişkenleri grubu içinde değirmenin boy/çap oranı, karıştırıcı tipi, karıştırıcı şaft üzerinde bulunan disk veya çubukların boyutları ve şaft üzerindeki konumları

gibi değişkenler bulunmaktadır. Tasarımlardaki bu değişiklikler değirmen içindeki akış özelliklerini ve bilya hareketini belirlemektedir.

Literatürde, işletme parametrelerinin karıştırmalı bilyalı değirmenlerin öğütme performansı üzerindeki etkisini araştıran çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Mankosa, 1986; Gao ve Forssberg, 1993; Persson ve Forssberg, 1994; Tüzün ve Loveday, 1994; Kapur vd., 1996; Zheng vd., 1996; Zheng vd., 1997; Belaroui vd., 1999; Bernhardt vd., 1999; Fadhel vd., 1999; Kwade, 1999a; Fadhel ve Frances, 2001; Jankovic, 2003) İşlem değişkenleri grubu içinde ise genellikle aşağıdaki işlem değişkenleri incelenmektedir:

- Öğütme tipi (kuru veya yaş)
- Yaş öğütmede pülp yoğunluğu (kuru öğütmede boşluk doldurma oranı)
- Ortam boyutu, miktarı ve yoğunluğu
- Karıştırma hızı
- Beslenen cevher boyutu
- Öğütme yardımcılarının varlığı

2.1.1.1. Öğütme tipinin etkisi

Atritör değirmenlerde öğütme, bilyalı değirmenlerde olduğu gibi, yaş ve kuru olarak yapılabilmektedir. Kuru öğütmede yaş öğütmeye göre daha fazla enerji tüketilmektedir.

Yaş öğütmede atritör değirmen genellikle kesikli, kademeli (pass by pass) yada devirdaim (circular) çalıştırılır. Kademeli sistemde besleme 10-120 litre/saat olacak şekilde öğütme yapılır. Bu sistemde besleme tankındaki malzeme değirmene beslenir. Beslenen malzeme bitene kadar ürün değirmene tekrar döndürülmez. Birinci adımın ürünü ikinci adıma besleme olur ve işlem bu şekliyle devam eder. Böylelikle malzemenin değirmende geri karışmalara meydan vermeden bir an önce sistemi terk etmesi sağlanır. Böyle çalışan sistemlerin boyut dağılımları daha dik ve özgül enerji tüketimleri de daha düşüktür. Devirdaim şeklinde bu tip bir imkan olmadığından, daha geniş boyut dağılımına sahip ürünler elde edilir (Pilevneli, 2003).

Atritör değirmenlerde de karıştırma ile bilyalara aktarılan enerjinin bir kısmı ısı ve ses olarak tüketilmekte, toplam enerjinin öğütmede kullanılan kısmı azaldığı için özgül

enerji tüketimi de artmaktadır. Kuru öğütme enerjisi yaş öğütmeye göre daha fazla olmaktadır. Bunun nedeni, kuru öğütmede öğütülen tanelerin yüzey alanı arttıkça yüzeydeki moleküller arası Van der Walls kuvvetlerinin ve bölgesel kuvvetlerin taneler arası etkileşimleri arttırması sonucu, tanelerin topaklanmalarının artmasıdır. Topaklanma sonucu, iyi bir karışım sağlanamadığı için ve tanelerin yastıklama etkisiyle, öğütülen malzeme öğütücü ortamla yeterince temas edememektedir. Topaklanmayı önlemek için ya $5\text{ }\mu\text{m}$ 'dan ince tanelerin hemen sistemden uzaklaştırılması ya da dağıtıcı kimyasalların (öğütme yardımcılarının) kullanımı gerekmektedir (Pilevneli, 2003).

Van der Walls kuvvetleri 1-10 nm mesafede etkili ve bu kuvvetlerin enerjisi 0,04-4 kJ/mol olduğundan, Van der Walls kuvvetleri tane boyutu küçüldükçe daha etkili olmaktadır. Tanelerin yüzey elektrik yükü topaklanmaya yardım edebilir fakat artı ve eksi nötürleşmeleri ile çok kuvvetli topakların oluşmasına çok katkıları yoktur. Tane boyutu küçüldükçe moleküller arası kimyasal bağ kuvvetleri (hidrojen bağları) 40-400 kJ/mol seviyesine ulaşır ve malzemenin nem içeriği topaklanmayı arttırıcı bir etken haline gelir ve böylece katı taneler arası sıkı köprüler kurulur (Pilevneli, 2003).

Dağıtıcıların (öğütme yardımcılarının) görevi öğütmeyi iyileştirmektir. Bu da tanelerin topaklaşmasını önlemek suretiyle reolojiyi (akışı) değiştirerek yapılır. Tanelerin topaklanmasının önlenmesiyle birlikte bilya yüzeylerinin ve değirmen cidarlarının öğütülen malzeme ile kaplanmaları da önlenmiş olur. Bu açıdan bu tür kimyasallar kapasite arttırıcı veya enerji tüketimi düşürücü etki yaparlar. Çok değerlikli inorganik tuzlar, Dow XFS 4272, sodyum poliakrilat, polistren, polimetil, metakrilat, poliakrilamit, polimetakrilik asit, sodyum oleat, trietanol amin, polikarboksilat, sodyum heksametafosfat gibi maddeler kalsit, kuvars, talk ve wollastonit gibi cevherlerin kuru ve yaş öğütülmesinde dağıtıcı olarak kullanılmıştır (Pilevneli, 2003).

2.1.1.2. Pülp yoğunluğunun etkisi

Pülpün katı içeriğinin, öğütülmüş ürün inceliğine doğrudan etkisi olması nedeniyle, yaş öğütme sistemlerinde çok önemli faktördür. Yapılan bir çok çalışmada düşük katı yoğunluğuna sahip pülpden daha ince ürünler elde etmenin mümkün olduğunu gösterilmiştir. Bununla birlikte, pülpün katı konsantrasyonu ağırlıkça % 75'i aşarsa, çok ince

partiküllerin neden olduğu yüksek viskozite nedeniyle tanelerin kırılma oranı düşer (Gao ve Forssberg, 1993; Tüzün, 1993; Zheng vd., 1996; Belaroui vd., 1999; Bernhardt vd., 1999). Çok ince parçacıkların neden olduğu yüksek viskoziteden kaynaklanan olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması için çeşitli öğütme yardımcıları (kimyasallar) kullanılmaktadır. Bu kimyasallar, yüzeydeki yük yoğunluğunu arttırmak ve pülpin görünür viskozitesini düşürmek için partiküllerin yüzeyine emilir. Öğütme yardımcı maddeleri olarak kullanılan bu kimyasallar, özellikle yüksek katı konsantrasyonuna sahip olan pülpin akışkanlığını arttırmak için kullanılır, böylece değirmenin kapasitesi arttırılabilir (Kapur vd., 1996; Zheng vd., 1997; Bernhardt vd., 1999)

Yaş öğütmede tüketilen enerji, pülp yoğunluğuyla ters orantılıdır. Pülp yoğunluğunun artışı ile enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Örneğin pülp yoğunluğu %28'den %43'e çıkarıldığında tüketilen enerjiden %30 tasarruf sağlanmıştır. Pülp yoğunluk değerleri öğütülen malzeme ve öğütme sistemine göre değişebilmektedir. Belirli bir ürün inceliği için en uygun pülp yoğunluk değerlerinin %10-30 arasında olduğu belirlenmiştir. Pülp yoğunluğunun çok arttırılmasıyla, aşırı viskoziteden dolayı malzemenin öğütülmesi zorlaşır ve özgül enerji tüketimi de artar. Her ürün boyutu için sabit bir pülp yoğunluğu da kabul edilemez. Çünkü malzeme boyutu inceldikçe pülp yoğunluğu değişmez fakat artan tane sayısı ile birlikte katı yüzey alanı da artacağından viskozite de artar. Bu durumda öğütme yardımcısı (dağıtıcı) kullanılmalıdır. Ancak gereğinden fazla dağıtıcı kullanmak öğütmeyi zorlaştıracığı için dağıtıcı kullanımında da dikkatli olmak gerekir (Pilevneli, 2003).

Pülp yoğunluğu arttıkça ortam aşınma miktarı azalır. Örneğin %50 pülp yoğunluğunda 0,051-0,064 kg/kWs olan ortam aşınması, %65 pülp yoğunluğunda 0,015 kg/kWs olmaktadır. Pülp yoğunluğu arttıkça, bilyalar arasına daha çok tane girdiğinden, bilya-bilya temas sayısının azalmakta ve bunun sonucunda da bilya aşınması düşük olmaktadır (Pilevneli, 2003).

2.1.1.3. Ortam boyutu, miktarı ve yoğunluğunun etkisi

Kullanılan öğütücü ortam boyutu atritör değirmenlerde en önemli faktördür. Kırılma için gereken enerji öğütme ortamı yoluyla tanelere aktarılır. Belirli bir tane boyutu, mineral türü ve spesifik enerji girişi için, bilya boyutu, özellikle stres yoğunluğu (SI) ve stres

numarası (SN) açısından öğütme işleminde çok önemli bir rol oynamaktadır (Kwade, 1999a). Ortam boyutu beslemedeki en iri taneyi kırabilecek kadar büyük olmalıdır. Belli bir tane boyutundan küçük bilya kullanıldığında beslemedeki iri taneler, bilyalar tarafından kavranamadığından, öğütülememektedir. Mankosa (1986), optimum bilya tane boyutunun 20:1 olduğunu önermiştir. Zheng vd. (1996), etkili bir öğütme performansı elde etmek için bilya tane boyutu optimum oranını 12: 1 olarak belirlemişlerdir. Yapılan araştırmalar sonucunda bilya boyutu ile tane boyutu arasındaki optimum oranın 7:1 ile 20:1 arasında olması gerektiği önerilmiştir. Ortam boyutu 1 mm'den 4 mm'ye artıkça tüketilen enerji miktarı da altı kat artmaktadır. İri bilya kullanılması durumunda düşük karıştırma hızının, ince bilya kullanılması durumunda ise yüksek karıştırma hızının öğütme üzerinde daha etkili olduğu ileri sürülmektedir (Celep vd., 2008). Tüzün (1993), değirmen hızı ve ortam boyutu arasında karşılıklı bir etkileşimin olduğunu ve küçük bilyaların yüksek devirlerde, büyük bilyaların düşük devirlerde öğütme performansı üzerinde daha etkili olduğunu öne sürmüştür.

Bilya boyutu azaldıkça enerji sarfıyatı azalır. Fakat bu durumda ürün boyutu daha iri kalacağından aynı inceliği elde etmek için öğütme süresinde artış gerekecektir. Karıştırma hızının çok yüksek (11,4 m/s) olduğu durumlarda bile, aynı özgül enerji tüketiminde ince bilyalar irilere oranla daha iri boyutta ürün verebilir. Bu, hafif ve küçük bilyalar için belirtilen hızdaki çarpma şiddetinin yetersiz kaldığını göstermektedir. Kırılma hızı artan bilya boyutuyla artar ve doğrusallığa yaklaşır. Fakat artan bilya boyutuyla enerji tüketimi de artacağından, kırılma hızındaki artıştan kaynaklanan yarar dengelenmiş olur (Pilevneli, 2003).

Bilya doluluğu, bilyalar arası malzeme doluluğunu ve dolayısıyla ürün inceliğini de etkileyen bir parametredir. Ayrıca, bilya doluluğunun temel etkisi spesifik enerji tüketimi üzerinde gözlenmektedir. Genel olarak değirmenlerin, maksimum ortam dolumlarında çalıştırılması önerilir. Sadler vd. (1975), daha yüksek bilya doluluğunun faydalarını ispatlamak için, değirmen yükünü kademeli olarak değiştirmiş ve her bir durum için her bir boyut fraksiyonundaki kaybı ölçmüştür. Daha yüksek öğütme performanslarına, değirmenden daha yüksek bilya dolumları yapıldığında ulaşıldığı sonucuna varmıştır. Tüzün (1993), ise deneysel koşullarında, aynı spesifik enerji tüketiminde, bilyalı doluluğunun ürün inceliğinde belirgin bir etkisi bulunmadığını, ancak değirmenin enerji çekimini doğrusal

olarak arttırdığını bulmuştur. Geleneksel değirmenlerde bilya şarj oranı yaklaşık %40-45 iken atritör değirmenlerde değirmen hacminin %85 i kadar olması, daha iyi öğütme enerjisi sağlanmasına neden olmaktadır. Öğütme ortamı düşey atritör değirmenlerde üstten taşacağı ve yatay değirmenlerde ise aşırı ortam ve karıştırıcı aşınmasına neden olacağı için, aşırı öğütme ortamı kullanımından kaçınılmaktadır (Celep vd., 2008).

Atritör değirmenlerde tüketilen enerjinin büyük bir kısmı ortamın hareket ettirilmesi için kullanılır. Bu nedenle değirmenin öğütme performansını etkilemeden ortam yoğunluğunu azaltmanın bir yolu bulunabilir ise enerji tüketiminde belirgin bir azalmaya yol açar. Bu yüzden, öğütme sonucuna bilya yoğunluğunun etkisi, çeşitli araştırmalara konu olmuştur (Gao vd., 2000; Pease vd., 2006; Graves ve Boehm, 2007; Dikmen, 2008). Literatürdeki çalışmalar cam, çelik, alüminyum, zirkon-silis ve seramik bilyalar ile yapılmıştır. Bazen iri cevher taneleri de öğütme ortamı olarak kullanılmıştır. Zheng vd. (1996), çelik ve cam bilyalar arasındaki operasyonel farklılıkları araştırmışlar ve çelik bilyaların kullanımının daha iyi öğütme performansı elde ettikleri, ancak cam bilyaların neredeyse iki katı enerji tükettiği sonucuna varmışlardır. Genellikle bilyanın yoğunluğu arttıkça, kırılma hızı da artmaktadır. Daha yoğun bilya daha kısa sürede öğütme yapmaktadır. Bilya yoğunluğundaki farklılığın aynı özgül enerji tüketimi için ürün boyutu üzerinde %17 kadar etkisi olabilir (Pilevneli, 2003).

Bir araştırmada d_{80} 'i 5 μm olan bir ürün elde etmek için 1,5 litre hacimli bir atritör değirmende öğütme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde öğütme ortamı olarak bakır reverber fırın curufu ($3,7 \text{ g/cm}^3$) ve ağır ortam artığı ($2,6 \text{ g/cm}^3$) kullanılmıştır. Deneyler sonucunda fırın curufu kullanıldığında daha fazla enerji tüketildiği fakat istenilen inceliğe daha kısa sürede erişildiği görülmüştür. Buradan da fırın curufu ile öğütmenin enerji yönünden verimsiz, kapasite yönünden verimli olduğu sonucuna varılmıştır (Pilevneli, 2003).

Düşük karıştırma hızı ve iri besleme kullanıldığı zaman bilyaların yoğunluğu azaldıkça (cam, otojen malzeme vb.) yüksek yoğunluklu bilyalara (çelik, demir vb.) oranla öğütme etkinliği azalmaktadır. Bunun nedeni, atritör değirmenlerde basma kuvvetinin makaslama kuvveti kadar etkin olmasıdır. Atritör değirmenlerde kullanılacak ortamın seçimi aşınmaya, performansa, maliyete ve elde edilebilirliğe bağlıdır. Kullanılacak materyal ucuz ve aşınarak ortamı kirletmeyecek özelliğe sahip olmalıdır. Örneğin çelik bilya

kullanıldığında öğütmeden sonra oluşacak olan demir hidroksitlerin flotasyon seçimliliğini etkilememesi istenmektedir (Celep vd., 2008).

Yukarıdaki bilgiler koşullar arası etkileşimi gösterdiğinden, en iyi koşullar için kesin ve tek bir sonuç çıkarmak mümkün görünmemektedir. Bu yüzden bilya çapı/tane boyutu oranını genellemek pek mümkün olmamaktadır. Atritör değirmende öğütme veriminin bilya çapının yanında, bilya cinsi ve şekline, istenen ürün inceliğine, değirmenin çapına, shaftın kol sayısı ve kolun uzunluğuna, bilya doluluk oranına, boşluk doldurma oranına, pülp yoğunluğuna, karıştırma hızına v.b. etkilere de bağlı olduğu unutulmamalıdır (Pilevneli, 2003).

2.1.1.4. Karıştırma hızının etkisi

Bilyalı değirmenlerde bilya boyutu oldukça iri olduğundan, bilyalara öğütme etkisini sağlayacak kinetik enerjiyi kazandırmak kolaydır. Atritör değirmenlerde ise bilya boyutu oldukça küçük olduğundan bilyalara öğütme etkisini sağlayacak kinetik enerjiyi kazandırmak için karıştırma hızının yüksek olması gerekir. Yüksek karıştırma hızı bir taraftan bilyaların kinetik enerjisini arttırarak daha yüksek çarpışma hızlarına, diğer taraftan da bilyaların çarpışma sayısının artmasına neden olur. Ayrıca, radyal yönde hız gradyentlerinin varlığı yüksek hızlarda kesme kuvvetlerine neden olacaktır. Bunların sonucunda bilyalardan malzemeye verimli olarak enerji aktarımı, yüksek karıştırma hızlarında olmaktadır (Pilevneli, 2003). Birçok çalışmada, artan karıştırma hızının enerji tüketimini arttırdığı ve daha ince ürün ürettiği kanıtlanmıştır (Sadler vd., 1975; Zheng vd., 1996; Fadhel ve Frances, 2001; Jankovic, 2003; Wang vd., 2004; Dikmen, 2008).

Karıştırma hızı öğütmeyi etkileyen en önemli etkidir. En verimli karıştırma hızı, bilyaların taneler arası kuvvetleri yenmeye başladığında elde edilmektedir. Bu hız aşıldığında fazla enerjinin ürünün inceliğine hiç bir katkısı olmadığı gibi aşırı ısınmaya ve enerji kaybına neden olur. Atritör değirmenlerde öğütme birinci dereceden olup, güç sarfiyatı ve kırılma hızı karıştırma hızının küpü ile doğru orantılıdır (Pilevneli, 2003).

Karıştırma hızı arttıkça kırılma hızı da artmakta bunun sonucunda çok ince ürün boyutuna daha az enerji tüketilerek ulaşılmaktadır. Ayrıca, karıştırma hızı arttıkça daha dar

boyut dağılımına sahip ürünler elde edilmektedir. Aynı özgül enerji tüketiminde yüksek karıştırma hızının ürün boyutu üzerinde %12 kadar etkisi vardır (Pilevneli, 2003).

Atritör değirmenlerde karıştırma hızının artmasıyla elde edilen ürünün tane boyutu küçülmekte ve değirmenin harcadığı güç artmaktadır. Böylece değirmenin birim hacminde harcanan özgül enerji miktarında bir artış olmaktadır. Bunun sonucunda istenen ürün tane boyutuna daha kısa sürede ulaşılmakta ve değirmen kapasitesinde artış gerçekleşmektedir. Bunlara karşın yüksek hızlarda endüstriyel ölçekte tasarımdaki güçlükler nedeniyle optimum bir hız seçimi gerekmektedir (Celep vd., 2008). Jankovic (2003), dik karıştırmalı değirmenler üzerine yaptığı çalışmalardan hareketle, karıştırma hızının ve ürün boyutunun birbiriyle ters orantılı olduğunu ve daha küçük boyutlu ortamların kullanılmasının, karıştırma hızının etkisini azalttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, karıştırma hızı arttıkça öğütücü ortam aşınması da artmaktadır.

2.1.1.5. Beslenen cevher boyutunun etkisi

Verimli bir öğütme için beslenen cevherin 100 μm 'dan ince olması gerekir. Değirmene beslenen malzemenin boyutu iri ve boyut dağılımı geniş ise tanelerin kırılma hızı artmaktadır. Belirli bir ürün inceliği elde etmede besleme boyutu arttıkça, özgül enerji tüketimi de artacaktır. Besleme boyutu ile kullanılan bilya boyutu arasında daha önce de bahsedildiği gibi bir ilişki söz konusudur. Herhangi bir besleme boyutuna göre, aynı özgül enerji tüketiminde, en ince ürün boyut dağılımını verecek en uygun bilya boyutu vardır. Örneğin -70 μm boyutlu dolomitin yaş öğütülmesinde 0,3-0,4 mm, 0,8-1,0 mm ve 1,6-2,5 mm silis bilyalar kullanılmış ve en iyi sonuçlar 0,8-1,0 mm bilya ile alınmıştır (Pilevneli, 2003).

2.1.1.6. Öğütme yardımcılarının etkisi

Öğütme, kristal veya amorf yapı içindeki kimyasal bağların kopması ile yeni yüzeylerin oluşması işlemidir. Ancak, herhangi bir öğütme işleminde öğütme cihazına iletilen enerjinin yalnızca % 1 kadarı yeni yüzey oluşumunda harcanmakta, %99'u ise, iletim kayıpları, sürtünme, ısı, ses, vb. başka enerji şeklinde tüketilmektedir (Öner vd., 1985).

Kırma ve öğütme, cevher hazırlamada boyut küçültme işlemleridir. Cevher hazırlama tesislerinde kullanılan enerjinin yaklaşık %50'si öğütme devrelerinde harcanmaktadır. Üretim sahasından elde edilen 5-250 mm boyutlu malzeme, öğütmede uygulanacak yönteme göre 10-300 μ m'ye indirilebilir. Cevher hazırlama tesislerinde birinci ve ikinci kademe kırma 0,12 kWs/t, birinci kademe öğütmede 2-4 kWs/t, ince kademe öğütmede 5-20 kWs/t, çok ince öğütmede 20-100 kWs/t, 10 mikron altındaki öğütmelerde de 100-1000 kWs/t civarında enerji tüketilmektedir. Bu nedenle boyut küçültme ve özellikle öğütme işlemlerinin çok iyi planlanması gerekmektedir. Öğütme devrelerinde istenilen öğütmenin sağlanabilmesi ve verimliliğin artırılması için öğütme koşullarının çok iyi saptanması önemlidir (Ateşok vd., 2005).

Rumph (1962), toplam enerji üretiminin %5'inin öğütmede harcandığını ileri sürmüştür. 1962'den günümüze, kuşkusuz, teknolojik ilerlemelere koşut olarak öğütmede enerji tüketimini azaltıcı gelişmeler olmuştur, özellikle, öğütme sistemlerinin otomatik kontrolü bu yönde olumlu sonuçlar vermiştir. Ancak, bir yandan zengin cevher yataklarının tükenmesi nedeniyle disemine yatakların zenginleştirilmesi gereksinimi, diğer yandan ince öğütülmüş hammaddelerin endüstrinin pek çok dalında kullanımının artması ve yeni kullanım alanlarının ortaya çıkması, daha fazla miktarların giderek incelen boyutlara öğütmeyi gerektirmektedir. Bu nedenle, günümüzde üretilen toplam enerjinin %5'ten daha büyük bir kısmının öğütmede harcandığı ve bu miktarın önümüzdeki yıllarda daha da artacağı söylenebilir (Öner vd., 1985).

Enerji verimliliğinin düşük olduğu öğütme işlemlerinde yapılacak küçük iyileştirmelerin ne denli büyük ekonomik yararlar sağlayacağı açıktır. Öğütme etkinliğini artırarak daha az enerji tüketimini amaçlayan birçok çalışma yapılmıştır. Bunlar arasında kuru ve yaş öğütme işlemlerinde öğütme yardımcılarının kullanılması önemli ölçüde ilgi çekmiş ve konu üzerinde birçok yayın yapılmıştır (Öner vd., 1985).

Kuru öğütmede öğütülmüş malzemenin topaklanması öğütme hızını olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun nedenleri, öğütülmüş malzemenin Van der Waal's kuvvetlerinin etkisi ile bir araya gelmesi sonucu öğütme ortamında topaklanması ya da öğütücü yüzeylerini kaplamasıdır. Bunu önlemek amacı ile, etilen glikol, propil glikol,

triethanolamin, oleik asit ve aminoasit'ler gibi bazı kimyasal maddeler özellikle çimento, kireçtaşı, seramik hammaddelerinin öğütülmesinde kullanılmaktadır (Ateşok vd., 2005).

Üzerinde birçok çalışma yapılmasına karşın, kuru öğütme yardımcılarının etki mekanizması tümüyle açıklanamamıştır. Bu etkinin anlaşılması, bunların daha etkin kullanımını ve öğütme yardımcısının seçimini kolaylaştıracaktır. Günümüzde mekanizma açıklıkla bilinmediğinden, kuru öğütme yardımcılarının seçimi ampirik yollarla yapılmaktadır. Bununla birlikte kuru öğütme yardımcılarının öğütme üzerindeki etkileri konusunda çeşitli açıklamalar vardır (Öner vd., 1985).

Rebhinder ve Kalinkovskaya (1932), kuru öğütme yardımcılarının katı yüzeylerine soğurularak bunların yüzey enerjilerini ve buna bağlı olarak da dayanımlarını düşürdüğü ileri sürülmektedir. Westwood ve Stoloff (1966), katı yüzeylerine soğurulan kuru öğütme yardımcılarının moleküllerinin, yüzeye yakın dislokasyonları bir tür çivileyerek (pinning), bunların hareketini zorlaştırdığını söylemektedirler. Bilindiği gibi, dislokasyonların hareket kolaylığı plastik özelliğin fazlalığı anlamındadır. Bu hareket azaldığında katılar daha elastik, bir diğer deyişle daha kırılğan özelliğe bürünürler (Öner vd., 1985).

Locher ve Seebach (1972), yukarıda verilen iki açıklamanın karşısında deneysel bulgular yayınlamış ve kuru öğütme yardımcılarının malzemenin öğütme ortamındaki akışkanlığını artırdığını ve öğütmeyi de bu yolla etkilediğini ileri sürmüşlerdir. Klimpel ve Austin (1982), bu tezi destekleyen sonuçlar yayınlamışlardır. Bu araştırmacılara göre kuru öğütme yardımcılarının molekülleri, değirmende öğütülen malzeme yüzeylerine; öğütme elemanları yüzeylerine ve astar yüzeylerine soğurulmakta, böylece bu birimler arasındaki dinamik sürtünmeyi azaltmaktadırlar. Bunun sonucunda malzemenin ve öğütme ortamının değirmende akışı kolaylaşmakta ve tanelerin bilyalar tarafından kolayca kısırılıp öğütülmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, yüzesoğurum sonucu tanelerin yüzey enerjileri azalacağından bunların, özellikle ince öğütme koşullarında, tekrar yapışarak topaklanması da görece olarak azalacaktır. Bu nedenle tanelerin öğütme elemanları ile etkileşmesi buna bağlı olarak da öğütme etkinliği artacaktır (Öner vd., 1985).

Kuru öğütme yardımcılarının hem laboratuvar hem de endüstriyel boyutlarda en çok kullanıldığı yer çimento endüstrisidir. Bunun ana nedeni, bu endüstri kolunda çok büyük

miktarların öğütülmesi ve çimento üretiminde harcanan enerjinin %50'ye varan kısmının öğütmede tüketilmesidir. (Öner vd., 1985).

Yaş öğütmede ise, yaş öğütme yardımcıları kullanılarak pülp reolojisinin (akıcılığının) düzenlenmesi öğütme işlemlerinde çok etkili olmaktadır. Çeşitli araştırmalarda yaş öğütme yardımcıları kullanımıyla pülpün kayma gerilmesi değeri artırılmaksızın pülp yoğunluğunun arttırılabildiği belirlenmiştir. Böylelikle değirmenlerin öğütme kapasitesi artırılabilir. Değirmen tarafından çekilen gücün de pülp akıcılığıyla ilişkili olduğu bulunmuştur (Özkan ve Yekeler, 2001).

Değirmen içerisinde öğütülen malzemenin akışı, öğütme işleminin önemli unsurlarından biridir. Malzeme akışı; pülpün akışkanlığı (pülpün dağılma ve flokülasyon durumu), katıların ve ortamın yoğunluğu gibi pülpün fiziksel özelliklerine bağlıdır. Diğer bir ifadeyle, bu özellikler tanelerin öğütme ortamında nasıl hareket edeceğini belirlemektedir (Özkan ve Yekeler, 2001).

Genel olarak yaş öğütmede kullanılan öğütme yardımcılarının öğütme verimliliğini %100'e varan değerlerde arttırdığı ve %3-6 arasında enerji tasarrufu sağladığı saptanmıştır (Ateşok vd., 2005).

Deneysel çalışmalar malzemelerin kuru öğütülmesi üzerinde aglomerasyon etkisinin, yaş öğütmede ise pülp akıcılığının etkili olduğunu göstermiştir. Yaş öğütmede tane boyutu küçüldükçe, pülp akıcılığının etkisi daha çok hissedilmektedir. Taneler 10 µm ve alt boyuta öğütüldüğünde (örneğin pigmentler ve ince kimyasallar) öğütme işleminin etkinliği tamamen pülp akıcılığıyla saptanabilmektedir. Bu tip çok ince öğütme işlemlerinde yaş öğütme yardımcılarının kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Pülp akıcılığı, tane boyutu inceldikçe azalırken, sıcaklık ve pülpün katı oranındaki değişimler de pülp akıcılığını önemli ölçüde etkilemektedir. İnce öğütme işlemlerinde pülpün kontrolünde birkaç yöntem vardır. Bu yöntemlerin hepsinde kayma gerilmesi değerinin en aza indirilmesi ya da yok edilmesi amaçlanır. Bu yöntemlerden birincisi, yüksek derecedeki bir akışkan ortamda (bol sulu) malzemeleri öğütmek ve ikincisi, pülpde yüksek katı oranı korunurken pülp akıcılığının kontrolü amacıyla yaş öğütme yardımcıları olarak adlandırılan uygun yüzey aktif maddeler (dağıtıcılar) kullanmaktır (Özkan ve Yekeler, 2001). Öğütme yardımcılarının kullanımı ile

sistemin öğütme kalitesinde bir gerileme olmaksızın pülp yoğunluğunun %50'ten %65'lere çıktığı ve böylelikle kapasitenin arttığı ve ortam aşınmasının da önemli ölçüde azaldığı vurgulanmaktadır (Pilevneli, 2003).

Atritör değirmenlerde öğütme esnasında oluşan ince taneler pülp viskozitesinin daha da yükselmesine (pülpün akıcılığının daha da azalmasına) neden olmakta ve böylece öğütme veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bu olumsuzluğu gidermek için öğütme ortamına çeşitli yaş öğütme yardımcıları ilave edilmektedir. Öğütme yardımcıları tane yüzeylerine adsorplanarak tanelerin birbirine yaklaşmasını ve bir araya gelmesini engelleyerek viskozitenin düşmesine (akıcılığın artmasına) neden olmaktadır. Bu reaktifler özellikle yüksek katı konsantrasyonuna sahip pülplerin akıcılığını artırarak değirmenin yüksek kapasitede çalışmasına yardımcı olmaktadır. Yapılan çalışmalarda organik kimyasalların inorganik kimyasallara göre öğütmede daha etkili olduğu görülmüştür. Polikarboksilik asit gibi polimerik kimyasalların küçük miktarları ile uygun bir pülp viskozitesi ayarlandığında, daha az enerji tüketimiyle etkili bir boyut küçültme işlemi gerçekleştirilmektedir. Kullanılan öğütme yardımcılarından bazıları Çizelge 2.1'de verilmiştir (Celep vd., 2008).

Çizelge 2.1. Kuru ve yaş öğütmede kullanılan öğütme yardımcıları

Kimyasal	Tip	Öğütülen malzeme	Öğütme
Tetrasodyum pyrofosfat	S1V1	dolomit	yaş
Sodyum hexametafosfat	S1V1	dolomit	yaş
Akrilik kopolimer	S1V1	dolomit	yaş
Polikarboksilik asit	S1V1	dolomit/kireçtaşı	yaş
Sodyum hidroksit	S1V1	kireçtaşı	yaş
Sodyum oleat	S1V1	kireçtaşı	yaş
Oleik asit	S1V1	kireçtaşı	yaş
Sodyum karboksimetil selüloz	S1V1	kireçtaşı/jips	yaş
Trietanolamin	S1V1	dolomit	yaş/kuru
Trietanolamin+dietanoamine+etanalamine	S1V1	dolomit/kireçtaşı	kuru

2.2. Özgöl Yüzey Alanı

Özgöl yüzey alanı, kırma ve öğütme gibi boyut küçültme işlemleri sonucunda elde edilen ürünlerin birim ağırlığındaki yüzey miktarı olarak ifade edilir (cm^2/gr , m^2/kg).

Günümüzde toz malzemelerin tanımlanmasında tane boyutu, tane şekli ve özgöl yüzey alanı gibi parametreler kullanılmaktadır. Kimyasal zenginleştirme, flotasyon, kurutma, filtrasyon gibi işlemlerde malzemenin özgöl yüzey alanının bilinmesi tane boyutunun bilinmesi kadar önemlidir. Bilimsel çalışmalarda boyut dağılımının özgöl yüzey alanı ile birlikte verilmesi tercih edilmektedir (Anonim, 2012). Aynı şekilde öğütme verimliliği analiz edilirken tane boyutu yanında özgöl yüzey alanının da bilinmesi yararlı olmaktadır.

Minerallerin yüzey alanı, minerallerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Örneğin, bir kil mineralinin kristal boyutu küçüldükçe (montmorillonit gibi) özgöl yüzey alanı artar ve bunun sonucunda da o kilin şişme potansiyeli, plastikliği ve kuru mukavemeti artar.

Killerin yüzey alanı, tane boyutu ve mineralojisi tarafından kontrol edilir. Çizelge 2.2’de bazı kil minerallerinin kalınlık, özgöl yüzey alanı ve çap değerleri verilmiştir. Montmorillonit kil minerallerinin kalınlıkları diğerlerine göre daha az olduğundan, daha yüksek yüzey alanına sahiptirler. Bu yüzden bu killer daha yüksek plastisiteye, daha yüksek aktiviteye ve daha yüksek şişme-büzülme potansiyeline sahiptirler (Uzundurukan, 2006; Demirci, 2010; Büyüköztürk, 2012).

Çizelge 2.2. Özgöl yüzey alanının kil mineralinin cinsi ve boyutuna bağlı olarak değişimi

Mineral	Kalınlık (nm)	Çap (nm)	Özgöl Yüzey Alanı (m^2/gr)
Montmorillonit	3	10-1000	800
İllit	30	10000	80
Kaolinit	50-2000	300-4000	10-30

$$1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m} = 10\text{ Å}$$

Öğütülmüş minerallerin özgül yüzey alanı, tane boyut dağılımı yanında tane şekli tarafından da kontrol edilir. Örneğin bir mineral öğütüldüğünde kübik veya küresel şekilli taneler veriyor ise (kuvars gibi), o mineral küçük yüzey alanına sahip bir mineral olur iken; ince disk veya levhamsı taneler veriyor ise (mika gibi), o mineral daha yüksek yüzey alanına sahip bir mineral olur. Kalınlığı en az olan taneler, en yüksek özgül yüzey alanına sahip tanelerdir.

Özgül yüzey alanı öğütme tipine göre de değişmektedir. Ulusoy vd. (2004), yaptıkları bir çalışmada, kalsiti üç farklı değirmende -250 μm altına öğüttükten sonra -250+45 μm tane boyu aralığında malzemeler elde ederek BET analizleri yapmışlardır. Bu analizler sonucunda, özgül yüzey alanlarının değirmen tipine göre değiştiğini saptamışlardır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Farklı değirmenlerde öğütülmüş kalsit mineralinin BET yüzey alanları

Değirmen Tipi	BET (m^2/gr)
Bilyalı Değirmen	0,27
Çubuklu Değirmen	0,30
Otojen Değirmen	0,24

Öğütme deney sonuçlarının değerlendirilmesinde ürün boyutunun (d_{50}) bilinmesinin yanında ürün özgül yüzey alanının da bilinmesi yararlıdır. Zira, öğütmenin etkinliğini belirleyen en önemli gösterge üretilen yeni yüzey alanıdır. Öğütme sonucu tane boyutu belli bir değere ulaşsa bile ürünün özgül yüzey alanını belirlenmeden öğütmenin etkinliği konusunda son sözü söylemek mümkün değildir. Örneğin, değirmenden elde edilen iki ürünün d_{50} boyutları aynı olsa bile ürün boyut dağılımları ve özgül yüzey alanı değerleri farklı olabilmektedir (birinin boyut dağılımı dar ve yüzey alanı küçük iken, diğerinin boyut dağılımı geniş ve yüzey alanı büyük olabilmektedir). Bu nedenden dolayı ürünlerin özgül yüzey alanlarının da bilinmesi yararlı olmaktadır.

Yukarıdaki özgül yüzey alanı bilgilerinden hareketle, atritör değirmende mikanın öğütülmesinde işlem parametrelerinin (öğütme tipi, öğütme süresi, karıştırma hızı, ortam miktarı, ortam boyutu, ortam yoğunluğu, besleme miktarı) ürün yüzey alanı (ürün boyutu

yanında) üzerine de etkisinin olabileceği düşünülerek bu tez hazırlanmıştır. Bilindiği gibi işlem parametreleri değişikçe, öğütme mekanizmaları değişmekte ve bunun sonucunda ürün boyutları ve özgül yüzey alanları da değişmektedir.

2.2.1. Özgül yüzey alanı ölçüm yöntemleri

Özgül yüzey alanı aşağıdaki değişik şekillerde ölçülebilmektedir (Anonim, 2012).

1. Geçirgenliğe karşı direnç (permeabilite)
 - a) Sıvı veya gaz akışı
 - b) Gaz akışı değişimi
 - c) Çok düşük basınçlı gaz akışı
2. Adsorpsiyon yöntemleri
 - a) Katı yüzeyine gaz adsorpsiyonu
 - b) Boya çözeltilerinin adsorpsiyonu
3. Radyasyon tahrik yöntemi
4. Tanelerin optik olarak projeksiyonlarının ölçümü
5. Boyut dağılım fonksiyonları

2.2.2. Özgül yüzey alanı ölçüm cihazları

Kullanılan cihazların hemen hepsi hava akış direncinin (permeabilite) ölçülmesi esasına dayanır. Hesaplamalar Kozeny Carman Eşitliği kullanılarak yapılmaktadır (Anonim, 2012).

1. Sub Sieve-Sizer Cihazı
2. Blaine Cihazı
3. Friederich Permeabilite Cihazı

2.3. Öğütmenin Matematiksel Modellenmesi

Öğütme tüketilen enerji sarfiyatı fazla olduğundan verimsiz bir süreçtir. Bu yüzden öğütmenin modellenmesi üzerine uzun yıllardan beri birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir. Modelleme için yapılan yaklaşımlarda kullanılan matematiksel

hesaplamaların zorluğundan dolayı, bir döneme kadar akademik uğraş olarak kalmıştır. Sağlıklı veri alınmasını sağlayan ölçme kontrol sistemlerinin ortaya çıkması ve daha hızlı ve daha yüksek kapasiteli bilgisayarların gelişmesi, öğütme modellerinin de gelişmeye başlamasına neden olmuştur (Napier Munn vd., 1999). Genel olarak öğütme modellerini üç ana başlıkta sınıflandırmak mümkündür.

İlk olarak ampirik özelliğe sahip, öğütme işleminin doğasının tanımından daha çok matematiksel olarak ifade edilmesini sağlayan modeller sıralanabilir. Bu guruba öğütme yasalarını sokmak mümkündür (Napier-Munn ve Lynch, 1992).

İkinci grup modeller ise olay bazlı modellerdir. Bu modeller oldukça güçlüdür, prosesi gerçekçi bir şekilde ifade ederler ve ekstrapolasyona uygundurlar. Bu gruptaki modeller benzetim için yararlı genel algoritmalar olarak son 20 yılda en yaygın kullanılan modellerdir. Bu tür modeller parametre değerleri ve besleme tane boyu bilindiğinde ürün tane boyunun hesaplanabilmesine imkan sağlamaktadır (Yerlikaya, 1994)

Belki de en güçlü sayılabilecek üçüncü grup modeller ise geniş bir şekilde Newton mekaniğini temel alan ve cevher taneleriyle öğütme ekipmanlarının direk olarak etkileşiminden hareket eden deneysel modellerdir. Bunlara mekanistik modellerde denilmektedir (Napier Munn vd., 1999).

Öğütmenin matematiksel olarak ifade edilmesinin temelini atan ilk çalışmalarda harcanan enerji ile bu enerjinin sağladığı tane boyutundaki küçültme oranı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu konuda birçok teori geliştirilmiştir. Kırılgan katının kırılmasında enerji ve boyut küçültme arasında var olan çoğu ilişki, tek ve basit deneysel bir öneriden kaynaklanmaktadır. Boyut küçültme ile boyut küçültme birim işleminde harcanan enerji arasındaki ilişkinin en genel matematiksel ifadesi Eşitlik 2.1’de verilmiştir (Walker vd., 1937; Charles, 1957; İpek, 2003; Erdem, 2009). Bu deneye dayalı denklem, Rittinger, Kick, Bond, Holmes, Charles, Svensson ve Murkes ve diğerlerinin teorik ve deneye dayalı enerji boyut küçültme denklemlerinin genelleştirilmiş şeklidir (Kelly ve Spottiswood, 1982; Genç, 2008).

$$dE = -C \times \frac{dX}{X^n} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte dE birim ağırlıktaki malzemeyi ufalamak için gerekli olan enerjiyi, C malzemenin karakteristiğine ve kullanılan ekipmana özgü bir sabiti, x malzeme tane boyunu ve n ise bir sabiti göstermektedir.

Rittinger (1867), ufalama konusundaki bilinen en eski teoriyi geliştirmiştir (Eşitlik 2.2). Bu teoride bir boyut küçültme yöntemi için harcanacak enerjinin, malzemenin özgül yüzey enerjisinin bir özelliği olduğu ve yeni yüzeyler yaratmak için kullanıldığını önermiştir. Rittinger teorisinde tüketilen enerji, ufalamada oluşan yeni yüzeylerle doğru tane çapı ile ters orantı olduğunu öne sürmüştür (Yerlikaya, 1994; İpek, 2003). Teori harcanan enerjinin tamamının öğütülen malzemeye aktarıldığını kabul etmektedir. Gerçekte ise malzemeye aktarılan enerji, makine tiplerine ve farklı işletme koşullarına göre değişmektedir (Austin ve Klimpel, 1964). Ayrıca yavaş yükleme ile bir katı kırıldığında, birim deformasyon enerjisinin yüzey enerjisinden başka örneğin; ilerleyen dalga enerjisi, kırılmış parçanın kinetik enerjisi, plastik bozulma enerjisi gibi farklı enerji türlerine dönüştüğü bulunmuştur. Yüzey enerjisine dönüşen toplam enerji fraksiyonu, kırılma koşullarına bağlı olarak fazlasıyla değişken olacaktır (İpek, 2003). Rose (1964), bilyalı değirmende öğütülmüş malzemeler üzerindeki enerji dengelerini belirlemiş ve yeni yüzeye dönüştürülen enerjinin %3'ten az olduğunu göstermiştir (Austin ve Klimpel, 1964).

$$E_r = C_r \times \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (2.2)$$

Burada E_r harcanan enerjiyi, C_r Rittinger sabitini, X_1 ve X_2 sırasıyla besleme ve ürün tane boyunu ifade etmektedir.

Kick (1885), gerilim birim deformasyon eğrilerinden yararlanarak yaptığı hesaplamalarda, bir ufalama birim işleminde harcanan enerjinin besleme ve ürün tane boyundan bağımsız olarak sadece boyut küçültme oranı ile ilgili olduğunu öne sürmüştür (Bond ve Wang, 1950). Her ne kadar bu kabul edilebilir görünse de Rittinger'in öne sürdüğü yasa ile bağdaşmamaktadır (İpek, 2003). Kick kavramı Eşitlik 2.3'te verilmiştir.

$$E_k = C_k \times \log \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte C_k kick sabiti, E_k ise birim hacim başına harcanan enerji, X_1 ve X_2 besleme ve ürünün ortalama hacminin o hacimdeki tane sayısına oranı ile elde edilen değerlerdir (Galanty, 1963).

Bond (1952), Rittinger ve Kick'in hipotezlerinin tesis tasarımı için doğru olmayacağından hareketle, enerji-boyut küçültme ilişkisinin iki teorisinin arasında bir yerde uygulanabilir olacağını düşünerek, öğütmenin üçüncü teorisini önermiştir. Bu teori, gereken enerjinin öğütme esnasında üretilen yeni çatlak uzunluğuyla orantılı olacağı temeline dayanmaktadır. Bu teoride, benzer şekilli parçalarda malzemenin birim hacminin yüzey alanı çap ile ters orantılıdır ve birim hacimdeki çatlak uzunluğu o alandaki bir bölümle doğru orantılı, bu yüzden çapın kareköküyle ters orantılı, olduğu göz önünde bulundurulmuştur (Bond, 1947; İpek, 2003). Bununla beraber, yapılan çalışmalarda malzemenin %80'inin geçtiği tane boyutunun kabul edilebilir olduğunu öne sürmüştür (Bond, 1962). Bond eşitliği Eşitlik 2.4'de verilmiştir.

$$E_B = C_B \times \left(\frac{1}{\sqrt{X_2}} - \frac{1}{\sqrt{X_1}} \right) \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte E_B , W olarak da gösterilir, her kısa ton malzeme için kWh olarak enerji girdisidir. C_B , $10W_i$ 'ye eşittir. W_i iş indeksidir ve teorik olarak sonsuz büyüklükteki malzemenin %80'ini 100 mikronun altına indirmek için gerekli olan enerjidir ve bu da malzemenin yaklaşık %67'sinin 75 mikronun altına geçmesi anlamına gelmektedir. X_2 ve X_1 sırasıyla ürün ve beslenen malzemenin %80'inin geçtiği boyutlardır (Bond, 1961).

Charles (1957), Bond'un iş indeksi eşitliğinde ürünün tek bir tane iriliği dağılımı gösterdiğini ancak ürünün birden fazla tane iriliği dağılımına sahip olabileceğini dolayısıyla her bir dağılımı elde etmek için gerekecek enerjinin farklı olacağını öne sürmüş ve boyut küçültmek için gereken enerjiyi (E_C) Eşitlik 2.5 ile ifade etmiştir.

$$E_C = C_c \times X^{(1-n)} \quad (2.5)$$

Bu eşitlikte C_c malzeme dayanımına bağlı bir faktör, X boyut modülü, n ise Schuhmann eğrisinin lineer kısmının eğimi olup 1,32 ile 2,4 arasında değer alır. n değeri 1,5 alındığında Bond Eşitliği, 2,0 alındığında ise Rittinger eşitliği elde edilir (Charles, 1957).

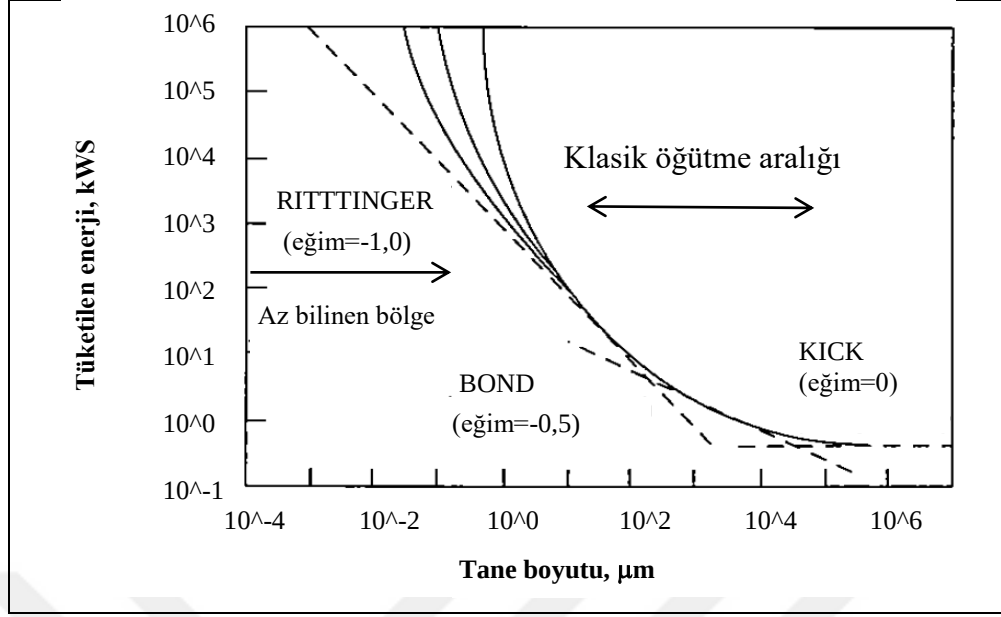
Holmes (1957), boyut küçültmede harcanan enerjiyi (E_h) Eşitlik 2.6'daki gibi ifade etmiştir.

$$E_h = W_i \times \left(\frac{100}{P}\right)^r - \left(\frac{100}{F}\right)^r \quad (2.6)$$

Bu eşitlikte W_i iş indeksi, F boyutu küçültülecek malzemenin ortalama tane boyu, P boyutu küçültülmüş malzemenin ortalama boyutu, r ise malzeme inceliğine bağlı olarak artan dağılım sabitidir.

Hukki (1959), endüstride yaptığı uzun çalışmalar sonucunda öğütmede harcanan enerji ile ürün boyutu arasında tek bir ilişkinin olmadığı sonucuna vararak boyut küçültme işleminde harcanan enerjiyi genel bir ifade ile tanımlamıştır (Eşitlik 2.7). Ayrıca Hukki (1975), enerji ve boyut küçültme arasındaki ilişkinin Rittinger, Kick ve Bond teorilerinin bir karışımı olduğunu belirtmiştir. Hukki'ye göre Kick teorisinin kırıcı boyutlarında, Bond teorisinin çubuklu ve bilyalı öğütme boyutlarında ve Rittinger teorisinin ise ince boyutlarda kullanılacağını belirtmiştir. Şekil 2.3'te, bu üç teorisinin uygulama alanları gösterilmiştir (Napier Munn vd., 1999). Ufalamadaki kırılma olasılığı, iri parçalar için yüksekken ince boyutlar için bu olasılık hızla düşmektedir. Bunun sonucunda, Kick teorisinin 1 cm'nin üzerindeki boyutlarda, Rittinger teorisinin 10-1000 μ m boyutlarında ve Bond teorisinin de bu boyutların arasında geçerli olduğunu belirtmiştir. Rose ise Hukki'nin tersine Rittinger teorisinin kaba öğütmede Kick teorisinin de ince öğütmede geçerli olduğunu ileri sürmüştür (Marshall, 1975).

$$dE_0 = -K \frac{dx}{x^{f(x)}} \quad (2.7)$$



Şekil 2.3. Öğütmede tane boyutu ile enerji arasındaki ilişki

Enerji girdisi-boyut küçültme ilişkilerinden yola çıkılarak yapılan bu yaklaşımlar enerji-boyut küçültme ilişkisine tam olarak açıklık getirememiştir. Bu yaklaşımlar, öğütme kinetiği, değirmenden malzeme taşınımı ve işletme değişkenlerinin öğütmeye etkisi gibi temel konulara açıklık getirememekte ve aynı zamanda ölçek büyütme ve optimizasyon çalışmalarında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle değirmenlerde optimum işletme koşullarını belirleyebilmek için, bilgisayarların gelişimine paralel olarak, benzetişim teknikleri kullanılmaya başlanılmıştır. Benzetişim işlemi, bir prosesi matematiksel eşitliklerle ifade ederek model ile göstermektir. Benzetişim tekniklerinin kullanılmasının nedeni, deneysel yöntemlere göre daha kısa sürede ve düşük maliyetle daha kesin sonuçlara ulaşılabilmesidir.

Literatürde önerilen değirmen model yaklaşımlarının temel noktası, boyut küçültme işlemi sonucunda oluşan ürünün matematiksel ifadelerle açıklanması prensibine dayanmaktadır. Değirmenlerde, belirli bir tane boyu dağılımına sahip beslenen malzemenin ufalama işlemine tabi tutulması sonucu, tasarım koşulları, işletme koşulları ve besleme malzemesinin özelliklerine bağlı olarak farklı tane boyu dağılımına sahip ürünler elde edilmektedir. Elde edilen ürünlerin fiziksel özelliklerinin değirmen içerisindeki kırılma olayını açıklayabilecek bilgiler içermesi ve bu bilgilerin matematiksel olarak ifade edilebilmesi değirmen modellerinin geliştirilmesini sağlamıştır (Erdem, 2009).

Öğütme modellerinin esasını oluşturan ve temel fikri ilk öneren Epstein (1948)'dir. Epstein (1948), ufalama birim işlemini tekrar eden kırılma olayları olarak düşünmüş ve kırılma olayını iki temel fonksiyona bağlı olan bir istatistiksel model olarak tanımlamıştır (Epstein, 1948; Lynch, 1977).

- $P_n(y)$, kırılma işleminin n 'inci adımında y boyutlu bir parçanın kırılma olasılığı,
- $F(x,y)$, y boyutlu bir birim kütlenin kırılmasıyla ortaya çıkan ve bu tane boyutuna eşit veya bu tane boyutundan daha küçük boyutlu parçaların ağırlıkça birikimli dağılımlarıdır.

Epstein modeli, değirmen içerisindeki malzemelerin taşınım mekanizmalarını içermemektedir (Lynch vd., 1986). Bu yüzden Epstein'ın bu konudaki çalışmasından sonra geliştirilen ve aşağıdaki alt bölümlerde verilen matematiksel modeller öğütme devrelerinin optimizasyonunda daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

2.3.1. Matris model

Bu model, Broadbent ve Callcott (1956) tarafından Epstein'ın önerdiği temel kırılma kavramları kullanılarak geliştirilmiştir. Bu model ilk kez kömürün öğütülmesinde kullanmış ve modelde her bir boyutun kırılma olasılığı ile kırılan boyların oluşturduğu boyut dağılımlarını matris olarak düşünmüşlerdir (Lynch vd., 1986).

Matris model mantığı, kırılma olaylarının ardarda gerçekleşmesi esasına dayanmaktadır. Her öğütme aşamasının ürünü bir sonraki aşamanın beslemesi olmaktadır. Boyut küçültme işlemi sırasında tüm boyut aralığındaki taneler kırılma olasılığına sahiptirler ve kırılma ürünleri, daha ufak tane aralığına düşebileceği gibi o tane aralığında da kalabilmektedir. Bu anlamda, bir öğütme işlemi için madde denkliği Çizelge 2.4'deki gibi yazılabilir (Lynch, 1977).

Çizelge 2.4. Öğütme işleminin madde denkliği

Boyut Aralığı	Besleme	Ürün						
1	f_1	$p_{1,1}$	0	0	.	.	0	0
2	f_2	$p_{2,1}$	$p_{2,2}$	0	.	.	0	0
3	f_3	$p_{3,1}$	$p_{3,2}$	$p_{3,3}$	.	.	0	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
n	f_n	$p_{n,1}$	$p_{n,2}$	$p_{n,3}$			$p_{n,n}$	0
n + 1	f_{n+1}	$p_{n+1,1}$	$p_{n+1,2}$	$p_{n+1,3}$	.	.	$p_{n+1,n}$	$p_{n+1,n+1}$

Çizelge 2.4’de görüldüğü gibi, matris modelde bir boyut küçültme işleminde beslenen malzemenin ve ürün olarak alınan malzemenin boyut dağılımları bir seri (n) boyut aralığı cinsinden tanımlanmakta ve tane boyu dağılımındaki değişikliklerin ardarda kırılma aşamalarının toplamından oluştuğu kabul edilmektedir. Çizelgede ürün kısmının birinci sütunu, besleme malzemesinin en üst fraksiyonundaki tanelerin kırılması sonucu oluşan ürün tane boyu dağılımına karşılık gelmektedir. Aynı şekilde üründeki ikinci sütun, beslemedeki ikinci boyut aralığındaki tanelerin kırılması sonucu oluşan ürün tane boyu dağılımına karşılık gelmektedir. Üründeki elemanlar $p_{i,j}$ şeklinde ifade edilmektedir. Burada i, ürün boyut aralığı; j ise kırılan beslemenin boyut aralığı olarak tanımlanır. Buradan yola çıkılarak boyut küçültme işlemi bir matris eşitliği olarak Eşitlik 2.8’de verildiği gibi ifade edilmektedir (Lynch, 1977).

$$p_{i,j} = X_{i,j} \times f_i \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} X_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ X_{21} & X_{22} & 0 & \dots & 0 \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ X_{n1} & X_{n2} & X_{n3} & \dots & X_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} \times f_1 + 0 + \dots + 0 \\ X_{21} \times f_1 + X_{22} \times f_2 + 0 + \dots + 0 \\ X_{31} \times f_1 + X_{32} \times f_2 + X_{33} \times f_3 + 0 + \dots + 0 \\ \dots \\ X_{n1} \times f_1 + X_{n2} \times f_2 + X_{n3} \times f_3 + \dots + X_{nn} \times f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix}$$

$X_{i,j}$ üründeki i’inci boyut aralığına düşen beslemedeki j’inci boyut aralığındaki tanelerin kütle fraksiyonunu gösterir. Kırılma aşaması bilinmeden sonuca ulaşılabilmesi nedeniyle, bu eşitliğin kullanılabilmesi için kırılma aşamasının bilinmesi gerekmektedir. Kırılma aşaması üç bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar; kırılma hızı (S), kırılma

dağılımı (B) ve sınıflandırmadır (C). Bu bileşenlerin herhangi birindeki değişim, $X_{i,j}$ 'de bir değişime neden olmakta ve bu değişim de doğrudan modelin tahmin ettiği ürün tane boyu dağılımında bir değişime neden olmaktadır. Dolayısıyla bu matris bileşenlerinin doğru tanımlanması gereklidir. Kırılma işleminin devam ettiği aşamaların ölçümü olarak tanımlanan kırılma işlemi sayısı (n) interpolasyonla hesaplanmaktadır. Kırılma işlemi sayısı ile besleme tane boyu, besleme hızı ve diğer işletme değişkenleri arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır (Lynch, 1977; Benzer, 2000; Erdem, 2009).

Bir öğütme işlemine giren her tanenin kırılma olasılığı bulunmaktadır ve bu olasılık tane boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Eğer en iri boyut aralığında bulunan tanelerden kırılma için seçilen kısmın kırılma olasılığı S_1 olarak ifade edilirse, o boyut aralığında kırılan tanelerin ağırlığı $S_1 f_1$ olacaktır. Benzer şekilde, n'inci boyut aralığında kırılan tanelerin ağırlığı ise $S_n f_n$ şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda her bir boyut aralığında bulunan tanelerin belirli bir seçimlilik ile kırılması durumunda elde edilecek ürün dağılımı vektörünün matris denklemi Eşitlik 2.9'daki gibi olacaktır.

$$\begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & S_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0_n & 0 & 0 & \dots & S_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 f_1 \\ S_2 f_2 \\ S_3 f_3 \\ \vdots \\ S_n f_n \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Matrisel eşitlikte kırılma olasılığı ya da kırılma hızı matrisi diagonal nitelikte olup, S ile, kırılan taneler ise $S \cdot f$ vektörü ile gösterilmektedir. Bu durumda n'inci boyut aralığında kırılmadan kalan tanelerin oranı $(1-S_n)f_n$ olmaktadır. I birim matris ise, sistemden kırılmadan geçen tanelerin toplam ağırlığı $(I-S)f$ 'dir. Bu durumda ürün boyut dağılımını tanımlayan temel matris Eşitliği 2.10'daki gibi ifade edilebilir:

$$P = B \times S \times f + (I - S) \times f \quad (2.10)$$

B : Kırılma dağılımı matrisi

$B S f$: i boyut aralındaki ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) taneciklerin kırılan kısmı

$(I-S)f$: i boyut aralındaki ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) taneciklerin kırılmadan kalan kısmıdır.

Burada kırılma dağılım matrisi ya da fonksiyonu, kırılan malzemenin kendinden alt boyut gruplarına hangi oranlarda dağıldığını ifade etmektedir.

Kırılma işleminde beslemedeki en üst tane boyunun kırılma sonucunda kaybolması, sınıflandırma matrisi ile tanımlanmaktadır. C sınıflandırma fonksiyonunun matriste tanımlanması ile Eşitlik 2.11 elde edilmektedir.

$$P = [(I - C)(BS + I - S)[I - C(BS + I - R)]^{-1}]^n f \quad (2.11)$$

Eşitlikteki C, sınıflandırma matrisi olup, her kırılma aşaması sonrasında tanenin sınıflandırma işleminden geçme olasılığını temsil etmektedir (Lynch, 1977).

2.3.2. Kinetik model

Roberts (1950), bu modeli ilk olarak ileri sürmüş ve modelde ufalama işlemini bir hız süreci olarak ele almıştır. Birim kütle başına değirmenin çektiği güç ile elek üstünde kalan malzemenin değişim hızı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bowdish (1960) ise, Roberts'ın in ileri sürüldüğü kinetik model çalışmasını geliştirmiş ve bilyalı değirmendeki iri malzemenin kırılma hızının, iri malzeme konsantrasyonu ile orantılı olduğunu ileri sürmüştür. Yani, kinetik modelde bir bilyalı değirmendeki belirli bir boyuttaki parçaların öğütülmesini, birinci derece hız süreci olarak kabul etmiştir. Arbiter ve Bhrany (1960) ise kuvarsın öğütülmesinin birinci derece hız sürecine uyduğunu fakat diğer cevherlerin buna uymadığını göstermişlerdir (Lynch vd., 1986; Ozkan ve Yekeler, 2003; Deniz, 2004; İpek vd., 2005).

Öğütmenin kinetik modellenmesi sürekli ve kesikli fonksiyonlar ile ifade edilmektedir. Bu modeller sırasıyla dağıtılmış ve birleştirilmiş parametre modelleri olarak da adlandırılabilir. Bu iki model arasındaki farklılıklar, değirmen içerisindeki tanenin kırılma kinetiğinin doğrusal veya doğrusal olmayan olarak ve tanenin değirmende taşınımlarının dağıtılmış veya birleştirilmiş olarak tanımlanmasında kullanılan eşitliklerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Genelde dağıtılmış parametre modellerinin çözümü ve formüle edilmesi çok karmaşıktır. Birleştirilmiş parametre modelleri ise değirmen ya da devrenin besleme ve ürün özellikleri arasında basit ilişkiler kurar (Lynch, 1977; İpek, 2003).

Değirmene beslenen belirli tane boyu dağılımına sahip malzemede her tane boyu aralığındaki malzemenin kırılma hızları birbirinden farklı olmaktadır (Klimpel ve Austin, 1970; Austin vd., 1984). Genellikle değirmene beslenen malzeme $\sqrt{2}$ veya $\sqrt[4]{2}$ elek serisi ile tanımlanan birçok tane boyut aralıklarına bölünmekte ve en iri tane boyut aralığı 1, ikinci tane boyut aralığı 2 ve en ince tane boyu aralığı “n” ile gösterilmektedir. Etkin bir kırılmanın olduğu koşulda, belirli bir tane boyu aralığında olan malzemenin kırılması genellikle birinci derece öğütme kuramına uymaktadır. Birinci derece kırılma ifadesi, kırılma işleminin yavaşlamadan devam etmesi anlamını taşır. Kırılma işleminin yavaşlaması durumunda ikinci ve üçüncü derece kırılma hızları oluşur. Öğütme işleminde birinci derece öğütme hipotezini daha iyi anlayabilmek 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..., 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, $S_i \times w_i \times W$ olacaktır (Austin vd., 1984; İpek, 2003; Samanlı, 2008; Batterham, 2011). Burada S_i , i tane boyu aralığındaki malzemenin birim kütlesinin birim zamanda kırılma hızı; w_i , i tane boyu aralığındaki malzeme fraksiyonu ve W ise değirmende öğütülen malzemenin toplam ağırlığıdır. Eğer başlangıç beslemesinin tamamı 1. boyut aralığı ile tanımlanan üst boyut aralığında yani en iri boyut fraksiyonunda ise, kırılmayla 1. boyut aralığının kaybolma hızı $w_1(t)$ W ile orantılı olacaktır. Toplam kütle, W, sabit olduğunda Eşitlik 2.12 elde edilir.

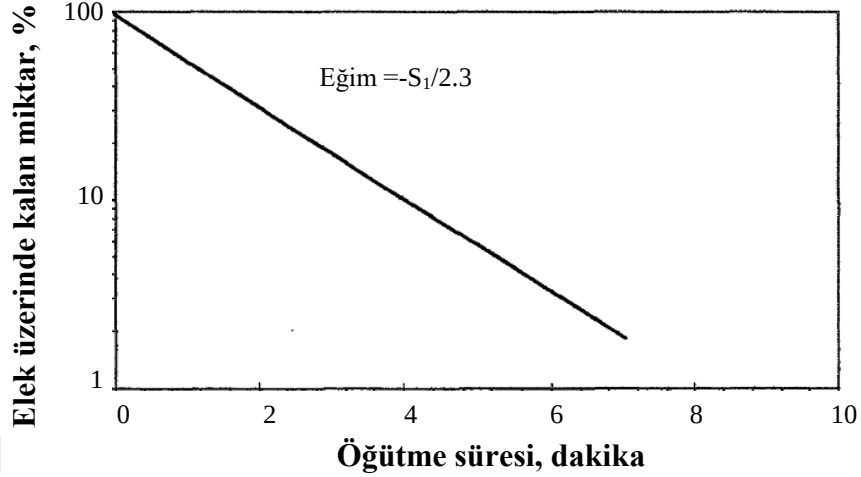
$$\frac{dw_1(t)}{dt} = -S_1 \times w_1 \quad (2.12)$$

Burada S_1 , özgül kırılma hızı olarak adlandırılır ve oransal olarak sabittir. S_1 zamanla değişmiyorsa Eşitlik 2.13'teki ifade elde edilir.

$$w_1(t) = w_1(0) \times \exp(-S_1 t) \quad (2.13)$$

Bu eşitlik, birinci derece öğütme kinetiği olarak bilinmektedir (Şekil 2.4) Burada $w_1(0)$ ve $w_1(t)$ öğütmenin başlangıcındaki ve t anındaki 1'inci boyut aralığında bulunan

malzemenin yüzdesini; S_1 , 1'inci boyut aralığındaki malzemenin kırılma hızını ve t de zamanı göstermektedir (Austin vd., 1984; Teke, 1998; İpek, 2003; Samanlı, 2008).

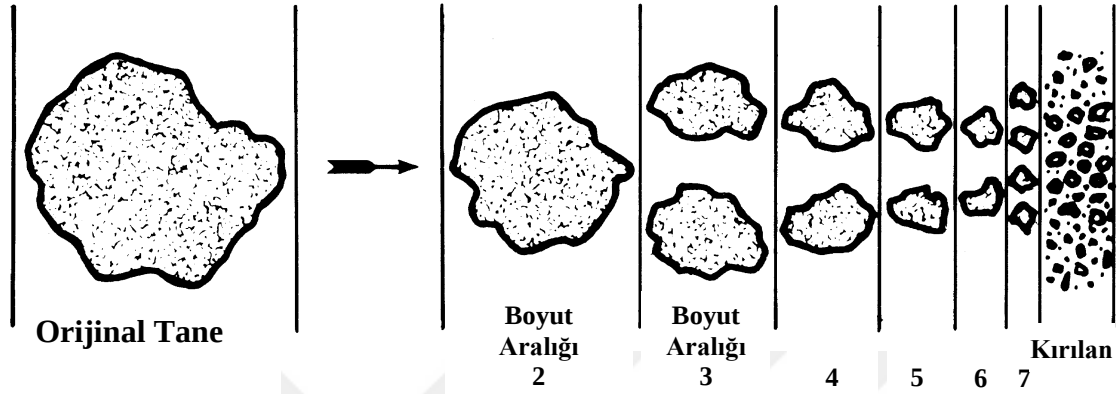


Şekil 2.4. Birinci derece kırılma hızının gösterimi (Teke, 1998)

Malzemenin özelliklerinden veya değirmen koşullarından 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 engellemesi olabilir. Genellikle kuru öğütmede ince boyutlarda, yaş öğütmede yüksek viskozitede görülmektedir ve bu olaya ortam etkisi denilmektedir. İkincisi ise öğütülecek malzeme tane boyutunun bilya çapından çok büyük olması durumunda normal olmayan kırılma bölgesinde oluşan sapmalardır. Bu durumda iri taneler bilyalar tarafından kavranamamakta ve malzemenin bir kısmı nispeten daha zayıf, bir kısmı da nispeten daha dayanıklı malzeme gibi davranmaktadır (Austin vd., 1984; İpek, 2003; Samanlı, 2008).

Belirli bir tane boyutundaki malzeme kırıldığında Şekil 2.5'te gösterildiği gibi ürün olarak adlandırılan daha küçük tane boyutlarına parçalanır. Öğütme işlemini açıklayabilmek için bu boyut dağılımını tanımlamak gerekir. 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 içerisine tekrar karışmadan önce oluşan kırılma olayları sonucu üretildiğini ifade etmektedir (Austin vd., 1984; İpek, 2003).

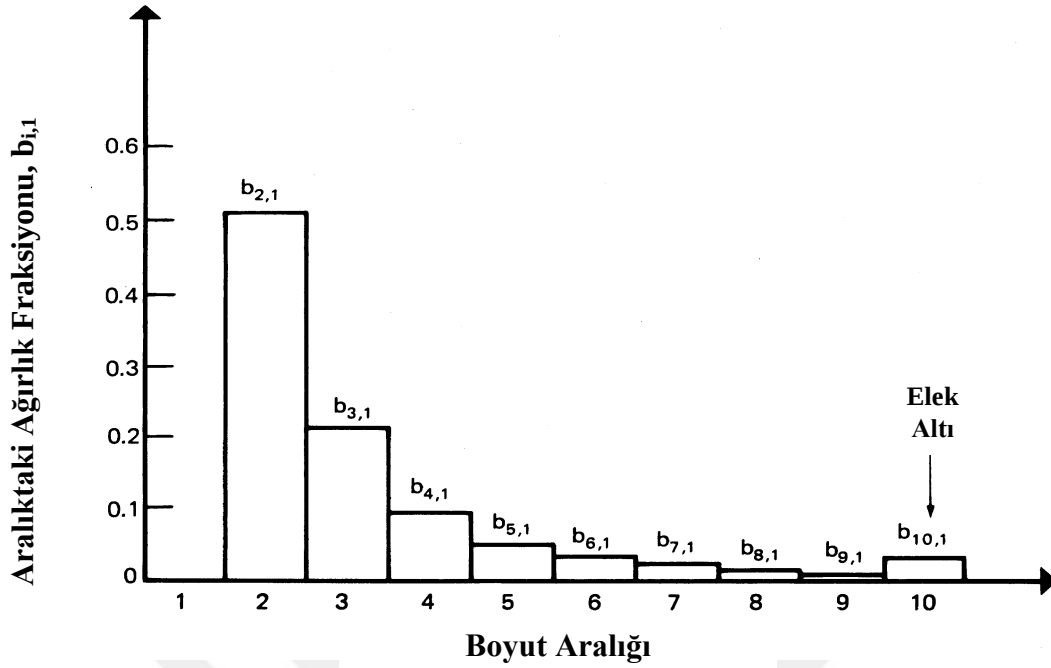


Şekil 2.5. Belirli bir boyuttaki malzemenin kırılarak daha alt tane boyutlarına geçen malzeme fraksiyonunun gösterimi (İpek, 2003)

Kırılma dağılımını tanımlayan iki ayrı sembolleme vardır. Bunlardan ilki, j boyut aralığında bulunan malzeme kırıldığı zaman elde edilen ürün içindeki i boyut aralığındaki malzemenin ağırlık fraksiyonudur ve $b_{i,j}$ olarak sembollendir. Malzemenin tamamı, bütün boyutların toplamına eşit olduğundan, Eşitlik 2.14'deki gibi tanımlanır.

$$\sum_{i=n}^{j+1} b_{i,j} = 1 \quad (2.14)$$

Toplamdaki n , son elek altı olarak tanımlanır. Genel olarak $b_{i,j}$ matrisi, bütün boyutların kırılmasıyla oluşan i boyutlarının toplamıyla elde edilir ($n > i > 1$ için $b_{i,1} + n > i > 2$ için $b_{i,2} + n > i > 3$ için $b_{i,3} \dots$) (Austin vd., 1984; Teke, 1998). Birincil kırılma dağılım fonksiyonunun bar grafiği Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Birincil kırılma dağılım fonksiyonunun bar grafik olarak gösterilişi (İpek, 2003)

İkinci sembolleme yöntemi ise b değerlerinin en alt boyut aralığından itibaren kümülatif olarak toplanmasıyla elde edilir. Bu şekilde elde edilen kümülatif ağırlıklar toplamı $B_{i,j}$ sembolü ile ifade edilir. $B_{i,j}$, j boyut aralığından kırılan malzemenin i boyut altındaki kümülatif ağırlık miktarını ifade etmektedir (Eşitlik 2.15)

$$B_{i,j} = b_{n,j} + b_{n-1} + \dots + b_{i,j} \quad (2.15)$$

Eğer Eşitlik 2.15’de $B_{i,j}$ biliniyorsa Eşitlik 2.16 elde edilir.

$$b_{i,j} = B_{i,j} - B_{i+1,j} \quad (2.16)$$

$B_{i,j}$, kümülatif kırılma değeri olarak tanımlanır ve en kısa süreli öğütme sonunda elde edilecek ürünün tane boyu dağılımından elde edilir. $B_{i,j}$ değerleri, 0,5 veya 1 dakika gibi kısa süreli öğütme testleriyle bulunur (Austin vd., 1984; Teke, 1998; İpek, 2003).

Kırılma hızı ve dağılımı parametreleri kullanılarak zamana bağlı genel bir kesikli öğütme denklemi tanımlanmaktadır (Eşitlik 2.17). Bu eşitlikte n elek aralığı sayısıdır ve $n \geq i \geq j \geq 1$ dir (Austin vd., 1984; Teke, 1998; Benzer, 2000; İpek, 2003; Samanlı, 2008).

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = -S_i \times w_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j} S_j w_j(t) \quad (2.17)$$

2.3.3. Boyut kütle denklği modeli

Epstein (1947), tarafından önerilen boyut kütle denklği modeli mineral endüstrisi tarafından yaygın olarak kabul görmüştür (Kelly ve Spottiswood, 1990; Napier Munn vd., 1999). Bu model cevherin mineralojik yapısını ya da kırma ve öğütme sırasında meydana gelen çatlak mekanizmalarını göz önünde bulundurmamaktadır. Bu nedenle model tane boyu ile kütle arasında kurulan denklğe dayanmaktadır. Boyut kütle denklği modeli temel olarak, kırılma dağılımı fonksiyonu ve değirmen besleme ile ürün tane boyu dağılımı verilerini kullanarak geri hesaplama yoluyla belirlenen kırılma hızı fonksiyonu parametrelerinden oluşmaktadır (Ekşi, 2011). Her bir tane boyu fraksiyonu için kırılan malzeme miktarı değirmen içindeki o fraksiyondaki malzeme miktarına bağlıdır (Eşitlik 2.18).

$$Kırılan\ malzeme\ miktarı = k_i \times s_i \quad (2.18)$$

Eşitlikte s_i , değirmen içerisindeki i tane boyutundaki malzeme miktarını, k_i (dk^{-1}) ise kırılma hızını belirtir ve k_i değeri geri hesaplama yöntemiyle ya da kesikli öğütme testleriyle tahmin edilir (Napier Munn vd., 1999).

Bu modele ait kütle denklği Eşitlik 2.19' da verilmiştir.

$$f_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j s_j = p_i + k_i s_i \quad (2.19)$$

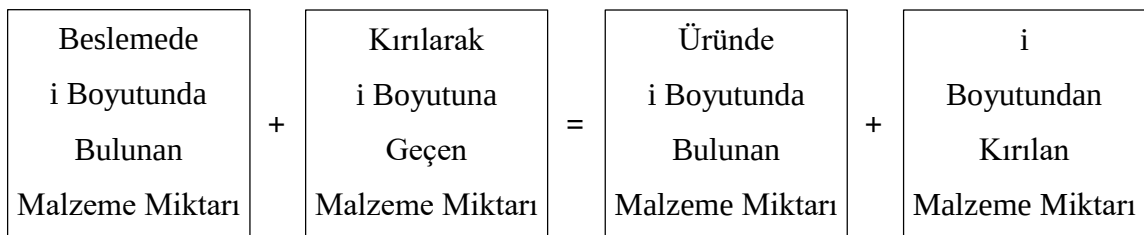
Kütle denklği eşitliğinde f_i , beslemedeki i boyutundaki malzeme miktarı; s_i , değirmen içerisindeki i tane boyutundaki malzeme miktarı; b_{ij} j boyutlu tanelerin kırılmasıyla i boyutuna geçen malzeme miktarı; k_i , i tane boyutundaki tanelerin kırılma hızı ve p_i ise ürünlerdeki i boyutundaki malzeme miktarıdır.

Değirmene beslenen malzeme belirli bir süre değirmen içinde kaldıktan sonra değirmeni terk edecektir. Bu eşitliğin durma zamanı göz önünde bulundurularak yeniden düzenlenmiş hali Eşitlik 2.20'de ifade edilmiştir (Napier Munn vd., 1999).

$$p_i' = f_i' - k_i \lambda s_i' + \lambda \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j s_j' \quad (2.20)$$

2.3.4. Mükemmel karışım modeli

Whiten (1974), tarafından önerilen mükemmel karışım modeli, matris ve kinetik modelin bir karışımıdır. Mükemmel karışım modeli boyut kütle denkliği modelinde karışmanın yarattığı karmaşıklığa, değirmenin mükemmel ve tek bir birimden meydana geldiği yaklaşımıyla çözüm üretmiştir. Bu modelde değirmende meydana gelen tüm olayların değirmen içerisindeki malzeme ile ilgili olduğunu kabul edilmektedir ve değirmene giren ve çıkan her boyut fraksiyonunun madde denkliği kurulmaktadır. Belirli bir boyut aralığında besleme olarak değirmene giren veya iri boylardan kırılan malzeme, değirmenden ürün olarak çıkmaktadır veya alt boylara ufalanmaktadır. Yaklaşımında, herhangi bir boyut aralığındaki tanelerin kırılma ve taşınma hızı birinci dereceden kabul edilmektedir (Benzer, 2000). Modelin her bir tane fraksiyonu için kurulan kütle denkliği Şekil 2.7 ve Eşitlik 2.21'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Her bir tane boyu fraksiyonu etrafında kurulan kütle denkliği

$$f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} r_j s_j = p_i + r_i s_i \quad (2.21)$$

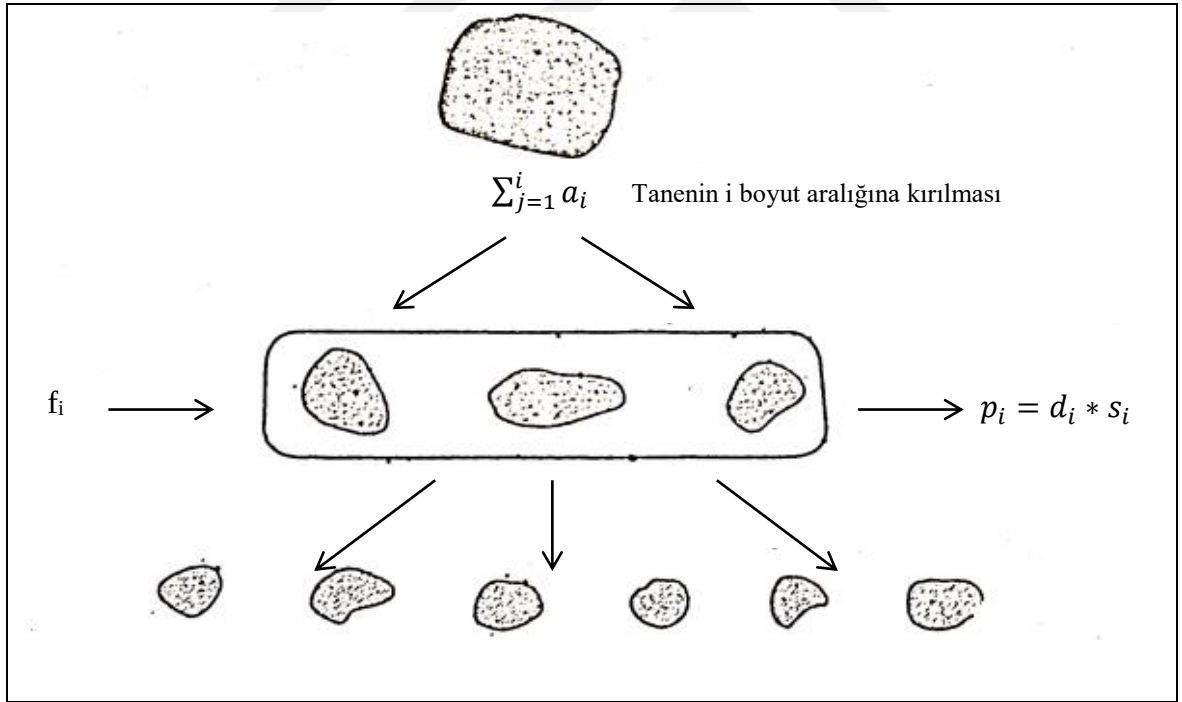
Whiten, kırılma işlemi sonrasında bir boyut aralığındaki orjinal malzemenin bir bölümünün aynı boyut aralığında kalabileceği kabulünü yapmaktadır. Bununla birlikte değirmen mükemmel karışmış varsayıldığından, değirmen içerisindeki malzeme miktarı (s_i) ile değirmen ürünü (p_i) arasındaki ilişki her bir boyut fraksiyonu için tanımlanan taşınma

hızı (d_i) ile sağlanmaktadır (Eşitlik 2.22). Bu durumda her boyut fraksiyonu etrafındaki kütle denkliği Eşitlik 2.23'te verilmiştir.

$$p_i = d_i * s_i \text{ veya } s_i = p_i/d_i \quad (2.22)$$

$$f_i + \sum_{j=1}^i \frac{a_{ij} r_j p_j}{d_j} = p_i + \frac{r_i p_i}{d_i} \quad (2.23)$$

Eşitlikte a_{ij} , kırılma dağılımı üçgen matrisini; r_i ise kırılma hızını ifade etmektedir. Besleme ve ürün boyut dağılımları ile malzemeye bağlı kırılma dağılımı fonksiyonun belirlenerek Eşitlik 2.23'te kullanılmasıyla kırılma hızı/taşıma hızı (r/d) model parametresi geriye hesaplanabilmekte ve böylece farklı işletme ve tasarım koşullarında ürün tane boyu dağılımı tahmin edilebilmektedir (Genç ve Benzer, 2008). Eşitlik 2.23'ün şematik olarak gösterilişi Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Mükemmel karışım model mekanizması (Napier Munn vd., 1999)

r/d parametresi besleme hızı ve durma zamanındaki değişiklikler için kullanılarak (r/d^*) şeklinde normalize edilmektedir. Bu kapsamda değirmen boyutları ve hacimsel besleme hızına göre normalize edilen taşıma hızı (d_i^*) kullanılmaktadır (Eşitlik 2.24) (Napier Munn vd., 1999).

$$d_i^* = \frac{d_i}{4Q/D^2L} \quad (2.24)$$

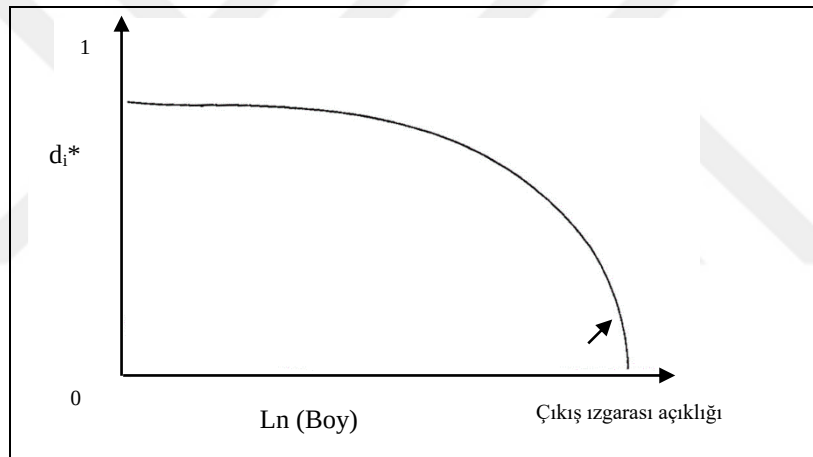
Eşitlikte,

D: Değirmen çapı

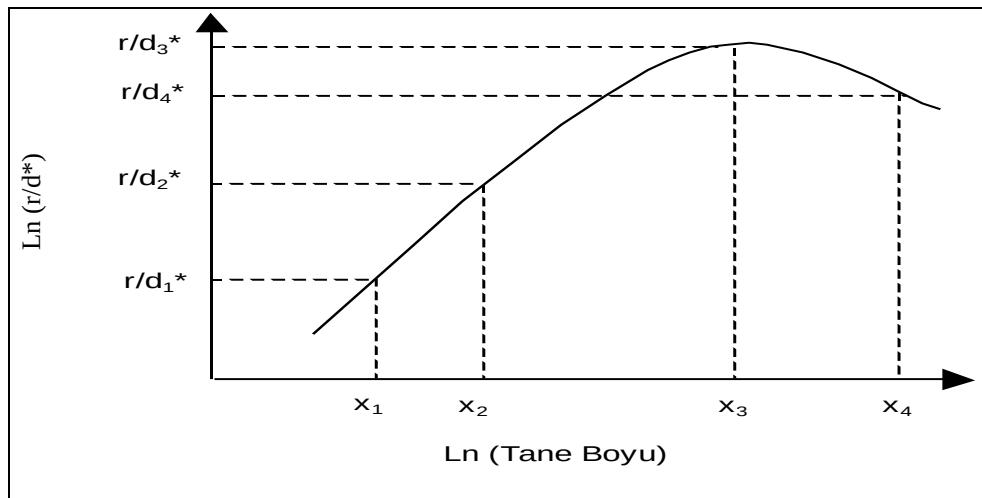
L: Değirmen uzunluğu

Q: Hacimsel besleme hızı

Su gibi davranan çok küçük tanelerin taşınma hızı bire yakındır, sonra tane boyutundaki artışla çıkış ızgarasına doğru taşınma hızı hızla düşer (Şekil 2.9). Kırılma hızı tane boyu artışıyla hızla artmakta, besleme boyut dağılımındaki en iri boyda bir maksimum değerini alıp, ve bazen düzleşerek, düşmeye başlamaktadır (Şekil 2.10).



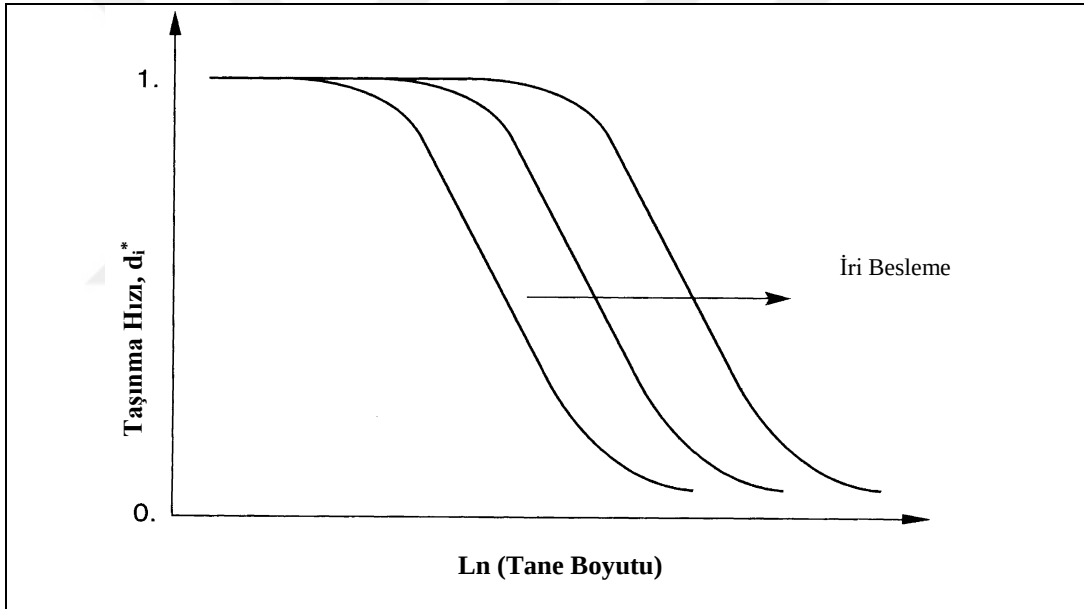
Şekil 2.9. Bilyalı değirmen taşınma hızı fonksiyonu (Napier Munn vd., 1999)



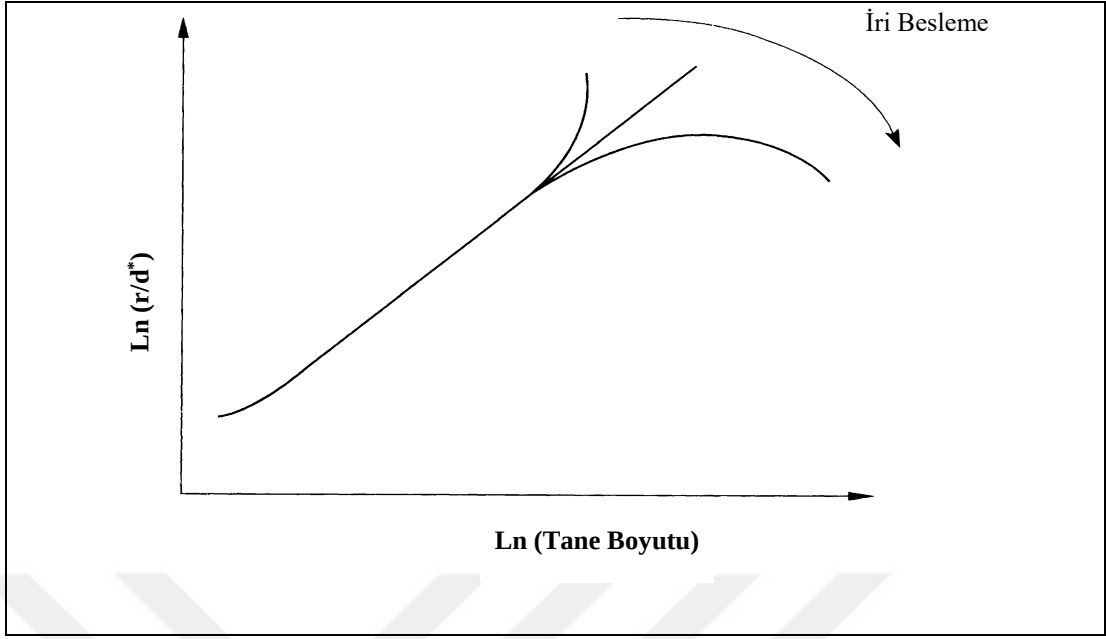
Şekil 2.10. Bilyalı değirmen kırılma hızı faktörü (Napier Munn vd., 1999)

2.3.5. Çok bölmeli değirmen modeli

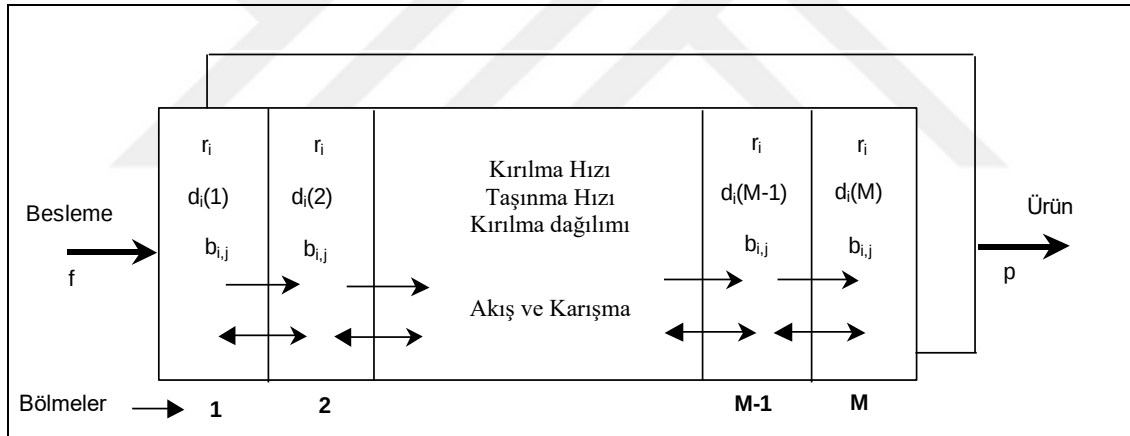
Beslemedeki iri malzeme miktarının (+2 mm) fazla ve indirgeme oranının çok yüksek olduğu koşullarda r/d parametresinde büyük değişim meydana gelmekte ve tahmin gücü zayıflamaktadır (Napier Munn vd., 1999; Benzer, 2000; İpek, 2003; Genç, 2008; Ekşi, 2011). Kavetsky vd. (1982), tahmin gücünü arttırmak amacıyla değirmenin mkemmел karışmış bir seri bölmeden meydana geldiğini ve bölmeler arasında ileri ve geri yönde bir seri mkemmел karışmış bölümler olarak düşünmüşlerdir. Her dilim sabit kırılma hızını (r_i) kullanır. Ancak, boşaltma fonksiyonunun (d) şekli sabit iken sistematik olarak şekil 2.11 ve şekil 2.12’de gösterildiği gibi ölçeklenebilir (Napier Munn vd., 1999). Çok bölmeli değirmen modelleme yapısının şekilsel gösterimi şekil 2.13’te verilmiştir.



şekil 2.11. İri beslemenin artmasıyla çok bölmeli modeldeki boşaltım oranının tipik değişimi (Napier Munn vd., 1999)



Şekil 2.12. İri beslemenin artmasıyla çok bölmeli modeldeki kırılma hızının tipik değişimi (Napier Munn vd., 1999)



Şekil 2.13. Çok bölmeli değirmen modelleme yapısının şekilsel gösterimi (Genç, 2002)

m bölmesinde i boyut aralığındaki tanelerin kırılma miktarı (t/s) $Y_{i(m)}$, o bölmede bulunan i tane boyu aralığındaki tane miktarı $S_{i(m)}$ ile orantılı olup Eşitlik 2.25 ile ifade edilmektedir.

$$Y_{i(m)} = r_i S_{i(m)} \quad (2.25)$$

m 'nci bölmeden taşınan i tane boyut aralığındaki tanelerin miktarı (t/s) $P_{i(m)}$, Eşitlik 2.26 ile belirlenebilmektedir.

$$P_{i(m)} = k_m d_{i(m)} S_{i(m)} = F_{i(m)} - r_i S_{i(m)} - \sum_{k=1}^i b k_{ik} r_k S_{k(m)} \quad (2.26)$$

k_m : Boyutsuz bir sabit

$d_{i(m)}$: m'inci bölmedeki i boyut aralığındaki tanelerin özgül taşınma fonksiyonu

$F_{i(m)}$: m'inci bölmeye geçen i boyut aralığındaki malzeme miktarı

2.3.6. Ayırık eleman yöntemi (DEM)

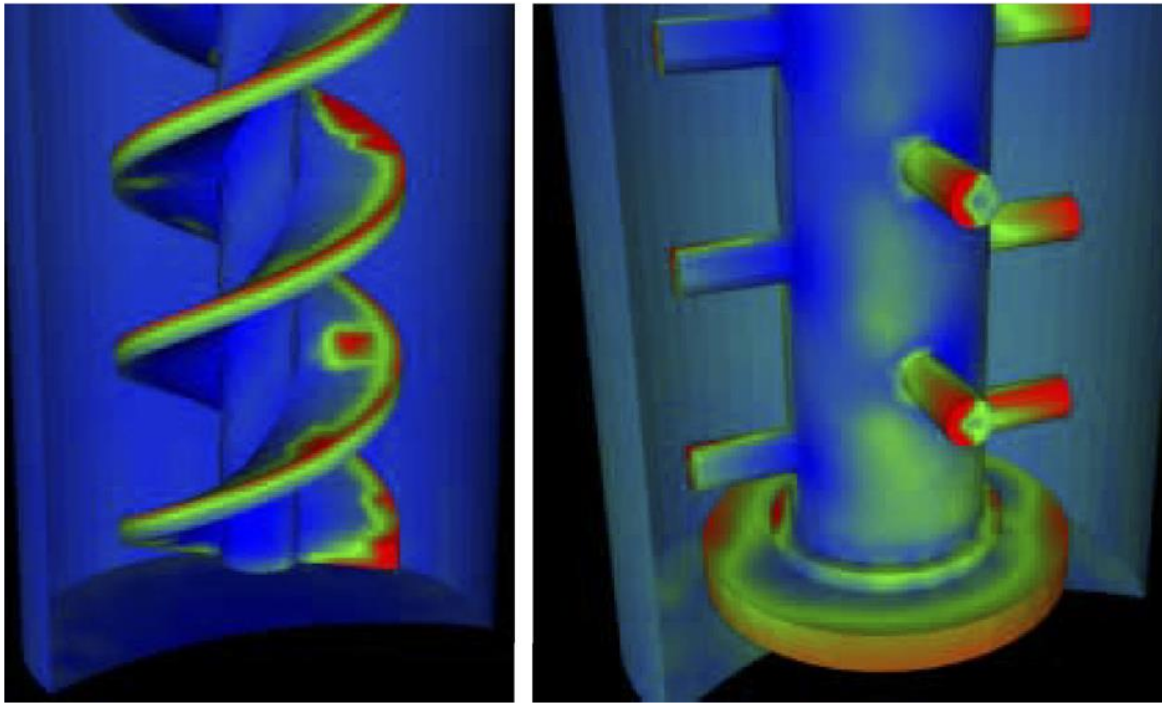
Newton'un ikinci kanununa dayanan Ayırık Eleman Yöntemi (DEM), mikroskopik parçacık davranışını ayrıntılı bir şekilde tahmin etmek için sıkça kullanılan sayısal bir yaklaşımdır (Yang vd., 2000). DEM simülasyonlarının sonuçları birçok alanda geçerlilik kazanmış ve fiziksel deneylerle karşılaştırıldığında yüksek tutarlık olduğu gösterilmiştir (Delannay vd., 2007; Tjakra, 2013).

Bu yaklaşım Newton'un hareket yasalarını kullanarak, her bir taneciğe herhangi bir zamanda etki eden kuvvetlerin tanecik konumu ve hızı gibi tanecik davranışının ayrıntılı mikro dinamiğini elde etmek için kullanılmıştır (Mishra ve Rajamani, 1992; Mishra, 2003; Moreno vd., 2003; Yu, 2004; Yang vd., 2008).

Öğütme tekniklerinin modelleme yeteneği, cevher hazırlama endüstrisinde ve boyut küçültmenin önemli olduğu diğer sanayilerde büyük bir önem oluşturur. Daha kesin ve sofistike modellere ihtiyaç duyulduğunda, DEM gibi hesaplama modellerinin uygulanması, öğütmede karşılaşılan karmaşık problemlerin bazılarını çözmeye başlamıştır (Weerasekara vd., 2013). DEM simülasyonu kullanılarak karıştırmalı bilyalı değirmenlerde yapılan ilk çalışmada kule (tower mill) ve pinli (pin mill) değirmenin araştırması ve karşılaştırması yapılmıştır (Cleary vd., 2006; Sinnott vd., 2006). Bu çalışmadan değirmenlerin güç çekişi, akış yapısı, enerji kullanımı, aşınma ve tanecik taşıma verimliliği değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen iki değirmenin kayma gerilmeleri Şekil 2.14'te verilmiştir. Jayasundara vd. (2006), karıştırmalı bilyalı değirmenlerin DEM modellemesi üzerine araştırma yürütmüşler ve parçacık akışını mikro dinamik özellikler (gözeneklilik, çarpışma enerjisi ve çarpışma frekansı) açısından karakterize etmişlerdir. Düşük bilya doluluğunda ve karıştırıcı hızlarında parçacıkların değirmenin tabanında biriktiğini, dolayısıyla verimsiz öğütme ortamının sağlandığını göstermişlerdir (Altun, 2013). Wang vd. (2012), tanecik

çarpışma enerjisinden tanecik kırılmasını öngörmek için DEM ve Boyut Kütle Denkliği Modeli (PBM) temelli bir model geliştirmiştir.

Çoğu ufalama ekipmanının öğütme sürecini yönlendiren mekanizmaları hakkında bilgi almak için DEM'in ayrıntılı kullanımı önem kazanmaktadır. DEM çıktılarına dayanan mekanik kırılma modellerinin uygulanmasını iyileştirmek için mezo düzeyinde kırılma mekanizmalarının daha iyi anlaşılması gerekir. Bu alandaki çalışmalar umut vericidir, ancak henüz yaygın olarak kullanılmaya başlanmamıştır (Weerasekara vd., 2013).

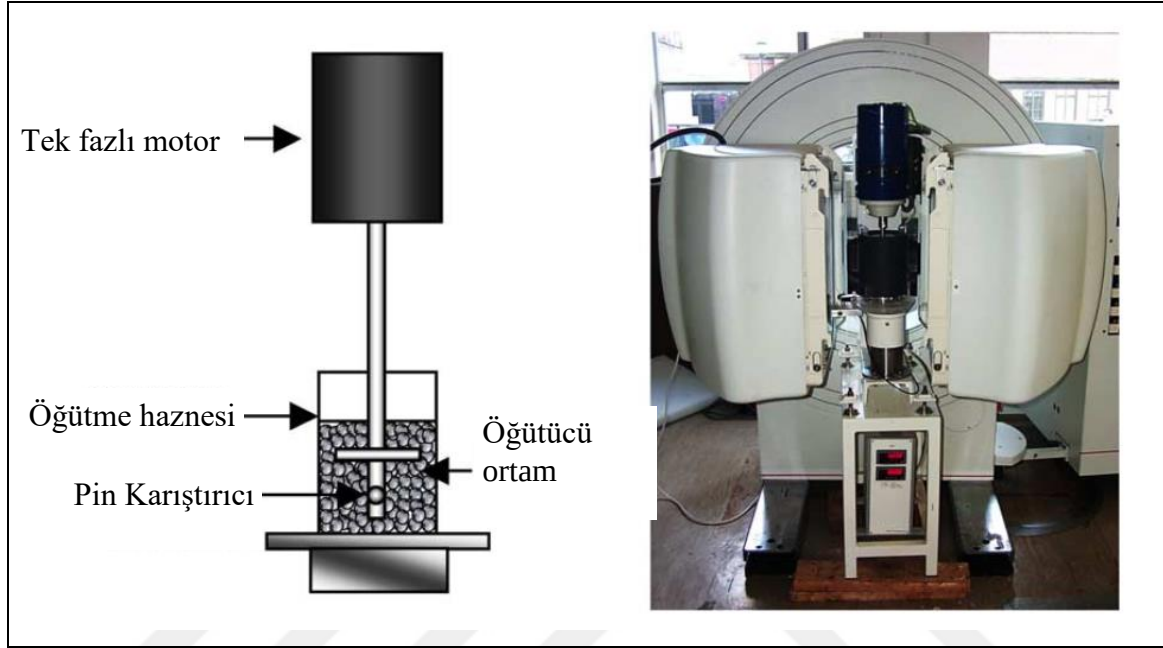


Şekil 2.14. Kule ve pinli değirmendeki kayma gerilmeleri, soldaki Kule değirmen (kırmızı alan 3kPa), sağdaki Pinli değirmen (kırmızı alan 6 kPa) (Cleary vd., 2006)

2.3.7. Pozitron emisyon parçacık izleme (PEPT) yöntemi

Tıpta yaygın olarak kullanılan Pozitron Emisyon İzleme Tekniği Birmingham Üniversitesinin öncülüğünde öğütme sistemlerine uygulanabilir hale getirilmiştir. PEPT, bir sistem içindeki bir parçacığın ışın saçmasına dayanır. Parçacık nükleer reaksiyonla bozundurulunca bir çift tutarlı röntgen ışını yayar. Bu X-ışınları, PEPT kamerayla tespit edilir. Bir rekonstrüktif algoritma kullanılarak parçacıkların konumu ve dolayısıyla yörüngesi hesaplanabilir. PEPT, opak ve agresif sistemler içinde tek bir izleyicili tanecığın izlenmesini sağlar. Bu sistemde, ortamın hareketi göreceli olarak uzun zaman periyodlarında

tek bir partikülün izlenmesinden türetilebilir. PEPT tekniğinin kullanıldığı ilk çalışmalarda, dikey karıştırırmalı bir değirmende ortam yükünün hareketi analiz edilmiştir. Şekil 2.15'te PEPT tekniğinde karıştırırmalı bilyalı değirmenin konumlandırılması ve şematik gösterimi verilmiştir (Conway-Baker vd., 1999; Conway-Baker vd., 2002; Barley vd., 2004).



Şekil 2.15. Karıştırırmalı değirmenin şematik diyagramı ve değirmenin PEPT'deki konumu (Barley vd., 2004)

PEPT tekniğiyle yapılan bir diğer çalışma IsaMill'de cam ve seramik bilyanın yüksek hacimsel doluluk ve karıştırma hızlarındaki hareketi incelenmiştir (van der Westhuizen vd., 2011). Jayasundara vd. (2011), DEM tekniğine alternatif olarak geliştirilen PEPT tekniğini, CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) ve DEM çıktıları ile karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır.

2.3.8. Stres model

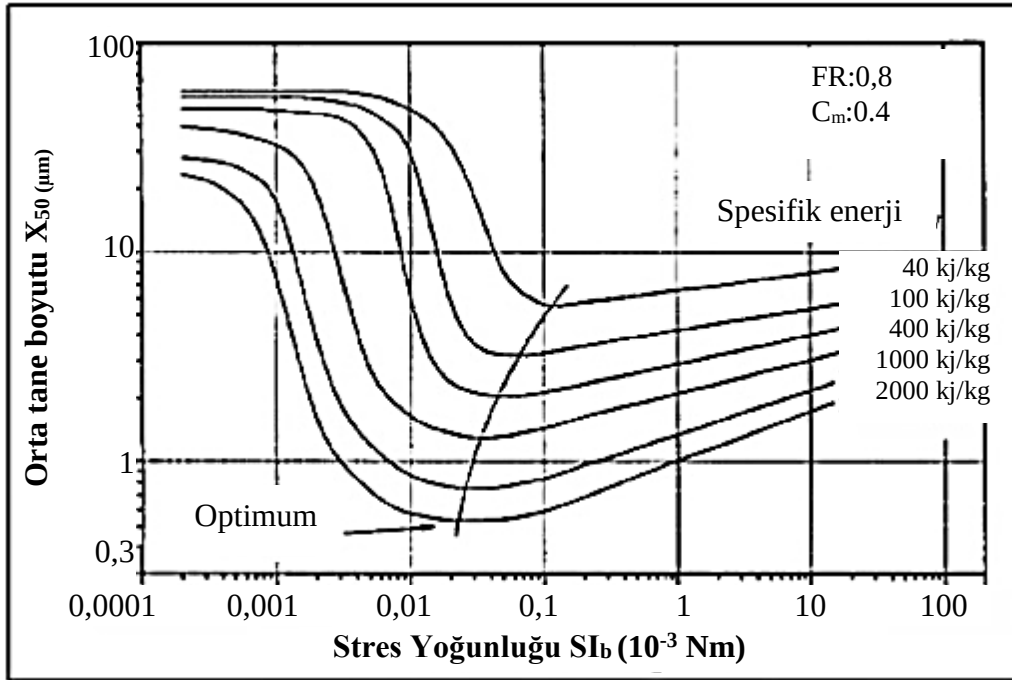
Karıştırırmalı bilyalı değirmenlerde öğütme proseslerinin optimizasyonu için geliştirilen ilk model olan stres model, belirli bir sayıda deney gerçekleştirilerek optimum işletme parametrelerinin bulunmasını sağlayan stres enerji modelidir (Blecher vd., 1996; Kwade vd., 1996; Kwade, 1999a, b; Kwade, 2001; Kwade ve Schwedes, 2002; Kwade, 2003; Breitung-Faes ve Kwade, 2014). Boyutsal analiz kullanılarak yapılan stress şiddeti

ilişkisi, karıştırmalı bilyalı değirmenlerde öğütme performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Jankovic, 2001).

Kwade vd. (1996), karıştırmalı bilyalı değirmende stres yoğunluğu parametresini disklerin çevresel hızının, ortamın boyutunun ve yoğunluğunun fonksiyonu olarak hesaplamıştır (Eşitlik 2.27)

$$SI_b = D_b^3 \times (\rho_b - \rho) \times v_d^2 \quad (2.27)$$

Bu eşitlikte SI_b bilyanın stress yoğunluğu (Nm); D_b , bilya çapı (m); ρ_b , bilya yoğunluğu (kg/m^3); ρ , pülp yoğunluğu (kg/m^3); v , karıştırma hızıdır (m/s). Şekil 2.16'da stres yoğunluğu ve ürün inceliği arasındaki ilişki verilmektedir.



Şekil 2.16. Stres yoğunluğu ve özgül enerjinin bir fonksiyonu olarak ürün inceliği

2.3.9. Kırılma dağılım fonksiyonu modeli

Endüstriyel ölçekli bir boyut küçültme işlemi düşünüldüğünde, aynı anda birçok tek tane kırılma olayı meydana gelmektedir. Öğütülecek malzemenin özelliklerinin kırılma üzerindeki etkisi, kırılma sonucu davranımı ile ifade edilmektedir. Her kırılma olayından sonra kırılan her tane alt boyut aralıklarına dağılmaktadır. Bir tanenin kırıldıktan sonra alt

boyut aralıklarına dağılma oranı matematiksel olarak kırılma dağılımı fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Bu fonksiyon birden çok tanenin aynı anda kırıldığı boyut küçültme işlemini ifade etmek için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılmaktadır (Kelly ve Spottiswood, 1982; Benzer, 2000; Genç, 2002; Ekşi, 2011).

Kırılma dağılım fonksiyonu kavramına yönelik yapılan ilk çalışmalar, malzemenin kırılma davranımının tane boyundan bağımsız olduğunun kabul edilmesi ve standart bir dağılım fonksiyonunun kullanılması ile yapılmıştır (Epstein, 1948; Broadbent ve Callcott 1956; Gardner ve Austin, 1962; Kelsall ve Reid, 1965; Austin vd., 1966; Stewart ve Restarick, 1971; Whiten, 1976; Lynch, 1977; Herbst ve Fuerstenau, 1980; Austin ve Weller, 1982; Kavetsky vd., 1982). Bu yaklaşımla, boyut küçültme işleminin tanımlanması için yapılan hesaplamalara basitlik getirilmesi amaçlanmaktadır.

Broadbent ve Callcott (1956), Rosin-Rammler eşitliğini geliştirerek kırılmadan sonra taneciklerin dağılımı için Eşitlik 2.28'i tanımlamışlardır.

$$Y = \frac{1 - e^{[-(\frac{x}{k})]} }{1 - e^{-1}} \quad (2.28)$$

Bu eşitlikte Y ($B_{x,y}$) kırılmadan sonraki parçacıkların oranını temsil eder. Eşitliğe göre tane boyu aralıkları arasındaki oranın (x/k) geometrik dizi izlemesi durumunda, kırılma matrisinin sayısal elemanları hesaplanabilmektedir. Elekler aralıkları arasındaki oran 1/2 olduğunda, kırılma matrisinin ilk kolon elemanları (Lynch, 1977):

<0,1980; 0,3308; 0,2148; 0,1225; 0,0654; 0,0338; 0,0172;> olur iken;

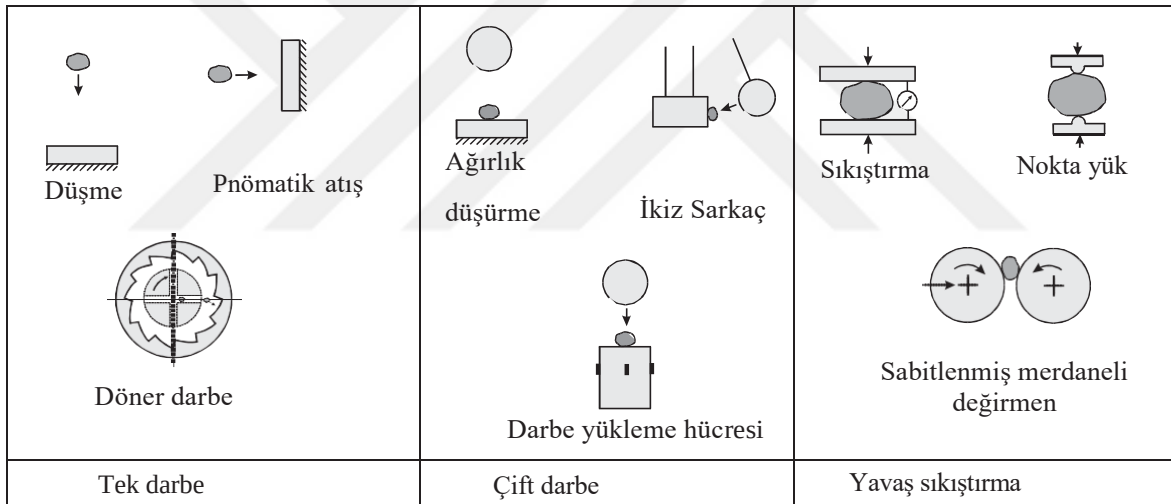
Eğer elekler arası oran $\sqrt{2}$ olması durumunda matrisin ilk kolon elemanları

<0,1004; 0,1906; 0,1161; 0,1361; 0,1069; 0,0814; 0,0607;> olmaktadır.

Kırılma dağılım fonksiyonuna ait ikinci düşünce ise, her tane boyu için ayrı kırılma dağılımı tanımlanmasıdır. Böylelikle boyut küçültme işleminde malzemeden kaynaklanan etkileri açıklayabilmek için her boyut aralığının etkilerini yansıtabilecek ayrı kırılma dağılımı tanımlanması gerektiği öne sürülmüştür. Bu düşünce tarzının temeli, kırılma işlemine tabi tutulacak malzeme boyutunun kırılma davranımı üzerindeki etkilerinin

incelenmesine dayanmaktadır. Tane boyu birçok malzemenin kırılma karakteristiğini etkilemektedir. Tane boyu azaldıkça malzemenin yapısal süreksizliklerine bağlı olarak genellikle kırılmaya karşı direnç artmaktadır. Bu homojen olmayan yapı, elastik olmayan deformasyonlar ve çatlaklar ile sonuçlanan gerilim yoğunlaşmalarına sebep olmaktadır (Schönert, 1991). Tane boyutu küçüldükçe çatlakların sayısı ve boyutu azalmaktadır. Bu sebepten dolayı ince taneleri kırabilmek için uygulanan stres arttırılmalıdır (Krajcinovic, 1996; Tavares ve King, 1998).

Kırılma dağılım fonksiyon değerlerinin belirlenebilmesi amacıyla çeşitli yöntemler tanımlanmıştır. Bunlar kesikli öğütme testleri, geri hesaplama yöntemi, tektane ve yatak kırma test yöntemleri olarak sıralanabilir. Tek tane kırma test yöntemleri stres uygulama biçimine ve temas noktalarına göre sınıflandırılabilir (Şekil 2.17).

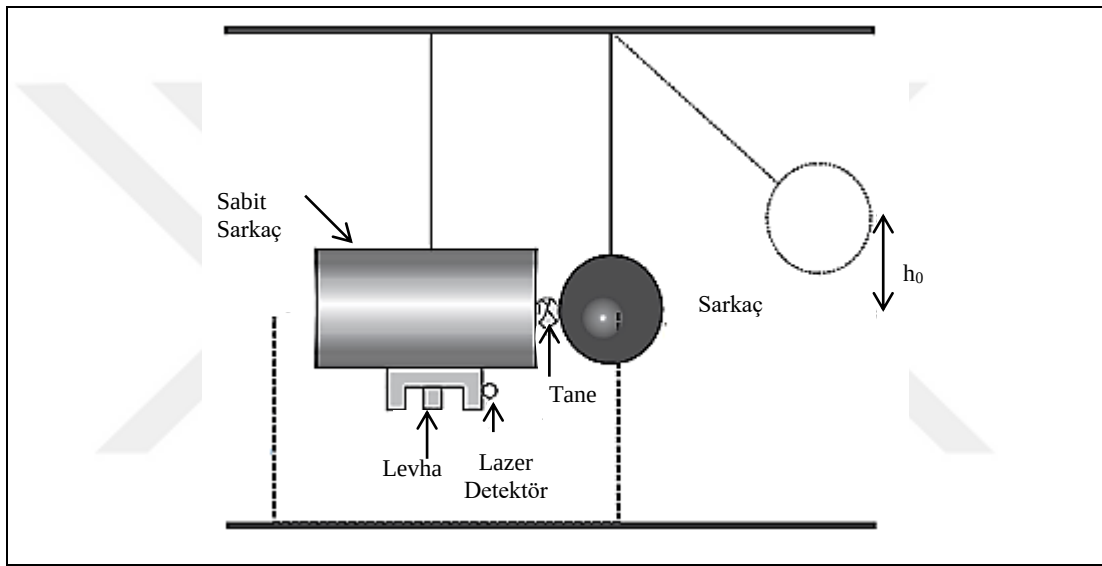


Şekil 2.17. Kırma testleri (Tavares, 2007)

Tek darbe testleri tanenin yüzeye çarptırılması veya serbest düşürülmesiyle ya da bir ağırlığın taneye çarptırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Çift darbe testleri, test edilen malzemenin iki sert yüzey arasında kırılması temeline dayanmaktadır (ikiz sarkaç testi, ağırlık düşürme testi, Hopkinson basınç çubuğu ve çok hızlı yük hücresi). Yavaş sıkıştırma testleri ise, malzemenin iki yüzey arasında sıkıştırılmasıyla gerçekleşmektedir.

2.3.9.1. İkiz sarkaç testi

Narayanan ve Whiten (1988), tarafından geliştirilen bu test, sarkaç darbesinin görüntülenebileceği bilgisayar bağlantılı ikiz sarkaçtan oluşmaktadır. İkiz sarkaç temel olarak tanenin yerleştirildiği sabit sarkaç adı verilen çelik bir silindirden ve yerçekimi kuvvetiyle salınarak taneye çarptırılan metalik bir küreden meydana gelmektedir. Şekil 2.18’de görüldüğü üzere darbe sarkacı belirli bir yükseklikten (h_0) bırakılarak taneye çarptırılmaktadır.



Şekil 2.18. İkiz sarkaç test aleti (Ekşi, 2011)

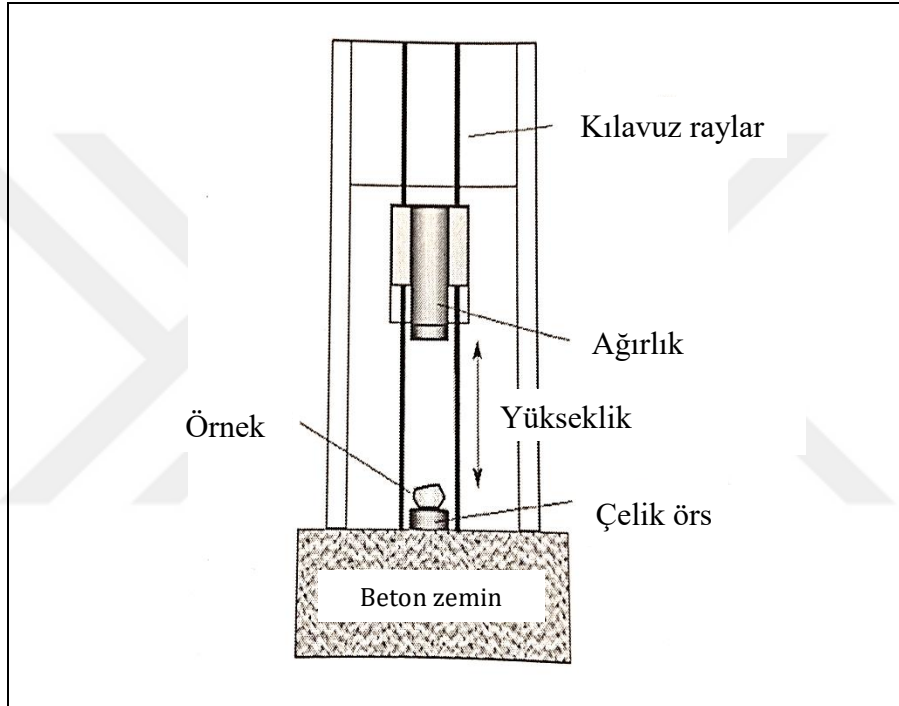
2.3.9.2. Ağırlık düşürme testi

Sert bir yüzey üzerinde hareketsiz duran örneğe bir ağırlığın yerçekimi etkisi altında düşürülmesi prensibine dayanmaktadır (Eşitlik 2.29).

$$E_i = m_i g h_0 \quad (2.29)$$

Eşitlikte; m_i düşürülen ağırlığın kütlesini, g yerçekimi kuvvetini ve h_0 net düşme yüksekliğini ifade etmektedir. Farklı yükleme enerjileri düşürülen ağırlığın kütlesinin ve bırakma yüksekliğinin değiştirilmesiyle elde edilmektedir.

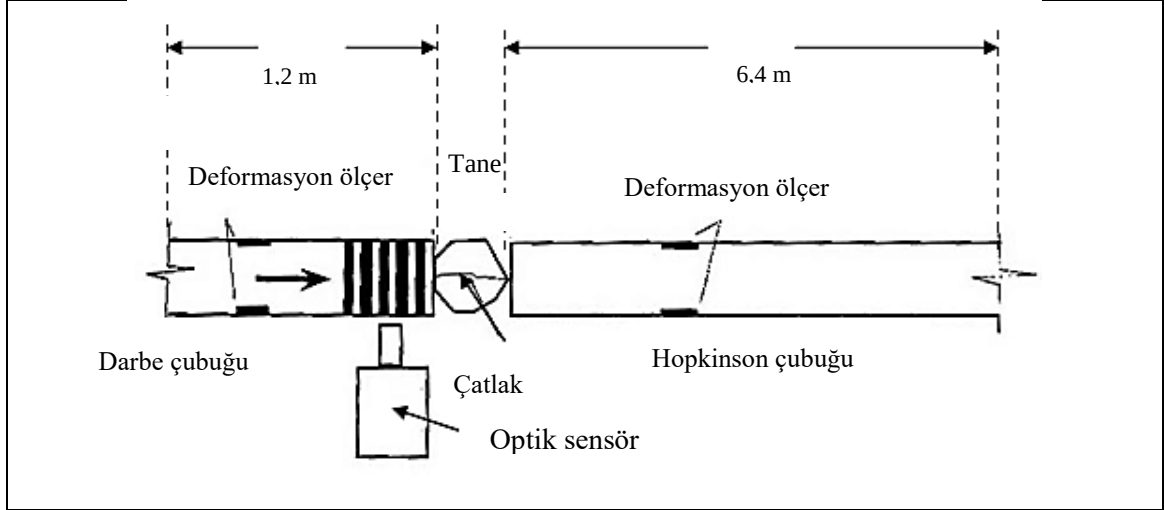
Julius Kruttschnitt Mineral Araştırma Merkezi (JKMRC) tarafından geliştirilen ağırlık düşürme test cihazı Şekil 2.19’da gösterilmektedir. Ağırlık ve örs yüzeyi düz olarak tasarlanmıştır. Test aletinin standart ağırlığı 20 kg olup, ağırlık 50 kg’a kadar çıkabilmektedir. Düşme yüksekliği 0,05 ile 1,0 m arasında değişebildiğinden, 0,01-50 kWs/ton’a varan geniş bir enerji aralığında çalışma imkanı vardır. Düzenekte tek boyut aralığında hazırlanan taneler, farklı yükleme enerjisi seviyelerinden tek tek darbe etkisi altında kırılmaktadır (Napier Munn vd., 1999).



Şekil 2.19. JKMRC Ağırlık düşürme test cihazı (Gupta ve Yan, 2006)

2.3.9.3. Hopkinson basınç çubuğu

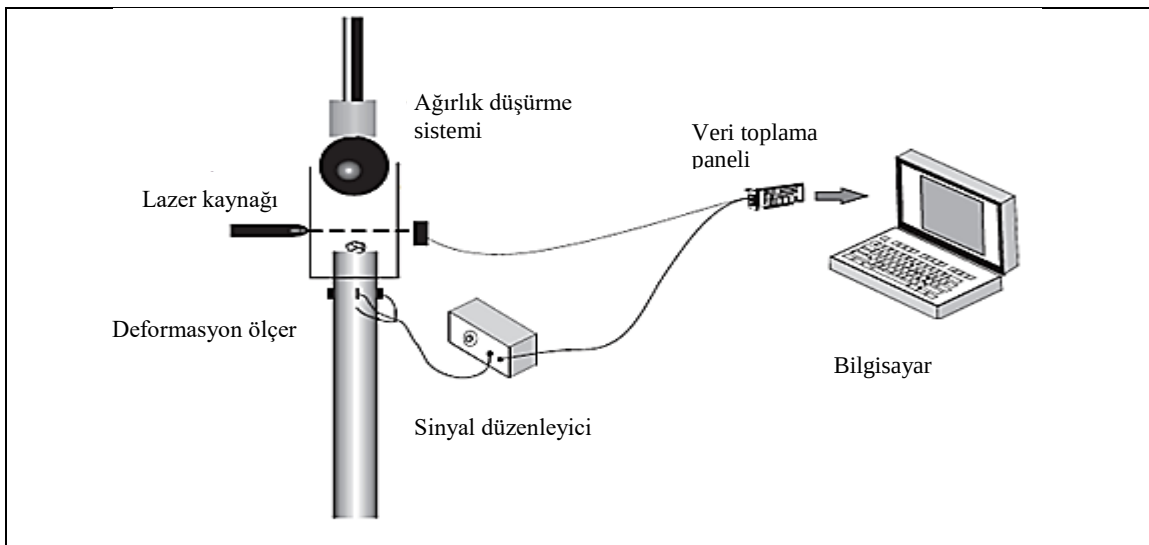
Hopkinson (1914), tarafından malzemelerin dinamik yükleme sırasındaki özelliklerini ölçmek amacıyla geliştirilmiştir (Tavares, 2007). Şekil 2.20’de verildiği gibi, uygulanan kuvvet her iki çubukta uzunlamasına deformasyon dalgaları olarak yayılmakta ve bu dalgalar her iki çubuk üzerine yerleştirilmiş olan deformasyon ölçerler vasıtasıyla ölçülmektedir.



Şekil 2.20. Hopkinson basınç çubuğu test cihazı (Napier-Munn et al., 1999)

2.3.9.4. Çok hızlı yük hücresi

Weichert ve Herbst (1986), tarafından Utah Üniversitesi'nde geliştirilmiştir (Ekşi, 2011; Tuzcu vd., 2011). Çok hızlı yük hücresi (UFLC) cihazının geliştirilmesinin başlıca nedeni, o zamanki geleneksel yük hücrelerinin sınırlı bant genişliklerine sahip olmasıdır (Tuzcu, 2016). Çok hızlı yük hücresi, yan yüzeylerine iki adet deformasyon ölçer yerleştirilmiş uzun bir çubuk ve çubuğun üst kısmında yer alan örsten meydana gelmektedir. Örs üzerine konumlandırılan tane ya da tane yatağı ağırlığının serbest düşürülmesiyle darbe etkisiyle kırılmaktadır. Oluşturulan darbe etkisiyle tanede meydana gelen basınç, çelik çubukta oluşan yer değiştirme ve düşen ağırlığın konumu hesaplanmaktadır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Çok hızlı yük hücresi (Ekşi, 2011)

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

3.1.1. Mika

Mika hakkındaki genel bilgiler DPT (2001), Chevalier (2008) ve U.S.G.S. (2010)'dan alınmıştır.

Endüstriyel hammaddeler dünyasındaki son gelişmelere bağlı olarak mikanın bu alandaki önemi giderek artmaktadır. Dünyada (A.B.D., Kanada, Hindistan, İngiltere vb.) mika üzerinde çeşitli araştırmalar yapılırken, ülkemizde zengin mika yatakları olmasına rağmen, günümüze kadar mikanın endüstriyel hammadde olarak değerlendirilmesi yönünde herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Ülkemiz için yeni bir endüstriyel hammadde olan mikronize mika, dünyada endüstriyel alanda geniş çapta kullanılmaktadır. Özellikle çevre için zararlı etkileri belirlenen asbest'e alternatif malzemeler arasında yer alması toz mikanın kullanımını arttırmıştır (DPT, 2001; Chevalier, 2008).

3.1.2. Tanım

Mika, başlıca granit bileşimli mağmatik kayalarda (pegmatit gibi) ve metamorfik kayalarda (şist ve gnays gibi) bulunan bir cevherdir. Genellikle levha mika cevheri pegmatitik kayalar içinde bulunurken, levha mika üretimine uygun olmayan mika cevherleri bölgesel metamorfizmaya uğramış kayalarda bulunur.

Mika, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip levhamsı, kompleks bileşimli hidroalüminyum silikat minerallerine verilen isimdir. Mika grubu mineralleri arasında endüstriyel öneme sahip ana mineraller muskovit ve flogopittir.

Muskovit: $KAl_2(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2$. Mükemmel bir dilinimlenme (yapraksı yapı) gösteren muskovit, yumuşak ve elastik özellik gösteren ince levhalara kolayca ayrılabilir. Çok ince levha halindeki muskovit; şeffaf, renksiz veya açık gri renkte ve

sedef parlaklığındadır. Kalın levhaları ise yarı şeffaf, açık yeşil veya kırmızı renkte olabilir. Levha muskovit yüksek ısısal ve elektriksel özellikleri nedeniyle elektriksel alanda birçok cihazda kullanılmaktadır. Hindistan, Pakistan, Brezilya ve Rusya önemli yataklara sahip ana ülkelerdir.

Flogopit: $\text{KMg}_3\text{AlSiO}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Flogopit mika grubu içerisinde oldukça ender bir mineraldir. Diğer mika minerallerine nazaran daha üstün ısı ve elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle üretilmektedir.

Biyotit: $\text{K}(\text{Fe,Mg})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$. Biyotit minerali birçok magmatik kayacın yanı sıra bölgesel ve kontakt metamorfik kayaçların ana bileşenlerinden birini oluşturur. Biyotit, düşük izolasyon özelliği ve yapısındaki demirin kolayca oksitlenmesi nedeni ile endüstriyel önem taşımamaktadır.

Lepidolit: $\text{KLiAl}(\text{Al,Si})_3\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$. Son on yılda pazarı gittikçe artmıştır. Lepidolit, lityum cevheridir ve genellikle granitik kütlelerle bulunur. Lepidolitlerde lityum içeriği genellikle değişmekle beraber, düşük lityum içerenlerin cevher olarak kullanılması mümkün değildir. Lepidolit; kuvars, feldispat, spodumen, turmalin ve özellikle elbait ile beraber bulunur.

Zinwaldit: $\text{KLiFeAl}(\text{AlSiO}_3)\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$. Zinwaldit mika gurubu içerisinde oldukça ender gözlenen bir mineraldir.

3.1.3. Sınıflandırma

Ticari açıdan mika işlenmiş ve işlenmemiş olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Genelde işlenmiş mika terimi; ince ve küçük mika pullarının yapay olarak birbirleri üzerine yapıştırılması ile oluşturulmuş mika için kullanılmakta ve mikanit, mika kağıdı gibi gruplara ayrılmaktadır. İşlenmemiş mika ise basit zenginleştirme işlemleri haricinde başka bir işleme tutulmamış malzemeyi karakterize etmektedir. İşlenmemiş mika başlıca levha mika, hurda-pul mika, toz-mikronize mika olmak üzere üç ayrı grupta değerlendirilmektedir.

Levha Mika: Doğal olarak bulunan, oldukça düzgün, kalın ve geniş alanlı parçalara verilen isimdir. Levha mika doğal olarak oluşan mika bloklarından elde edilmektedir. Levha mika, kalınlığa bağlı olarak blok, film (zar) ve yaprak olmak üzere üç kısma ayrılır. Levha mikanın kullanılan en tipik boyutu $154,8 \text{ cm}^2$ ($1,24 \text{ inch}^2$) derecesidir.

Hurda ve Pul Mika: Hurda ve pul mika terimi genellikle levha mika olarak kullanılmaya uygun olmayan boyut ve kalitedeki mikayı kapsamaktadır. Geçmişte hurda ve pul mika terimleri eş anlamlı olarak kullanılmaktaydı. Fakat günümüzde yanlış yorumlamalardan kaçmak için bu iki terim arasında bir ayırım yapılmıştır. Hurda mika terimi, pegmatit madenciliği sonucu elde edilen ürünü içermektedir. Ayrıca levha mika madenciliği sonucu ortaya çıkan atık malzemeyi de kapsamaktadır. Pul mika terimi ise, levha mika haricinde diğer alanlarda kullanıma yönelik olan ve ince taneli çeşitli kayalardan (şist ve pegmatit gibi) zenginleştirme sonucu elde edilen mikayı karakterize etmektedir. Pul mika, kaolin zenginleştirilmesi esnasında elde edilen ürünü de kapsamaktadır. Hurda ve pul mikanın değerlendirilmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmış, sonuç olarak bu malzemeler toz ve mikronize mika pazarının gelişmesine neden olmuştur.

Toz ve Mikronize Mika: Mikanın ticari öneme sahip diğer bir grubunu da toz ve mikronize mika oluşturmakta, pul ve hurda mikanın öğütülmesi ile elde edilmektedir. Toz mika ince öğütmeyi ($-150 \mu\text{m}$, $-74 \mu\text{m}$ gibi), mikronize mika çok ince öğütmeyi ($d_{50}:15 \mu\text{m}$) ifade etmektedir.

3.1.4. Kullanım

Blok mikanın kullanılması: Blok mikanın % 90'ı elektrik-elektronik endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu alanda mikanın kullanılmasının nedeni, ısı ve elektrik izolasyonlarında dirençli olması, kimyasal reaksiyonlara girmemesi ve elektriği iletmemesidir.

Toz ve mikronize mikanın kullanılması: Mika, doğada en bol bulunan minerallerden biri olmasına rağmen, ticari kullanım imkanları kısıtlı kalmıştır. Bunun nedeni, değişik endüstri kollarında kullanılmaya uygun iyi kaliteli hurda ve pul mika oluşumlarının endüstriyel açıdan az gelişmiş ülkelerde bulunmasından kaynaklanmaktadır. Buna rağmen toz ve mikronize mika farklı endüstrilerde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Toz ve mikronize mikayı endüstride bu kadar önemli kılan fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin neler olduğunun bilinmesinde yarar vardır. Bu özellikler:

- Üstün mekanik, ısı ve elektriksel özelliklere sahip, yüksek gerilme ve bükülme dayanımı gösteren, şeffaf, elastik, esnek, sert ve nispeten ucuz doğal bir mineral olması
- Kimyasal olarak kararlı olup, ışık, elektrik, su, yağ çözücüler, asitler (hidroflorik asit ve konsantre sülfürik asit hariç), alkaliler ve kimyasal maddelere karşı dayanıklı olması
- Mükemmel derecede dielektrik dayanımı ve ısı kararlılığına sahip oluşu
- Neme, yanmaya, erimeye karşı dayanıklı olması, sıcaklık artışı ve azalmasına bağlı olarak ortaya çıkan değişiklikleri göstermemesi
- Işığı yansıtan ve geçiren muskovit tanelerinin, dekoratif ve süsleyici bir özellik vermesi
- Sürtünmeye karşı önemli özelliklere sahip olan muskovit tanelerinin, yüzeylerin korunmasına yardımcı olması
- Boyalarda katkı maddesi olarak kullanıldığında düşük özgül ağırlığı ve yapraksı yapısı nedeni ile çökmemesi ve boyada homojen bir dağılım göstermesi, ayrıca sudan etkilenmemesi, boyalar ile kolay karışması
- Kullanıldığı ürünün sertleşmesine, pekişmesine ve kuvvetlenmesine yardımcı olması; mikro ölçekte kırılmayı ve bozunmayı önlemesi; iletkenliği azaltması ve ısı yalıtımını geliştirmesi.

Toz ve mikronize mikanın en büyük kullanım alanını oluşturan boya endüstrisinde kuru ve yağ öğütülmüş mika kullanılmakta ve böylece emülsiyon ve sentetik boyalar, korozyona karşı kullanılan boyalar, dahili ve harici boyalar elde edilmektedir.

Mikronize mika %10 ila %20 oranında emülsiyon boyalarda kullanılmaktadır. Bu tip boyalara katılan muskovit ile boyalar suya ve bozunmaya karşı dayanım kazanmaktadır. Dekoratif görünüm elde etmek için mika boya endüstrisinde de kullanılır ve bu görünüm mika levhalarının boyanın uygulandığı yüzeye paralel dizilmesi ile sağlanmaktadır. Bu dizilim aynı zamanda yüzeye su girişini engellemekte ve yüzeyi korozyona karşı korumaktadır.

Boya endüstrisinde yaş ve kuru öğütülmüş toz ve mikronize mika kullanılmakta, ancak yaş öğütme ile yukarıda belirtilen özelliklerin sağlanması daha kolay olmaktadır. Yaş öğütülmüş mika, boyalarda çökmüş malzemenin yeniden yayılmasına ve asılı halde kalmasına yardımcı olmaktadır. Harici boyalarda kolay sürülme, dekoratif özellik kazandırması vb. gibi özellikleri yüzünden dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır.

Toz ve mikronize mika ayrıca plastik endüstrisinde mukavemet artırıcı dolgu maddesi olarak kullanılmakta ve ürünlere yüksek çekme dayanımı ve esneklik kazandırmaktadır. Plastik endüstrisinde kuvvetlendirici dolgu maddesi olarak kullanılan mika, cam lifi ve asbest gibi lifsi minerallere kıyasla, levhamsı yapıda olması nedeni ile, ürünlerde tek bir yön yerine tüm düzlemde dayanıklılık sağlamaktadır. Toz ve mikronize mika kauçuk endüstrisinde de dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca; kağıt, otomobil, kozmetik, tekstil ve gübre endüstrisinde, kaynak elektrodu imalinde ve inci parlatma boya maddelerinde olmak üzere çok farklı alanlarda az da olsa kullanımı mevcuttur. Son yıllarda otomobil endüstrisinde mika kullanımı giderek artmıştır. Otomobillerinin tabanına mika katkılı malzemeler yerleştirilerek, otomobilin içine gelen motor sesi önlenmeye çalışılmaktadır. Çizelge 3.1’de yaş ve kuru öğütülmüş mikanın kullanım alanları ve sağladığı etkiler verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yaş, kuru ve mikronize öğütülmüş mikanın kullanıldığı alanlar ve sağladığı etkiler

Ürün cinsi	Kullanıldığı alanlar	Sağladığı etkiler
Yaş öğütülmüş mika	Kauçuk, lastik	Kalıp yağlandırıcısı olarak daha çok otomobil endüstrisine bağlı olarak kullanılmaktadır.
	Boya endüstrisi	Çökme ve korozyona karşı kullanılan boyaların üretiminde, nispeten düşük maliyeti nedeniyle mikronize mika yerine kullanılmaktadır.
Mikronize mika	Boya endüstrisi	Büyük oranda boya endüstrisinde kullanılmaktadır.
Kuru öğütülmüş mika	Yüzey kaplaması	İç ve dış cephe sıvalarında, yapı ve çatı boyalarında kullanılmaktadır.
	Plastik endüstrisi	Otomobil, elektrik ve yapı endüstrisinde kullanılan sert plastiklerin imalinde dolgu maddesi olarak kuvvetlendirici etki yaratmaktadır.

3.1.5. Üretim yöntemi ve teknolojisi

Toz ve mikronize mika kuru ve yaş öğütme ile üretilmektedir. Bu işlemler sonucu elde edilen ürünler, fiziksel özellikleri ile özellikle görünüm açısından, birbirlerinden büyük farklılıklar göstermektedir.

Levha mikanın işlenmesi esnasında ortaya çıkan atık mikanın ve hurda-pul mikanın değerlendirilmesi için ayrıca bir işlemden geçirilmesi gerekmektedir. Bu işlem cevher hazırlama tekniği bakımından mikanın öğütülerek dilinim yüzeyleri boyunca daha ince levhalara ayrılmasını kapsamaktadır. Mikanın en ince pullarının sağlam ve elastik olması; öğütme işlemi esnasında bu özelliklerinin etkin olması nedeni ile tane boyunda önemli bir değişikliğin elde edilmesinde bazı sorunlar mevcuttur. Dolayısıyla mikanın öğütülmesi esnasında, ayrıca endüstriyel açıdan da kullanım alanına bağlı olarak, farklı öğütme yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir (DPT, 2001).

Kuru Öğütme: Kuru öğütme, yüksek hızlı çekiçli değirmenlerde yapılmaktadır. Elde edilen ürün titreşimli elekler ile gruplandırılarak değerlendirilmektedir. Kuru öğütmede kullanılan diğer bir değirmen ise Majak değirmenleridir. Majak değirmenlerde akışkan enerjisinden yararlanılmakta, öğütme işlemi birbirine dik iki yatay jetin çarpışması ile sağlanmaktadır. Kuru öğütülmüş mika tane kenarlarının pürüklü-yırtılmış olması ve yüzeyinde büyük ölçüde aşınma meydana gelmesi nedeni ile un gibi bir görünüme sahiptir. Dekoratif kullanım için yeterli parlaklığa sahip değildir ve kayganlığı azdır. Ayrıca sıvılarla iyi karışmamaktadır. Bu yüzden yaş öğütülmüş mikadan daha ucuzdur (DPT, 2001).

Yaş Öğütme: Yaş öğütmede çubuklu değirmenler kullanılır. Mikanın parlaklığının korunması istenildiği durumlarda yoğun olarak yaş öğütme kullanılmaktadır. Çubuklu değirmenlerde çubuklar genellikle yüksek kaliteli karbonlu çeliklerden yapılmıştır. Öğütme esnasında parlaklığın kaybolmaması için ortam sıcaklığının artmamasına özen gösterilmelidir. Toplam üretilen mikanın yaklaşık yarısı bu işlem ile elde edilmektedir. Bu işlem sonucu 100, 200, 325 mesh boyutlarında sınıflandırılmış %20 ve daha fazla nem içeren metalik parlaklığa sahip iyi kalitede mika üretilmektedir. İşlemin nispeten yavaş ve pahalı olması üretimde sakınca oluşturmaktadır. Yaş öğütülmüş mika, çok ince levhalara ayrılması

ve yapraksı özelliği nedeni ile, endüstriyel alanda kuru öğütülmüş mikaya nazaran daha geniş bir kullanım alanına sahiptir (DPT, 2001).

3.1.6. İthalat ve ihracat

Ülkemizin 1995 ve 1998 yılları arasındaki toz mika ihracatı ve ithalatı ve Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmiştir. Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te görüldüğü gibi, toz mika ihracatı yıllara göre artarken, ithalat azalmıştır. Bu da ülkemiz madencilik firmalarının toz mikanın önemini kavradığının bir göstergesi sayılabilir. İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birliği (İMMİB) verilerine göre ise 2016 yılında 210738 \$ mika ihracatı yapılmıştır.

Çizelge 3.2. Ülkemizin yıllara göre toz mika ihracatı

Yıllar	Mika Türü	Miktar (kg)	Değer (\$)
1995	Toz Mika	2500	439
1996	Toz Mika	13000	3630
1997	Toz Mika	213765	54685
1998	Toz Mika	328604	64673
2003	Mika	530000	105000
2005	Mika	565000	140000

Çizelge 3.3. Ülkemizin 1995 ve 1998 yılları arasındaki toz mika ithalatı

Yıllar	Mika Türü	Miktar (kg)	Değer (\$)
1995	Toz Mika	170602	146852
1996	Toz Mika	338464	292519
1997	Toz Mika	125066	133151
1998	Toz Mika	76430	114860

3.1.7. Fiyatlar

Çizelge 3.4'te kuru ve yaş öğütülmüş mikanın 2016 satış fiyatları Madencilik Bülteni Sayı 119'dan alınarak aşağıda verilmiştir (Yılmaz, 2016). Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi yaş mikronize mikanın fiyatları oldukça yüksektir.

Çizelge 3.4. Kuru ve yaş öğütülmüş mikanın 2016 satış fiyatları

Ürün	Fiyat (\$/ton)
325 meş mikronize, FOB Durban	400-475
ABD ıslak mikronize FOB fabrika	700-1250

3.1.8. Ülkemizde durum

Ülkemizde daha çok pegmatitlere bağlı olarak mika üretimi yapılmakta, küçük çapta madencilik çalışmaları yürütülmektedir. Pegmatitlere bağlı mika oluşumlarının yanı sıra, mika-şist, muskovit-şist, mika gnays gibi metamorfik kayaçların da endüstriyel hammadde olarak rezerv teşkil ettiği unutulmamalıdır. Dünyada mika özellikle pegmatitler, granit ve mikaşist gibi kayaçlardan elde edilmektedir. Dolayısıyla ülkemizde bu kayaçlardan da mika üretimi düşünüldüğünde, geniş bir potansiyelin varlığı görülmektedir (DPT, 2001). Zengin feldispat yatakları işletilirken bazı sahalarda yan ürün olarak mika da üretilmektedir.

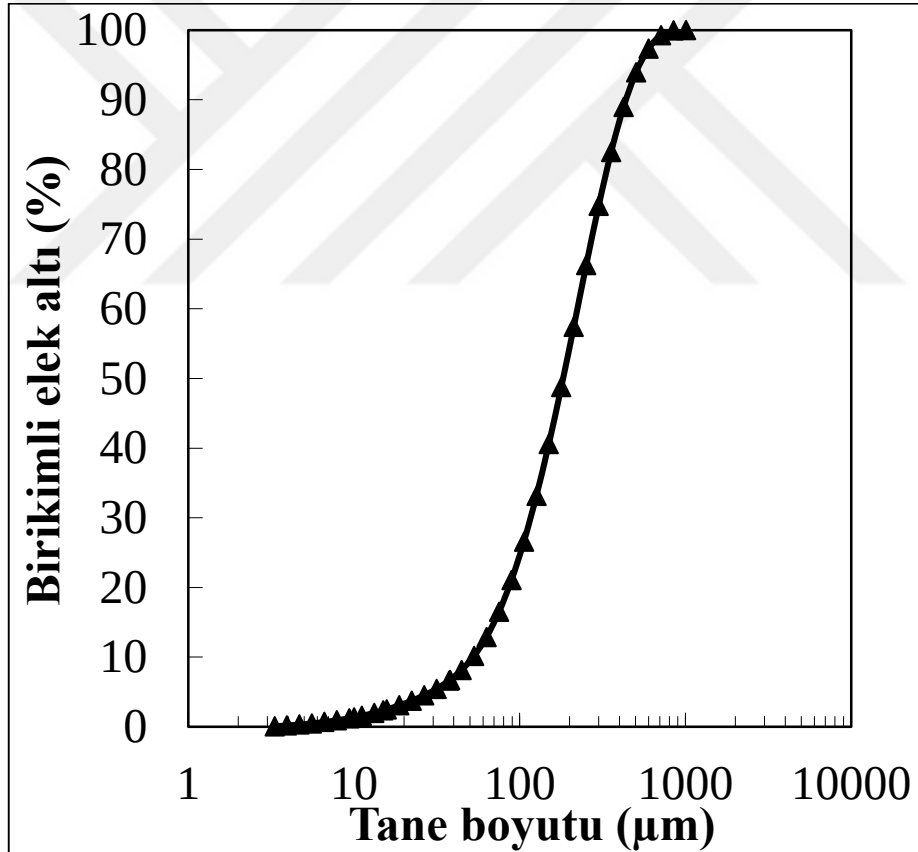
3.1.9. Sekizinci plan döneminde beklenen gelişmeler ve öneriler

Mika, endüstriyel alanda günümüze kadar önemi yeteri kadar anlaşılamamış ve etkin bir şekilde değerlendirilememiş bir mineraldir. Son yıllarda asbeste alternatif malzemeler arasında yer almasına rağmen mikanın kullanımını geliştirici çalışma yürütülmemektedir. Ülkemizde toz mikanın endüstriyel açıdan değerlendirilmesi yönünde bilimsel çalışmalar yürütülmemiş, mikanın dolgu maddesi olarak kullanımı yönünde standartlar hazırlanmamıştır. Tüm bu olumsuzluklar ülkemizde mikanın etkin ve aktif bir şekilde üretilmesi ve kullanımını geciktirmektedir. Dünyada levha mika madenciliğinden ziyade toz mika madenciliği daha büyük boyutlarda endüstriyel önem arz etmektedir (DPT, 2001).

3.2. Analizler

3.2.1. Örneğin hazırlanması ve Malvern-Mastersizer 2000 ile boyut analizleri

Kaltun Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'inden sağlanan $-425 \mu\text{m}$ boyutlu örnek, örnek bölücü yardımıyla 3 kg'lık kısımlara ayrılarak torbalanmıştır. Örneğin boyut analizi laboratuvarımızda bulunan Malvern marka Mastersizer 2000 model cihaz kullanılarak yapılmış ve elde edilen boyut dağılım eğrisi Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.1'de görüleceği gibi, örneğin d_{90} boyutu: $438,03 \mu\text{m}$, d_{80} boyutu: $336,57 \mu\text{m}$, d_{50} boyutu (ortalama boyutu): $183,03 \mu\text{m}$ ve d_{10} boyutu: $52,36 \mu\text{m}$ 'dur. Örneğin özgül yüzey alanı da $1052 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan $-425 \mu\text{m}$ mika örneğinin boyut dağılımı

3.2.2. Örneğin XRD ve XRF analizleri

Deneylerde kullanılan örneğin XRD analizi bir seramik fabrikasında yaptırılmış ve örneğin muskovit, kuvars ve albit minerallerinden oluştuğu saptanmıştır. XRF analizi ise

Kaltun Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'de yaptırılmıştır. Örnek; %5,97 K₂O, %2,81 Na₂O, %22,75 Al₂O₃ ve %62,32 SiO₂ içermektedir. Örneğin kızdırma kaybı, %2,35'tir.

3.2.3. Örneğin yoğunluk analizi

Laboratuvarda piknometre ile yapılan yoğunluk analizinden, örneğin yoğunluğu 2,71 g/cm³ olarak bulunmuştur.

3.2.4. Özgül yüzey alanı ölçümleri

Astek Kimya San. Tic. Ltd. Şti. tarafından üretilen Otomatik Blaine Cihazı ve gazlı yoğunluk ölçme cihazı (quantachrome multipycnometer) kullanılarak yapılmıştır.

3.3. Hesaplamalar

3.3.1. Tüketilen enerji miktarının (özell enerji tüketiminin) hesabı

Tüketilen enerji miktarı şu şekilde hesaplanmıştır (Jimenez, 1981):

$$E = \frac{94,830476 \times \text{Tork (Nm)} \times \text{Hız (d/d)} \times \text{Süre (saat)}}{\text{Örnek miktarı (gram)}}$$

E: Enerji tüketimi (kWs/t)

3.3.2. Bilya doluluk oranının (bilya miktarının) hesabı

$$J = \frac{\text{Bilya miktarı/Bilya yoğunluğu}}{\text{Değirmen tank hacmi}} * \frac{1}{0.6}$$

J: Bilya doluluk oranı

Örnek hesaplama 1:

Bilya: 5 mm alumina (3,9 g/cm³)

Tank hacmi: 595 cm³

J: 0,72 olması için gereken bilya miktarı:

$$0,72 = \frac{\text{Bilya miktarı}/3,9}{595} * \frac{1}{0,6}$$

Bilya miktarı = 1003 g

Örnek hesaplama 2:

Bilya: 4,76 mm çelik (7,7 g/cm³)

Tank hacmi: 595 cm³

J: 0,72 olması için gereken bilya miktarı:

$$0,72 = \frac{\text{Bilya miktarı}/7,7}{595} * \frac{1}{0,6}$$

Bilya miktarı = 1980 g

Örnek hesaplama 3:

Bilya: 5 mm cam (2,5 g/cm³)

Tank hacmi: 595 cm³

J: 0,72 olması için gereken bilya miktarı:

$$0,72 = \frac{\text{Bilya miktarı}/2,5}{595} * \frac{1}{0,6}$$

Bilya miktarı = 643 g

3.3.3. Boşluk doldurma oranının (malzeme miktarının) hesabı

$$fc = \frac{\text{Malzeme miktarı}/\text{Malzeme yoğunluğu}}{\text{Değirmen tank hacmi}} * \frac{1}{0,6}$$

$$U = \frac{fc}{J} * \frac{1}{0,4}$$

fc: Malzeme doluluk oranı

U: Boşluk doldurma oranı

Malzeme yoğunluğu: 2,71 g/cm³

Örnek hesaplama:

J: 0,72 olsun

U: 0,58 olması için gereken malzeme miktarı:

$$0,58 = \frac{f_c}{0,72} * \frac{1}{0,4}$$

$$f_c = 0,16704$$

$$0,16704 = \frac{\text{Malzeme miktarı}/2,71}{595} * \frac{1}{0,6}$$

$$\text{Malzeme miktarı} = 162 \text{ g}$$

3.3.4. Ağırlıkça katı oranının (pülp yoğunluğunun) hesabı

Pülp yoğunluğunun hesabı şu şekilde gerçekleştirilmiştir (Mankosa, 1986).

$$V = \frac{k}{\delta k} + \frac{s}{\delta s}$$

$$K = \frac{k}{k + s}$$

V= Pülp hacmi (cm³)

k = Katı miktarı (g)

s = Su miktarı (g)

δk = Katının özgül ağırlığı (g/cm³)

δs = Sıvının özgül ağırlığı (g/cm³)

K = Ağırlıkça katı oranı (pülp yoğunluğu) (%)

Örnek hesaplama:

$$\delta k: 2,71 \text{ g/cm}^3$$

V: 258 cm³ (her pülp yoğunluğu için sabit)

K = %45 için k: ?, s: ?

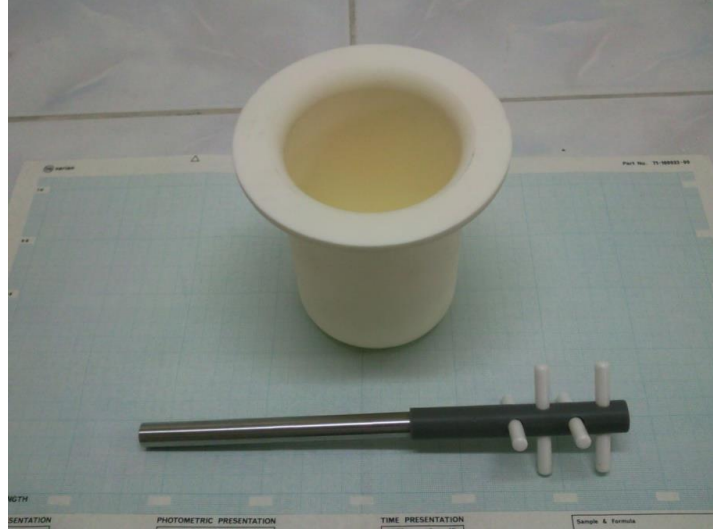
Sonuç, k: 162 g ve s: 198 ml'dir.

3.4. Deneysel Yöntem

Deneylerde Union Process marka 01-HD (Heavy Duty) model araştırma tipi atritör değirmen kullanılmıştır (şekil 3.2). Değirmende  ğ t c  ortamı karıştırmak için dikey bir şaft (plastik kaplı) ve bu şaft üzerine monte edilmiş 4 adet ZrO₂ karıştırma kolu vardır ve şaftın dönme hızı 100-600 d/d arasında değiştirilebilmektedir. Deneylerde, alumina tank ile çeşitli çapta ve cinste bilyalar (alumina/cam/elik) kullanılmıştır (şekil 3.3 ve 3.4). Alümina bilya çapları: 5 ve 3 mm, cam bilya çapları: 5 ve 3,15 mm ve elik bilya çapları: 4,76 ve 3,17 mm'dir. Deneylerde kullanılan tankın hacmi 595 ml, karıştırma kolunun uzunluğu 57,15 mm ve şaftın tank tabanından uzaklığı 6,35 mm'dir.



şekil 3.2. Atritör değirmen



Şekil 3.3. Değirmenin tankı, şaftı ve karıştırma kolu



Şekil 3.4. 3 ve 5 mm çaplı alumina bilyalar

Kuru öğütme deneyleri şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Şaft tank içine yerleştirildikten sonra önce bilyalar tanka doldurulmuş ve değirmen 100 d/d'da çalıştırılmıştır. Daha sonra öğütülecek kuru malzeme değirmene eklenmiştir. Son olarak da değirmen kapağı kapatılarak devir istenilen değere getirilmiştir. Belirlenen süre sonunda değirmen durdurularak boşaltılmış, bilyalar örnekten ayrıldıktan sonra elde edilen ürünün boyut analizi ve özgül yüzey alanı ölçümleri yapılmıştır.

Yaş öğütme deneyleri ise şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Şaft tank içine yerleştirildikten sonra önce bilyalar tanka doldurulmuştur. Daha sonra belirlenen miktarda su tanka ilave edilip değirmen 100 d/d'da çalıştırılmıştır. Son olarak da istenilen miktarda öğütülecek kuru malzeme değirmene eklenip değirmen kapağı kapatılarak devir istenilen değere getirilmiştir. Belirlenen süre sonunda değirmen durdurularak boşaltılmış ve bilyalar pülpten ayrıldıktan sonra elde edilen ürün kurutulmuştur. Kurutulmuş örnek ile boyut analizi ve özgül yüzey alanı ölçümleri yapılmıştır.

Değirmenin diğer özellikleri:

- Değirmen bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Tork, karıştırma hızı ve tüketilen güç gibi veriler zamana bağlı olarak bilgisayara kaydedilebilmektedir.
- Deney esnasında istenildiği anda değirmenin kapağı açılarak deneye müdahale edilebilmektedir.
- Tankın etrafında bulunan su ceketı sayesinde sıcaklık kontrolü sağlanabilmektedir.
- Öğütme çarpma, ezme ve makaslama kuvvetlerinin etkisiyle gerçekleşmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Öğütme sonucu elde edilen ürünün inceliğinin ve özgül yüzey alanı artışının harcanan enerji ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Bu konuda yapılan araştırmaların birçoğunda enerji ile yüzey alanı arttırma arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmış, böylece en az enerji ile en fazla yüzey alanı arttırmanın yolları araştırılmıştır. Bilindiği gibi öğütmede harcanan enerjinin bir kısmı doğrudan yüzey alanı arttırmada kullanılırken; önemli bir kısmı ise faydalı bir iş yapmadan ısı enerjisine ve sese dönüşerek kaybolmaktadır.

Öğütmede enerjinin etkili bir şekilde kullanılması, birçok tasarım değişkenlerinin yanında işletme değişkenlerine de bağlıdır. İşletme değişkenlerinin en önemlileri: öğütme süresi, karıştırma hızı, bilya oranı, malzeme miktarı, bilya boyutu, bilya cinsi ve öğütme tipidir. Ayrıca, bir öğütme işleminden maksimum verimliliğin elde edilebilmesi, işletim esnasında işletme değişkenlerindeki değişimin ürün üzerindeki etkisinin doğru belirlenebilmesine bağlıdır. Sistemin tasarım, kontrol ve optimizasyonu ancak işletme değişkenlerinde değişimleri güvenilir bir şekilde tanımlayabilecek matematiksel modellerin tanımlanması ile mümkün olabilmektedir.

Bu tezde, işletme değişkenlerinin mikanın atritör değirmende özgül yüzey alanını arttırma üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla kuru ve yaş öğütme deneyleri yapılmış ve sonuçların değerlendirilmesinde özgül enerji tüketimi (kWs/t), ürün özgül yüzey alanı (cm^2/g) ve kapasite (kg/saat) göz önüne alınmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlardan atritör değirmende özgül yüzey alanı ve kırılma hızına bağlı kesikli öğütme modelleri geliştirilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

4.1. Kuru Öğütme Deneyleri

4.1.1. Karıştırma hızının yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi

Aktarmalı değirmenlerde yapılan öğütme işlemlerinde öğütmeyi etkileyen faktörlerden biri de değirmenin dönüş hızıdır. Değirmenin dönmesi ile birlikte değirmen

içindeki ortam kinetik enerji kazanır ve bu enerji çarpma, ezme, sürtünme ve kesme kuvveti olarak öğünen malzemeye iletilir.

Aktarmalı değirmenin verimliliğini öğütme ortamının çarpışma hızı belirler. Öğütmenin çok yavaş bir dönüş hızı ile yapılması, bilyaların kabın yüzeyinde yuvarlanarak çarpışmanın olmamasına; çok yüksek bir dönüş hızı ise merkezkaç kuvvetinin etkisiyle bilyaların değirmen cidarına düşmeden yapışmalarına olur. Aktarmalı değirmenler ince malzemelerin öğütülmesinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, düşük hızlarda çalıştırıldıklarından öğütme süresi uzundur. Bu süreyi kısaltmak için titreşimli değirmenler ve atritör değirmenler geliştirilmiştir.

Atritör değirmenler diğer öğütücülere göre daha kısa sürede öğütme özelliğine sahip, yüksek enerji verimli öğütücülerdir. Aktarmalı değirmenlerde optimum bir dönme hızı söz konusu iken, atritör değirmenlerde karıştırma kolların hızı ne kadar yüksek ise öğütme verimliliği de o kadar yüksek olmaktadır (Kılınç ve Uslan, 2003). Ayrıca karıştırma hızının atritör değirmenler için ince öğütmede en önemli faktörlerden biri olduğu düşünülmektedir (Gao ve Forssberg, 1993).

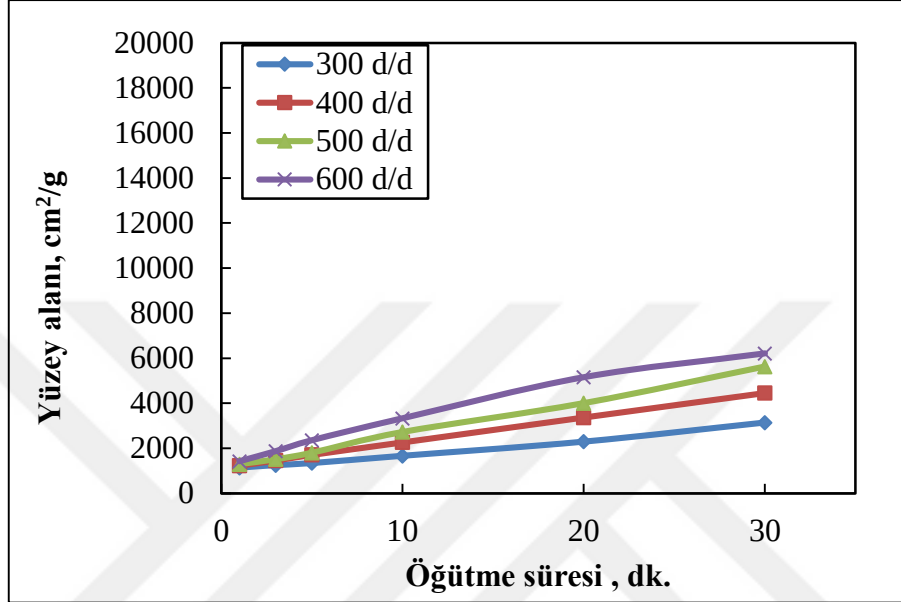
Celep vd. (2008), göre de atritör değirmenlerde öğütme, santrifüj kuvvete bağlıdır. Aktarmalı değirmenlerde karıştırma hızının artmasıyla değirmenin harcadığı güç de artmaktadır. Böylece değirmende harcanan özgül enerji tüketiminde bir artış olmaktadır. Bunun sonucunda elde edilen ürünün yüzey alanı artmakta veya istenen ürün yüzey alanına daha kısa sürede ulaşılmakta ve değirmen kapasitesinde artış gerçekleşmektedir. Bunlara karşın yüksek hızlarda endüstriyel ölçekteki tasarımlarda karşılaşılan güçlükler nedeniyle optimum bir hız seçimi gerekmektedir.

Karıştırma hızının kuru öğütmede yüzey alanına etkisini belirlemek amacıyla 5 mm alumina bilya kullanılarak farklı hızlarda deneyler yapılmıştır. Sonuçlar, öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.1’de; enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.2’de ve öğütme süresi-enerji tüketimi Şekil 4.3’te verilmiştir. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

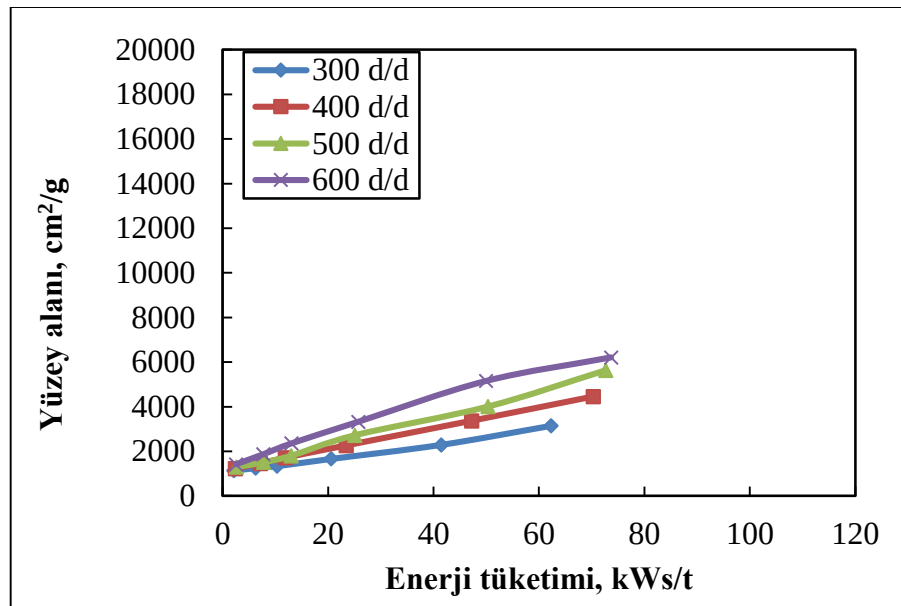
- Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, tüm karıştırma hızlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek karıştırma hızlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim duyulmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde 600 d/d karıştırma hızı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir.
- Tüm karıştırma hızlarında yüzey alanı değerleri doğrusal olarak artmaktadır (600 d/d hariç) (Şekil 4.1). Bu durum zamanla yüzey alanındaki artışın devam ettiğinin bir göstergesidir. Zamanla yüzey alanındaki artışın nedeni, öğütmenin ve mikanın laminasyonunun (mikanın levhalara/plakalara ayrılması) devam etmesinden olabilir.
- Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, tüm karıştırma hızlarında enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmek için yüksek karıştırma hızlarında daha az enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Karıştırma hızının artması değirmen performansının artmasına neden olmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar Jankovic (2003) ve Jayasundara (2007) ile uyumludur. Aynı enerji tüketimlerinde 600 d/d karıştırma hızı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir. Bu durum, karıştırma hızı arttıkça bilyaların kinetik enerjilerinin artmasından kaynaklanmaktadır.
- Şekil 4.3’te görüleceği gibi, tüm karıştırma hızlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde karıştırma hızı arttıkça, enerji tüketimi de artmaktadır. 600 d/d karıştırma hızında tüketilen enerji ile 500 d/d karıştırma hızında tüketilen enerji yaklaşık olarak aynıdır. Buna neden olarak, 600 d/d karıştırma hızında bilyaların çok hızlı bir şekilde dönmesi sonucu şafta fazla yük binmemesi gösterilebilir.
- Şekil 4.2’de enerji tüketimi-yüzey alanı grafiği incelendiğinde, aynı enerji tüketimlerinde 600 d/d karıştırma hızında en yüksek yüzey alanlı ürünler elde edildiği görülmektedir. Amaç belirli bir öğütme süresinde (veya enerji tüketiminde) yüksek yüzey alanlı ürün elde etmekse, yüksek karıştırma hızı gerekmektedir (Zheng vd., 1996). Bu çalışmada yüksek yüzey alanlı ürün elde etmek için yüksek karıştırma hızlarının kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle bundan sonraki deneyler 600 d/d karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir.
- Bu grup deneylerden yüzey alanı açısından elde edilen en verimli sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Karıştırma hızı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar

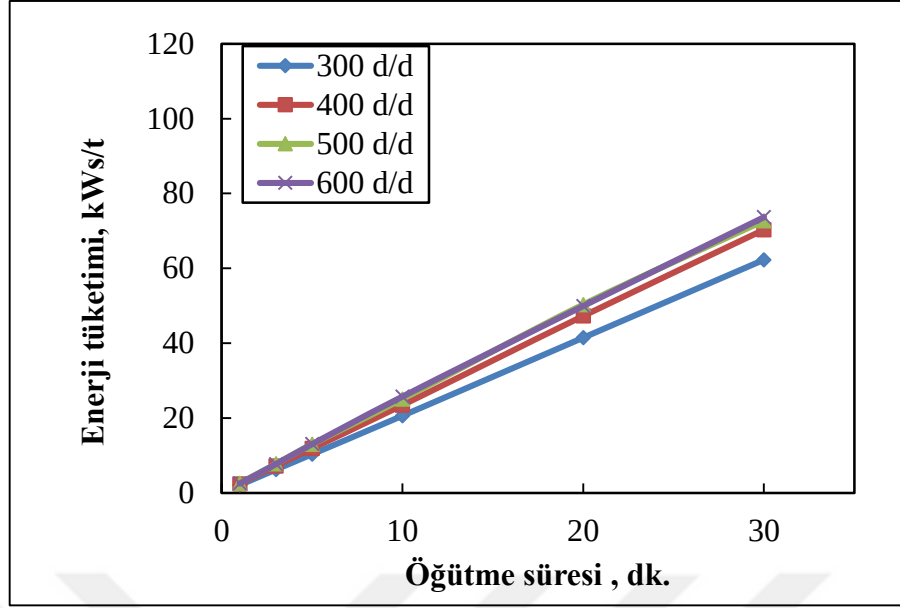
Deney koşulları	Enerji T. (kWs/t)	Yüzey A. (cm ² /g)	Kapasite (kg/saat)
Kuru öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,52, U: 0,80, bilya: 5 mm alumina ve 726 g.	73,683	6207	0,324



Şekil 4.1. Farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, J: 0,52, U: 0,80, bilya: 726 g 5 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.2. Farklı karıştırma hızlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, J: 0,52, U: 0,80, bilya: 726 g 5 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.3. Farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (kuru öğütme, J: 0,52, U: 0,80, bilya: 726 g 5 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)

4.1.2. Bilya doluluk oranının yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi

Aktarmalı değirmenlerde düşük hızlarda iri malzeme öğütüldüğünde bilya doluluk oranı değirmen hacminin yaklaşık % 40'ı iken, atritör değirmenlerde değirmen hacminin % 80'i kadar olması daha iyi bir öğütmeye neden olmaktadır. Bununla birlikte aşırı öğütme ortamı kullanımı, fazla miktarda ortam; karıştırıcı ve tank aşınmasına neden olacağı için aşırı öğütme ortamı kullanımından kaçınılmalıdır (Celep ve Alp, 2008).

Bilya oranının (bilya miktarının) kuru öğütmede olan etkisini incelemek amacıyla 600 d/d'da 5 mm alumina bilya kullanılarak farklı bilya oranlarında deneyler yapılmıştır. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar, öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.4'de; enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.5'de ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, tüm bilya oranlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek bilya oranlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim duyulmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde J: 0,82 bilya oranı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir.

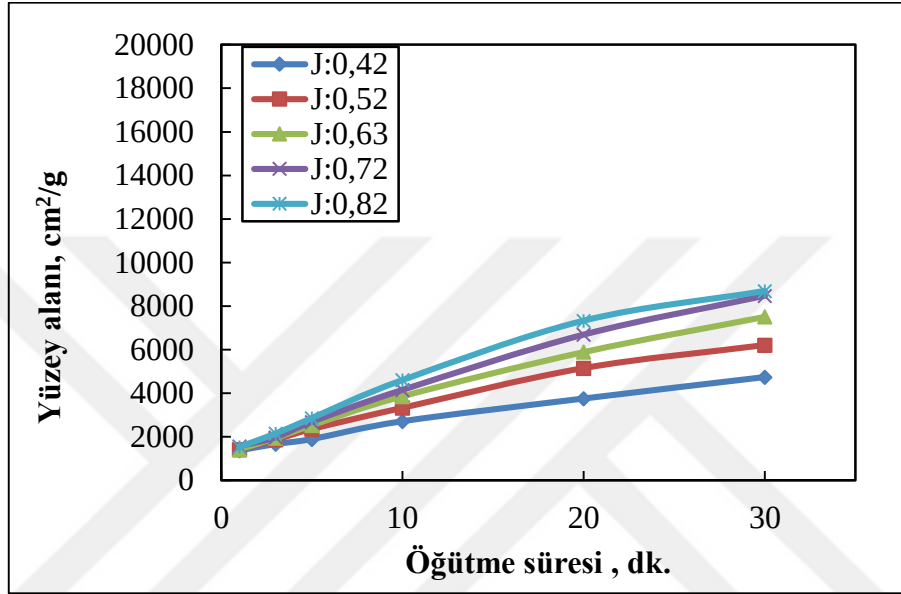
Bunun nedeni J: 0,82 bilya oranında bilya sayısının artması ve bunun sonucunda bilya-tane temas sayısının artmasıdır.

- Tüm bilya oranlarında yüzey alanı değerleri 10 dakikaya kadar doğrusal, sonrasında doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır (Şekil 4.4). Bu durum yüzey alanındaki artışın 10 dakika öğütme süresinden sonra yavaşlamaya başladığının bir göstergesidir. 10 dakika öğütme süresinden sonra yüzey alanındaki artışın yavaşlama nedeni, ince malzeme miktarının artmasıyla öğütme koşullarının zorlaşması ve mikanın laminasyonunun (mikanın levhalara/plakalara ayrılması) azalması olabilir.
- Şekil 4.5’de görüldüğü gibi, tüm bilya oranlarında enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları da artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek bilya oranlarında daha az enerjiye gereksinim vardır. Aynı enerji tüketimlerinde J: 0,82 bilya oranı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir. Benzer durum Altun (2013) ve Sivamohan ve Vachot (1990) tarafından da saptanmıştır. Bu durum, bilya oranı arttıkça bilya-tane temas sayısının artmasından kaynaklanmaktadır
- Şekil 4.6’da görüleceği gibi, tüm bilya oranlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde bilya oranı arttıkça, enerji tüketimi de artmaktadır. Bunun nedeni döndürülecek bilya sayısının artmasıdır.
- Şekil 4.5’de enerji tüketimi-yüzey alanı grafiği incelendiğinde, J: 0,82 bilya oranının en yüksek yüzey alanı değerleri verdiği görülmektedir. Gao vd. (2000) de karıştırmalı değirmenlerin yüksek doluluklarda kullanılması gerektiğini önermektedir. Ancak, J: 0,82 bilya oranında malzeme ve bilyaların değirmenden taşma eğilimi gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı J: 0,72 bilya doluluk oranı en uygun bilya doluluk oranı olarak belirlenmiş ve bundan sonraki deneyler bu oranda yapılmıştır.
- Bu grup deneylerden yüzey alanı açısından elde edilen en verimli sonuçlar, aynı koşullarda daha düşük bilya oranında elde edilen sonuçlarla birlikte Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi, bilya oranı 0,52’den 0,72’ye çıkarıldığında:
 - ürün yüzey alanı %36,5 artmaktadır. Ancak,
 - enerji tüketimi de %15,7 artmaktadır.

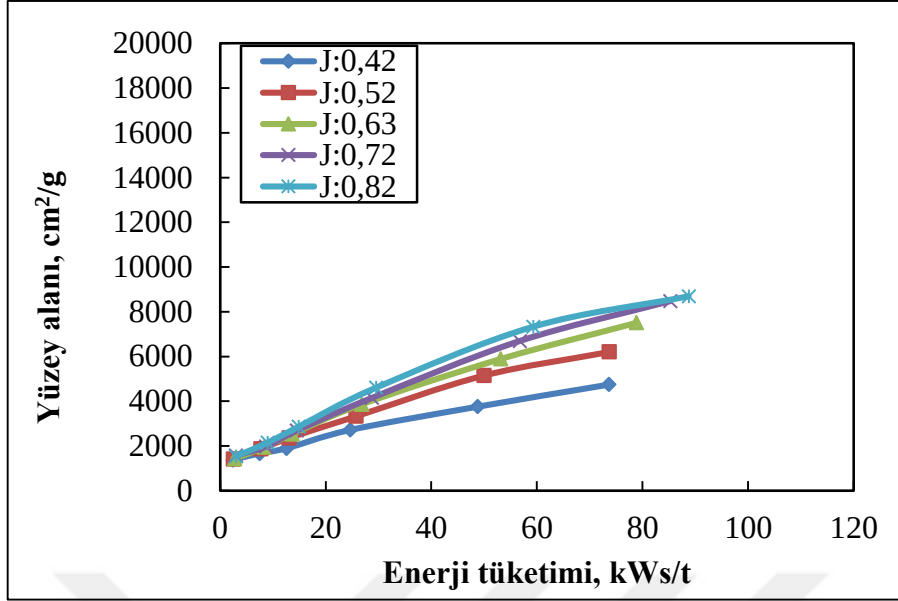
Bu durum yüzey alanı açısından olumlu, fakat enerji tüketimi açısından olumsuzdur.

Çizelge 4.2. Bilya oranı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar

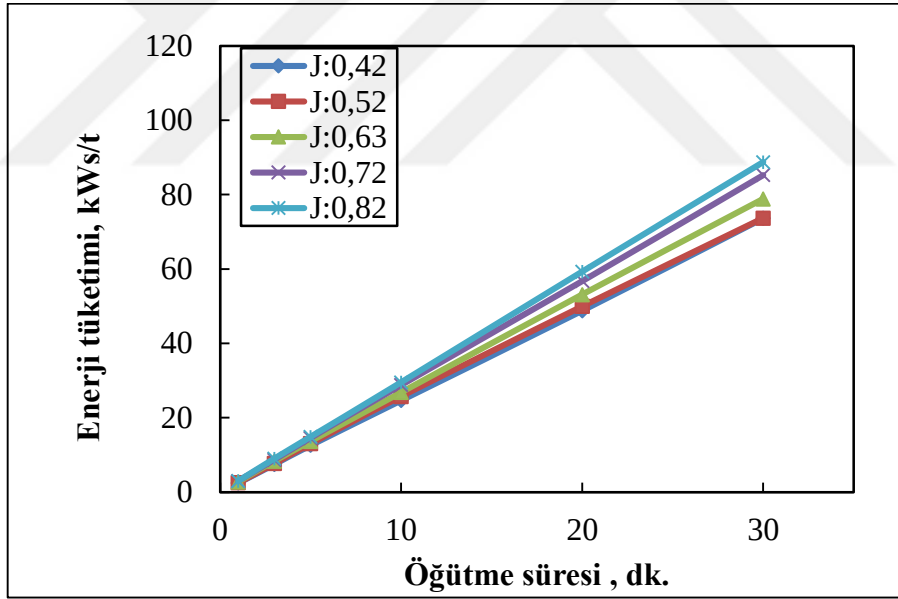
Deney koşulları	Enerji T. (kWs/t)	Yüzey A. (cm ² /g)	Kapasite (kg/saat)
Kuru öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,72, U: 0,58, bilya: 5 mm alumina ve 1003 g.	85,281	8470	0,324
Kuru öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,52, U: 0,80, bilya: 5 mm alumina ve 726 g.	73,683	6207	0,324



Şekil 4.4. Farklı bilya oranlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,42-0,82, U: 1,0-0,51, bilya: 581-1142 g 5 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.5. Farklı bilya oranlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,42-0,82, U: 1,0-0,51, bilya: 581-1142 g 5 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9720 kg/saat)



Şekil 4.6. Farklı bilya oranlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,42-0,82, U: 1,0-0,51, bilya: 581-1142 g 5 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)

4.1.3. Boşluk doldurma oranının yüzey alanı, enerji tüketimi ve kapasite üzerine etkisi

Literatürde değirmene beslenen malzeme miktarı kuru öğütmede boşluk doldurma oranı veya malzeme doluluk oranı cinsinden verilmektedir. Değirmendeki boşluk doldurma oranı özgül enerji tüketimini ve ürün tane boyutunu etkilediği gibi, öğütücü ortam tüketimini

de etkilemektedir. Boşluk doldurma oranı arttıkça enerji ve ortam tüketimi azalırken, ürün tane boyutu artmaktadır. Enerji ve ortam tüketimindeki bu azalma, öğütme veriminin en yüksek olduğu boşluk doldurma oranına kadar olumlu, onu geçtiğinde olumsuzdur (Fidan ve Arol, 1990).

Boşluk doldurma oranının (malzeme miktarının) kuru öğütmede olan etkisini incelemek amacıyla 600 d/d'da ve J: 0,72'de 5 mm alumina bilya kullanılarak farklı boşluk doldurma oranlarında (U: 0,58-1,20) deneyler gerçekleştirilmiştir. U: 1,0 ve U: 1,2 değerlerinde de deney yapılmasının nedeni, değirmenin kapasitesinin arttırılmak istenmesinden kaynaklanmıştır. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar, öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.7'de; enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.8'de ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, tüm boşluk doldurma oranlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede düşük boşluk doldurma oranlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim vardır. Aynı öğütme sürelerinde U: 0,58 boşluk doldurma oranı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir. Bunun nedeni, 0,58 boşluk doldurma oranında malzeme miktarı az olduğundan bilya-tane temas sayısının yüksek olmasıdır.
- Şekil 4.7 incelendiğinde, U: 1,00 ve U: 1,20 boşluk doldurma oranlarında yüzey alanı değerlerindeki artışın doğrusal olduğu görülmektedir. Bu durum, öğütmenin ve laminasyonun zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. Ancak, U: 0,58 ve U: 0,80 boşluk doldurma oranlarında sırasıyla 10. ve 20. dakikadan sonra yüzey alanındaki artış değerleri doğrusallıktan sapmaktadır. Bu durum bahsedilen boşluk doldurma oranlarından sonra öğütme ve laminasyonun yavaşladığının bir göstergesidir.
- Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, tüm boşluk doldurma oranlarında enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları da artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede düşük boşluk doldurma oranlarında daha az enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Aynı enerji tüketimlerinde U: 0,58 boşluk doldurma oranı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir. Bu durum, boşluk doldurma oranı azaldıkça bilya-tane temas sayısının artmasından kaynaklanmaktadır.

- Şekil 4.9’da görüleceği gibi, tüm boşluk doldurma oranlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde boşluk doldurma oranı azaldıkça, enerji tüketimi artmaktadır. Bunun nedeni öğütülen malzeme miktarının azalmasındandır.
- Şekil 4.8’de enerji tüketimi-yüzey alanı grafiği incelendiğinde, tüm enerji tüketimlerinde U: 0,58 boşluk doldurma oranının en yüksek yüzey alanı değeri verdiği görülmektedir. Bu nedenden dolayı bundan sonraki deneyler (bilya boyutu ve cinsinin kuru öğütme üzerine etkisinin incelendiği deneyler) U: 0,58 boşluk doldurma oranında yapılmıştır.
- Bu grup deneylerden yüzey alanı açısından elde edilen en verimli sonuçlar, aynı koşullarda daha yüksek boşluk doldurma oranında elde edilen sonuçlarla birlikte Çizelge 4.3’te verilmiştir. Çizelge 4.3’te görüldüğü gibi, boşluk doldurma oranı U: 1,0’den U: 0,58’e azaldığında:

➤ ürün yüzey alanı % 78,0 artmaktadır.

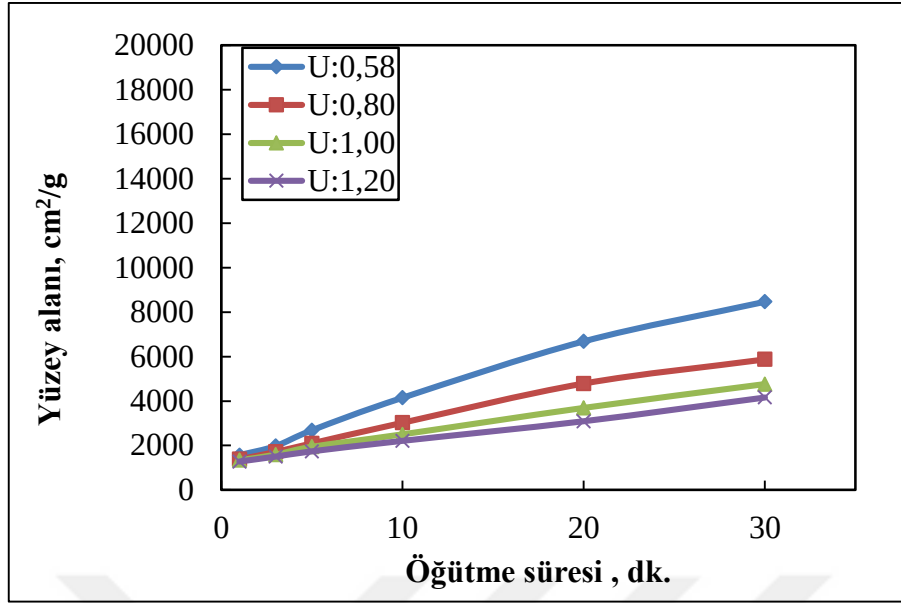
Ancak,

➤ enerji tüketimi de %63,7 artmakta ve kapasite %41,9 azalmaktadır.

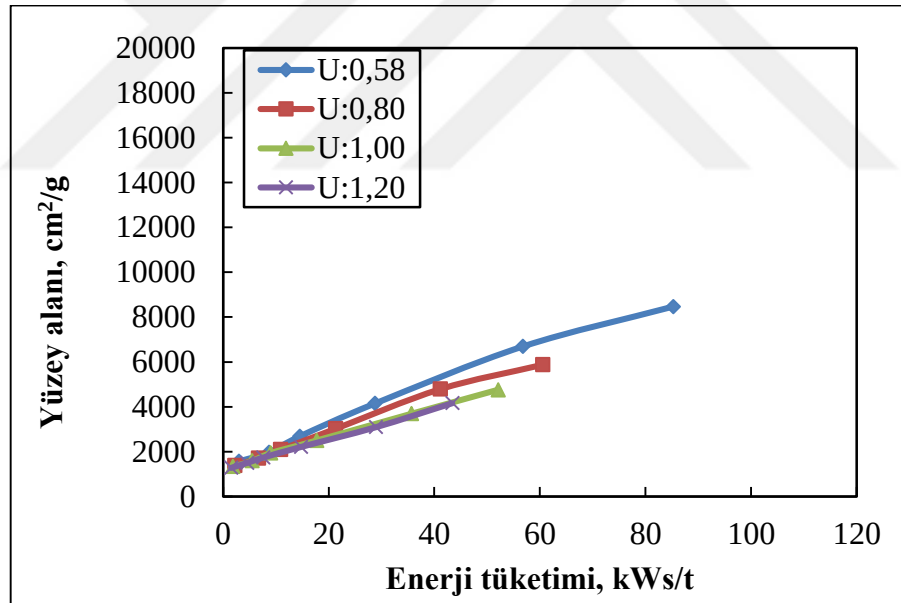
Bu durum yüzey alanı açısından olumlu, fakat enerji tüketimi ve kapasite açısından olumsuzdur.

Çizelge 4.3. Boşluk doldurma oranı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar

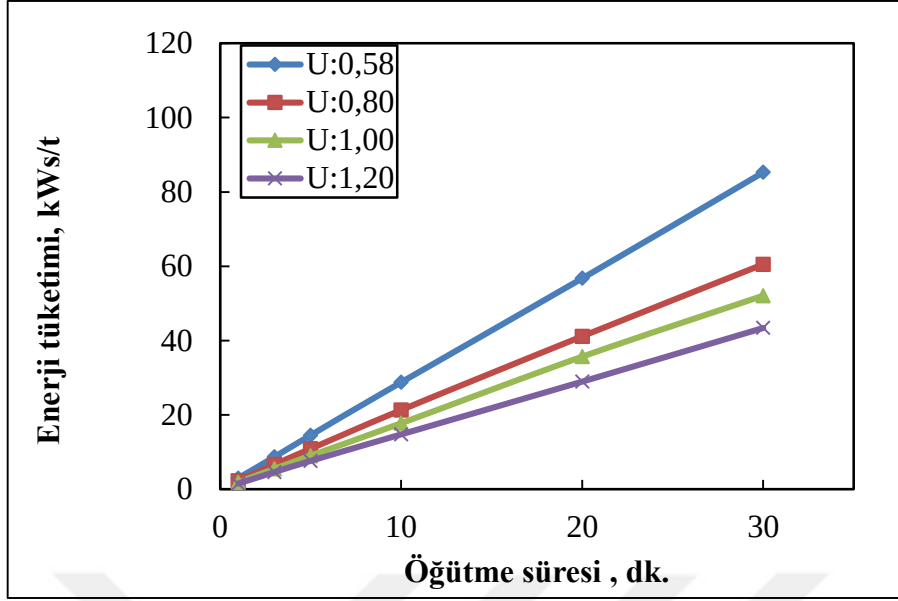
Deney koşulları	Enerji T. (kWs/t)	Yüzey A. (cm ² /g)	Kapasite (kg/saat)
Kuru öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,72, U: 0,58, bilya: 5 mm alumina ve 1003 g, örnek: 162 g.	85,281	8470	0,324
Kuru öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,72, U: 1,00, bilya: 5 mm alumina ve 1003 g, örnek: 279 g.	52,091	4759	0,558



Şekil 4.7. Farklı boşluk doldurma oranlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58-1,2, bilya: 1003 g 5 mm alumina, örnek: 162-335 g, kapasite: 0,324-20,070 kg/saat)



Şekil 4.8. Farklı boşluk doldurma oranlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58-1,2, bilya: 1003 g 5 mm alumina, örnek: 162-335 g, kapasite: 0,324-20,070 kg/saat)



Şekil 4.9. Farklı boşluk doldurma oranlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58-1,2, bilya: 1003 g 5 mm alumina, örnek: 162-335 g, kapasite: 0,324-20,070 kg/saat)

4.1.4. Bilya boyutu ve cinsinin yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi

Aktarmalı değirmenlerde ortam boyutu oldukça iri olduğundan, ortama öğütme etkisini sağlayacak kinetik enerjiyi kazandırmak kolaydır. Atritör değirmenlerde ise bilya boyutu oldukça küçük olduğundan, bilyalara öğütme etkisini sağlayacak kinetik enerjiyi kazandırmak için karıştırma hızının yüksek olması gerekir. Yüksek karıştırma hızı bir taraftan bilyaların kinetik enerjisini artırarak daha yüksek çarpışma hızlarına, diğer taraftan da bilyaların çarpışma sayısının artmasına neden olur. Ayrıca, yüksek hızlarda radyal yönde hız gradyentlerinin varlığı kesme (makaslama) olaylarına neden olacaktır (Pilevneli, 2003).

Kullanılan öğütücü ortam boyutu atritör değirmenlerde en önemli faktördür. Ortam boyutu beslemedeki en iri taneyi kırabilecek kadar büyük olmalıdır. Atritör değirmenlerde ortam boyutunun, besleme d_{80} boyutunun 20-30 katı olması tavsiye edilmektedir. Belli bir tane boyutundan küçük bilya kullanıldığında ise beslemedeki iri taneler öğütülememektedir. Bilya boyutu ile tane boyutu arasındaki optimum oranın 7:1 ile 20:1 arasında olması gerektiği de ileri sürülmektedir. İri bilya kullanılması durumunda düşük karıştırma hızının, ince bilya kullanılması durumunda ise yüksek karıştırma hızının öğütme üzerinde daha etkili olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, ortam boyutu 1 mm'den 4 mm'ye arttığında, tüketilen enerji miktarının da 6 kat arttığı ileri sürülmektedir (Celep vd., 2008).

Bilya boyutu arttıkça, aynı enerji tüketiminde, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artar. Kırılma hızı artan bilya boyutuyla artar fakat artan bilya boyutuyla enerji tüketimi de artacağından, kırılma hızındaki artıştan kaynaklanan yarar dengelenmiş olur. Bilya boyutu azalırsa enerji tüketimi de azalır. Ancak, bu durumda ürün yüzey alanı da azalacak ve aynı yüzey alanını elde etmek için öğütme süresinde artış gerekecektir. Karıştırma hızının çok yüksek (11,4 m/s) olduğu durumlarda bile aynı enerji tüketiminde ince bilyalar irilere oranla daha küçük yüzey alanlı ürünler verebilir. Bu, hafif ve küçük bilyalar için belirtilen hızdaki çarpma şiddetinin yetersiz olduğunu gösterir (Pilevneli, 2003).

Literatürdeki çalışmalar cam, çelik, alüminyum, zirkon-silis ve seramik bilyalar ile yapılmıştır. Bazen iri cevher taneleri de öğütme ortamı olarak kullanılmıştır. Genellikle bilyanın yoğunluğu arttıkça, kırılma hızı da artmaktadır. Daha yoğun bilya, daha kısa sürede öğütme yapmaktadır. Aynı özgül enerji tüketiminde bilya yoğunluğundaki farklılık, ürün yüzey alanı üzerinde de farklılığa neden olmaktadır (Pilevneli, 2003).

Düşük karıştırma hızı ve iri malzeme kullanıldığında bilyaların yoğunluğu azaldıkça (cam, otojen malzeme vb.), yüksek yoğunluklu bilyalara (çelik, demir vb.) oranla öğütme etkinliği azalmaktadır. Atritör değirmenlerde kullanılacak ortamın seçimi aşınmaya, performansa, maliyete ve elde edilebilirliğe de bağlıdır. Kullanılacak ortam ucuz ve aşınarak malzemeyi kirletmeyecek özelliğe sahip olmalıdır. Örneğin çelik bilya kullanıldığında öğütmeden sonra oluşacak olan demir hidroksitlerin flotasyon seçimliliğini etkilememesi istenmektedir (Celep vd., 2008).

Bilya boyutu ve cinsinin (alumina, cam ve çelik) kuru öğütmede öğütme verimi üzerine etkisini incelemek amacıyla J: 0,72 bilya doluluk oranında ve U: 0,58 boşluk doldurma oranında bir grup deney gerçekleştirilmiş ve sonuçlar:

- Alumina bilya için öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.10'da, enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.11'de ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.12'de verilmiştir.
- Cam bilya için öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.13'te, enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.14'de ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.15'de verilmiştir.
- Çelik bilya için öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.16'da, enerji tüketimi-

yüzey alanı olarak Şekil 4.17’de ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.18’de verilmiştir.

Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Şekil 4.10, 4.13 ve 4.16’da görüldüğü gibi, tüm bilya boyutları ve cinslerinde öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmek için iri bilya kullanıldığında, tüm bilya cinslerinde daha kısa öğütme süresine gereksinim vardır. Aynı öğütme sürelerinde iri bilya kullanımı tüm bilya cinslerinde en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir. Bunun nedeni, iri boyutlu bilyaların çarpma, ezme ve makaslama kuvvetlerinin daha yüksek olmasıdır.
- 5 ve 3 mm alümina bilya ve 5 ve 3,15 mm cam bilya kullanımında öğütme süresi arttıkça, yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusala yakındır (Şekil 4.10 ve 4.13). Bu durum, zamanla öğütmenin ve laminasyonun devam ettiğinin bir göstergesidir. Ancak, 4,76 mm ve 3,17 mm çelik bilya kullanımında zamanla yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusal değildir (Şekil 4.16). Bu durum, zamanla öğütmenin ve laminasyonun yavaşladığının bir göstergesidir.
- Şekil 4.11, 4.14 ve 4.17’de görüldüğü gibi, tüm bilya boyutları ve cinslerinde enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları da artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede iri bilyalar kullanıldığında daha az enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Aynı enerji tüketimlerinde iri bilyalar tüm bilya cinslerinde daha yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir. Bunun nedeni, iri boyutlu bilyaların çarpma, ezme ve makaslama kuvvetlerinin daha yüksek olmasıdır. Tüzün (1993), değirmen hızı ve ortam boyutu arasında karşılıklı bir etkileşimin olduğunu ve yüksek kesme hızlarında daha ince bilyalar kullanılabileceği halde, büyük bilyaların düşük devirlerde öğütme performansı üzerinde daha etkili olduğunu öne sürmüştür. Jankovic (2003), daha küçük boyutlu ortamların öğütme verimliliğini artırmak için daha yüksek karıştırma hızlarına ihtiyaç duyulduğu sonucuna varmıştır. Deneylerde kullanılan atritör değirmenin düşük hızlı bir değirmen olduğundan dolayı çalışılan hızlarda kullanılan iri bilyalar ince boyutlu bilyalara göre daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Şekil 4.12, 4.15 ve 4.18’de görüldüğü gibi, tüm bilya boyutları ve cinslerinde öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde bilya

boyutu arttıkça, tüm bilya cinslerinde özgül enerji tüketimi artmaktadır. Bunun nedeni, iri boyutlu bilyaların karıştırılmasının daha güç olmasıdır.

- Bu grup deneylerden 30 dakika öğütme süresi sonunda yüzey alanı açısından elde edilen en verimli sonuçlar Çizelge 4.4’de verilmektedir. Çizelge 4.4, bilya boyutu açısından incelendiğinde, tüm bilya cinslerinde iri bilya kullanımının enerji tüketimlerini ve ürün yüzey alanlarını arttırdığı görülmektedir.
- Tüm bilya cinslerinde iri ve ince bilya kullanımı kendi içinde enerji ve yüzey alanı açısından karşılaştırıldığında, iri bilya kullanımı (Çizelge 4.4):
 - Alümina bilyada enerji tüketimini %11,7 arttırmakta, buna karşılık ürün yüzey alanını %24,4 arttırmaktadır.
 - Cam bilyada enerji tüketimini %4,6 arttırmakta, buna karşılık ürün yüzey alanını %6,3 arttırmaktadır.
 - Çelik bilyada enerji tüketimini %10,9 arttırmakta, buna karşılık ürün yüzey alanını %8,4 arttırmaktadır.

Tüm bilya cinslerinde iri bilya kullanımı yüzey alanı açısından olumlu, fakat enerji tüketimi açısından olumsuzdur.

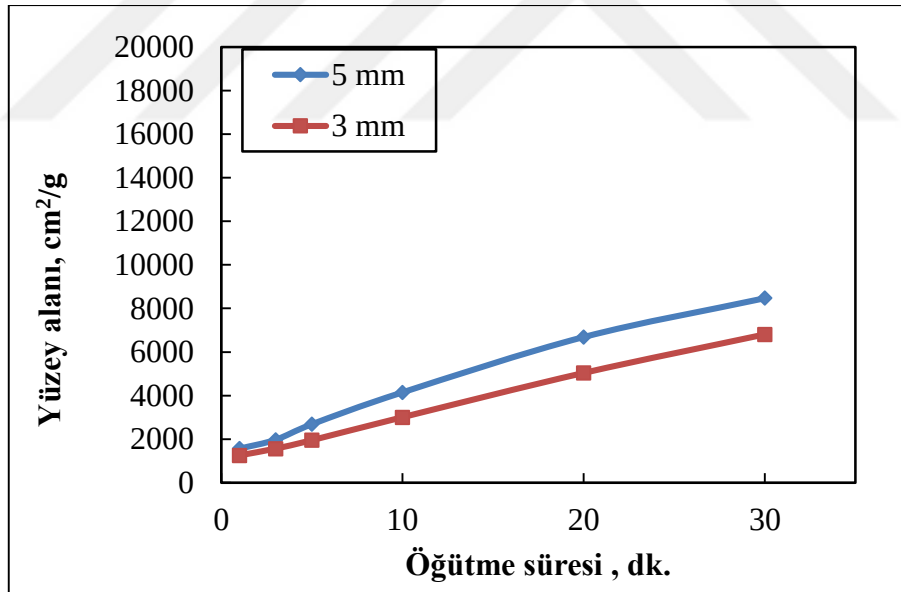
Çizelge 4.4. Bilya boyutu ve cinsi deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar

Deney koşulları	Enerji T. (kWs/t)	Yüzey A. (cm ² /g)	Kapasite (kg/saat)
Bilya: 5 mm alumina ve 1003 g	85,281	8470	0,324
Bilya: 3 mm alumina ve 1003 g	76,343	6808	0,324
Bilya: 5 mm cam ve 643 g	73,322	5977	0,324
Bilya: 3,15 mm cam ve 643 g	70,084	5624	0,324
Bilya: 4.76 mm çelik ve 1980 g	104,538	10019	0,324
Bilya: 3,17 mm çelik ve 1980 g	94,304	9246	0,324

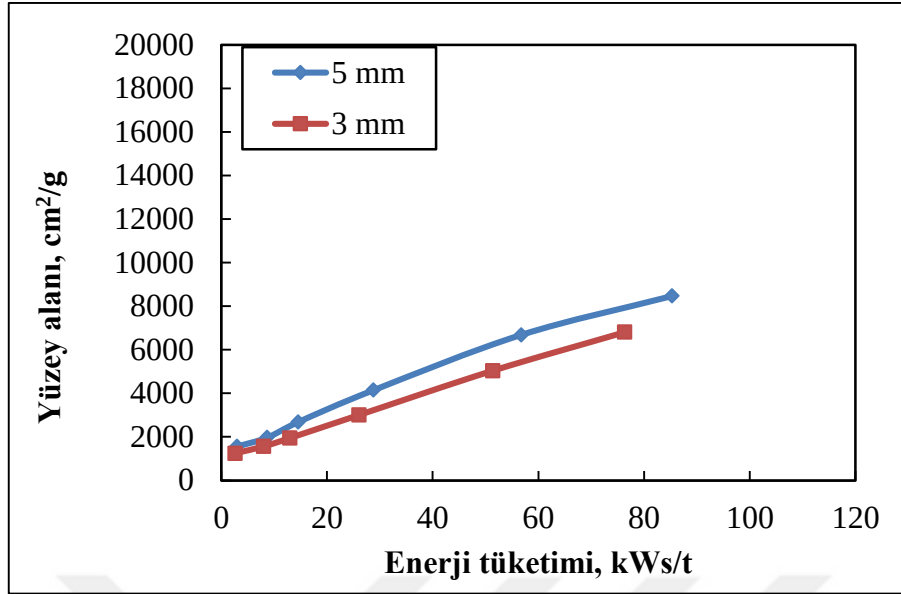
- Çizelge 4.4, bilya cinsi açısından değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlara varmak mümkündür:

- İri cam bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı diğer iri bilya kullanımlarına göre bir miktar düşüktür, fakat bu cins bilya ile elde edilen ürünün yüzey alanı diğer bilya cinslerine göre oldukça düşüktür. İnce cam bilya kullanımında da durum benzerdir.
- İri çelik bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı diğer iri bilya kullanımlarına göre bir miktar fazla olmasına rağmen; bu cins bilya ile en yüksek yüzey alanlı ürün elde edilmektedir. İri çelik bilya deneylerinde gözlemlenen bir diğer sonuç da öğütülmüş ürünün renginin beyazdan bir miktar uzaklaşmasıdır. İnce çelik bilya kullanımında da durum aynıdır.

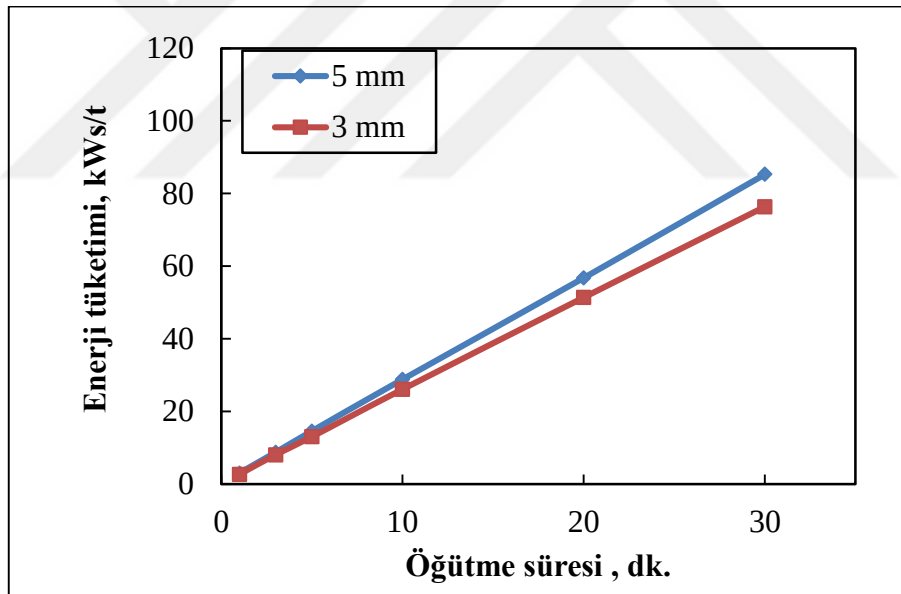
Çelik bilya kullanımı yüzey alanı açısından olumlu, ürün rengi açısından olumsuzdur.



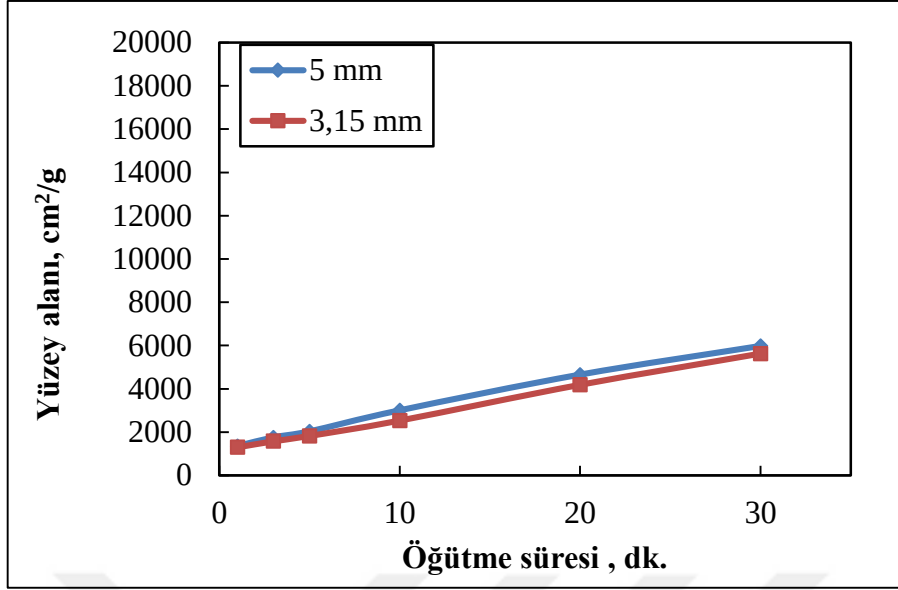
Şekil 4.10. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58, bilya: 1003 g 5 mm ve 3 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



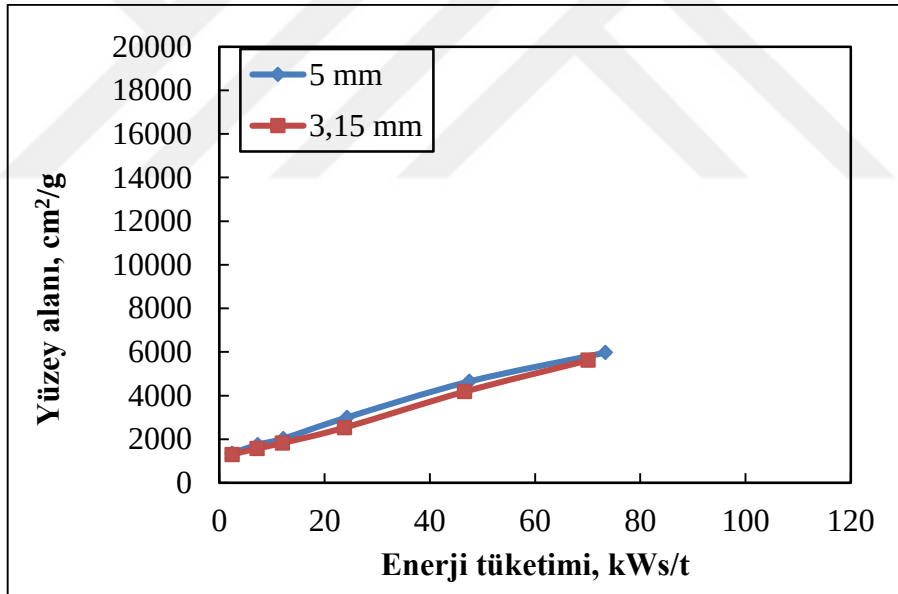
Şekil 4.11. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58, bilya: 1003 g 5 mm ve 3 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



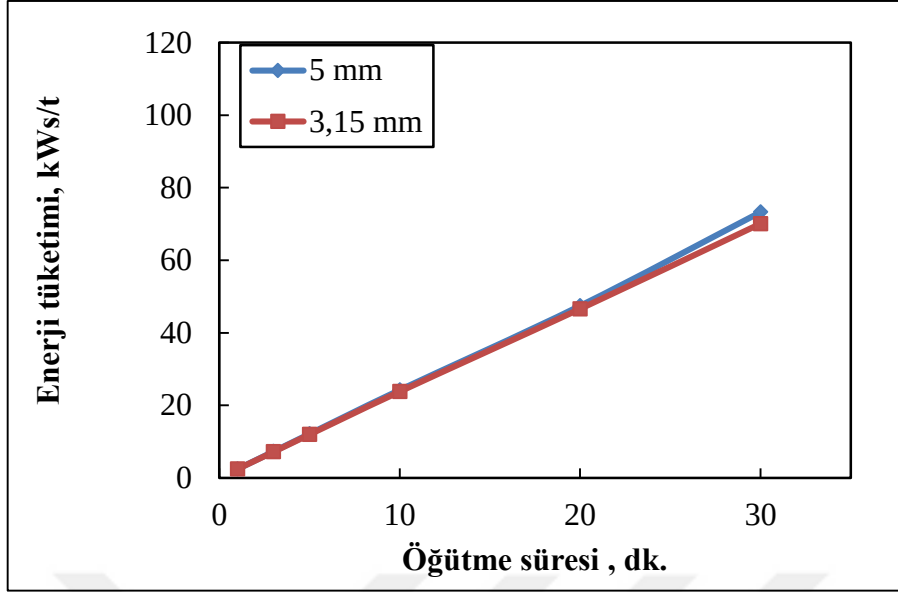
Şekil 4.12. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58, bilya: 1003 g 5 mm ve 3 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



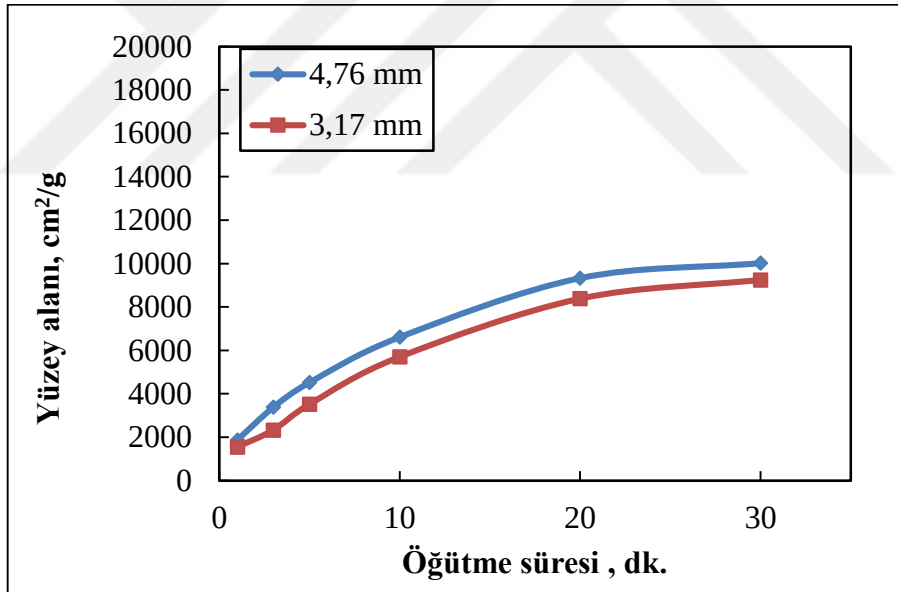
Şekil 4.13. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58, bilya: 643 g 5 mm ve 3,15 mm cam, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



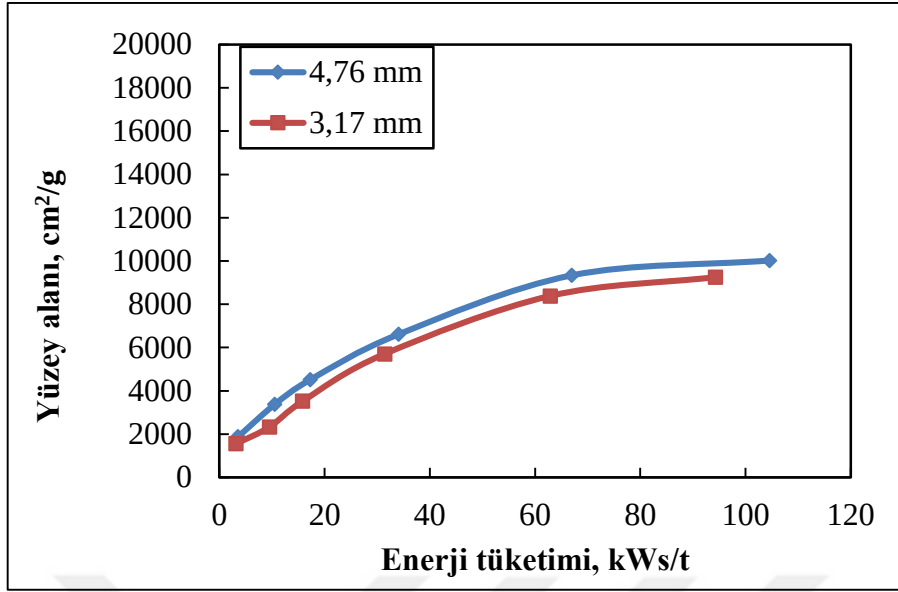
Şekil 4.14. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58, bilya: 643 g 5 mm ve 3,15 mm cam, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



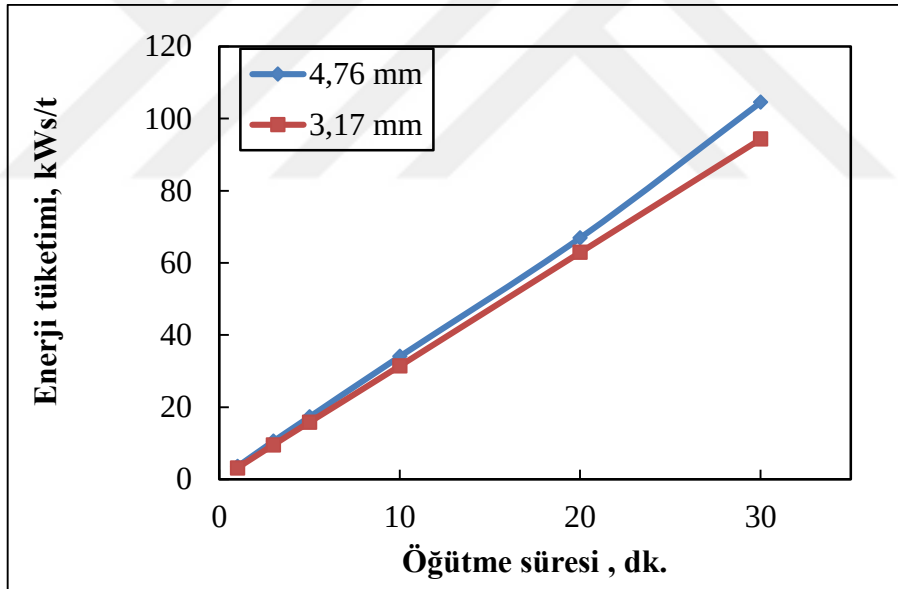
Şekil 4.15. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58, bilya: 643 g 5 mm ve 3,15 mm cam, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.16. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58, bilya: 1980 g 4,76 mm ve 3,17 mm çelik, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.17. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58, bilya: 1980 g 4,76 mm ve 3,17 mm çelik, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.18. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (kuru öğütme, 600 d/d, J: 0,72, U: 0,58, bilya: 1980 g 4,76 mm ve 3,17 mm çelik, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)

4.1.5. Kuru öğütme sonuçları

Kuru öğütme ile 30 dakika öğütme süresinde (85,281 kWs/t enerji tüketiminde) yüzey alanı 8470 cm²/g olan bir ürün 0,324 kg/s kapasite ile elde edilmiştir. Ayrıca, kuru öğütmede işlem değişkenlerinin gözlemlenen etkileri aşağıda verilmiştir.

Karıştırma hızı deneyleri:

- Aynı öğütme süresinde karıştırma hızı arttıkça, enerji tüketimleri artmaktadır.
- Aynı enerji tüketiminde karıştırma hızı arttıkça, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır.

Bilya oranı deneyleri:

- Aynı öğütme süresinde bilya oranı arttıkça, enerji tüketimleri artmaktadır.
- Aynı enerji tüketiminde bilya oranı arttıkça, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır.

Boşluk doldurma oranı deneyleri:

- Aynı öğütme süresinde boşluk doldurma oranı azaldıkça, enerji tüketimleri artmaktadır.
- Aynı enerji tüketiminde boşluk doldurma oranı azaldıkça, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır.

Bilya boyutu ve cinsi deneyleri:

Bilya boyutu:

- Aynı öğütme süresinde tüm bilya cinslerinde (alumina, cam ve çelik) bilya boyutu arttıkça, özgül enerji tüketimi artmaktadır.
- Aynı enerji tüketiminde tüm bilya cinslerinde bilya boyutu arttıkça, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır.

Bilya cinsi:

- Cam bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı alümina ve çelik bilya kullanımlarına göre bir miktar düşüktür, fakat bu cins bilya ile elde edilen ürünün yüzey alanı diğer bilya cinslerine göre oldukça küçüktür.
- Çelik bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı alümina ve cam bilya kullanımlarına göre bir miktar fazladır. Fakat bu cins bilya ile en yüksek yüzey alanlı ürünler elde edilmektedir.
- Yüzey alanı açısından en verimli sonuçlar çelik bilya kullanımı ile elde edilmektedir. Fakat çelik bilya kullanımı, elde edilen ürünün rengini değiştirmektedir.

4.2. Yaş Öğütme Deneyleri

Kuru öğütmede öğütme süresi arttıkça öğünen malzemenin bir kısmı değirmen içinde aglomere olmakta, bir kısmı da bilyaların yüzeylerine ve tank cidarına yapışmaktadır. Bu olaylar kuru öğütmenin verimini önemli ölçüde düşürmektedir. Öğütme verimini arttırmak amacıyla yaş öğütme deneyleri yapılmış ve yaş öğütmede çeşitli işlem parametrelerinin öğütme verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Bu parametreler ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.2.1. Karıştırma hızının yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi

Karıştırma hızının yaş öğütmede etkisini belirlemek amacıyla 5 mm alumina bilya kullanılarak farklı hızlarda deneyler yapılmıştır. Sonuçlar, öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.19’da; enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.20’de ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.21’de verilmiştir. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Şekil 4.19’da görüldüğü gibi, tüm karıştırma hızlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek karıştırma hızlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim duyulmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde 600 d/d karıştırma hızı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir.
- Tüm karıştırma hızlarında yüzey alanı değerleri 20 dakikaya kadar doğrusal daha sonra doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır (300 d/d hariç) (Şekil 4.19). Bu durum, yüzey alanındaki artışın yirminci dakikaya kadar hızlı bir şekilde olduğunun daha sonra yavaşladığının bir göstergesidir. Yirminci dakikadan sonra yüzey alanındaki artışın yavaş olmasının nedeni, ince malzeme miktarının artmasıyla birlikte pulp vizkozitesinin artması ve buna bağlı olarakta öğütmenin ve laminasyonun yavaşlamasından kaynaklanmış olabilir.
- Şekil 4.20’de görüldüğü gibi, tüm karıştırma hızlarında enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları da artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek karıştırma hızlarında daha az enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Aynı enerji tüketimlerinde 600 d/d karıştırma hızı en yüksek yüzey alanı değerlerini

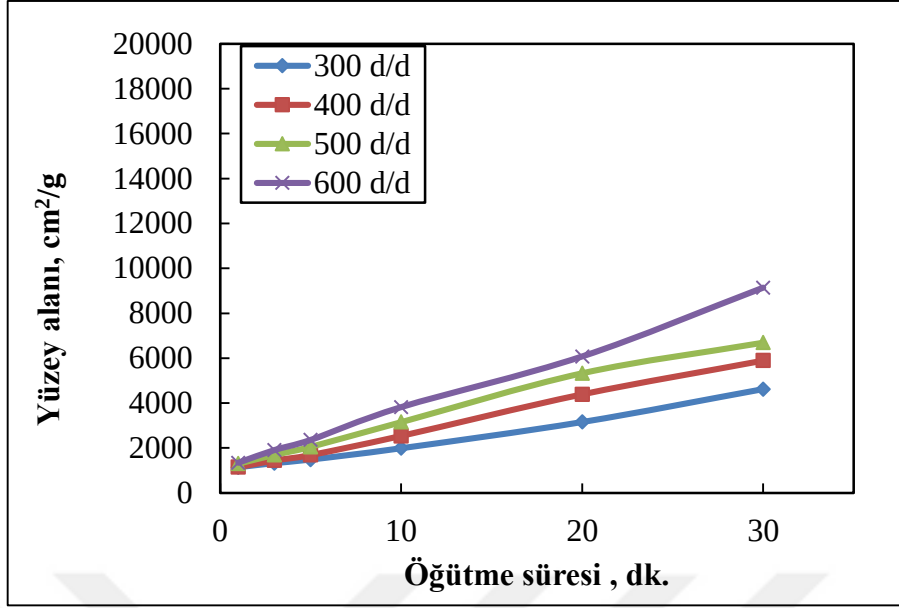
vermektedir. Bu durum, karıştırma hızı arttıkça bilyaların kinetik enerjilerinin artmasından kaynaklanmaktadır.

- Şekil 4.21’de görüleceği gibi, tüm karıştırma hızlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde karıştırma hızı arttıkça, enerji tüketimi de artmaktadır. 600 d/d, 500 d/d ve 400 d/d karıştırma hızlarında tüketilen enerji değerleri birbirine yakın hesaplanmıştır. Buna neden olarak, bilyaların çok hızlı bir şekilde dönmesi sonucu şafta fazla yük binmemesi gösterilebilir.
- Şekil 4.20’de enerji tüketimi-yüzey alanı grafiği incelendiğinde, aynı enerji tüketimlerinde 600 d/d karıştırma hızında en yüksek yüzey alanlı ürünler elde edilmektedir. Bu nedenle bundan sonraki deneyler bu karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir.
- Bu grup deneylerden yüzey alanı açısından elde edilen en verimli sonuçlar, aynı koşullarda kuru öğütmeden elde edilen sonuçlarla birlikte Çizelge 4.5’de verilmiştir. Çizelge 4.5’de görüldüğü gibi, aynı kapasitede yaş öğütmede:
 - enerji tüketimi %16,9 azalmakta ve
 - ürün yüzey alanı %21,9 artmaktadır.

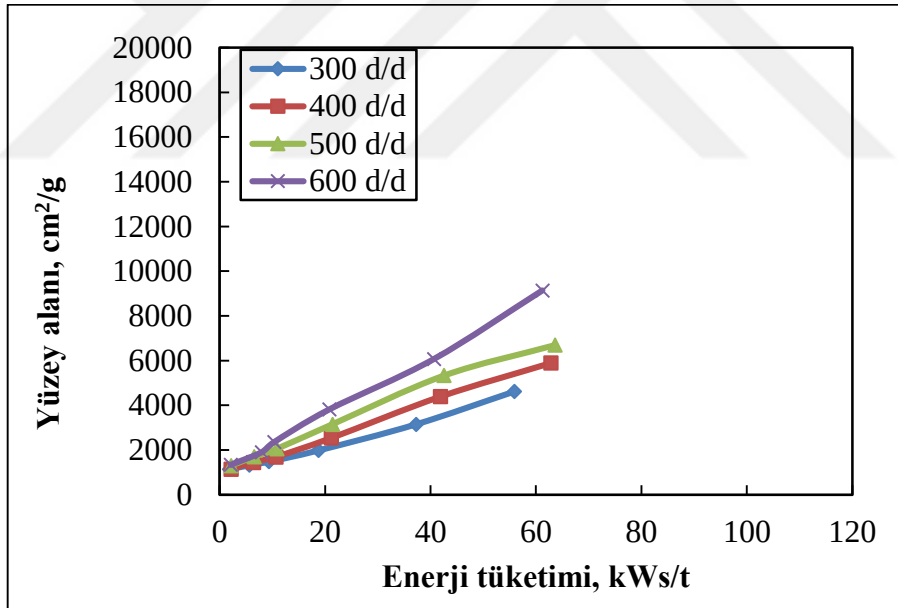
Aynı karıştırma hızında yaş öğütme ile, daha az enerji tüketilerek daha yüksek yüzey alanlı ürünler elde edilmektedir.

Çizelge 4.5. Karıştırma hızı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar ve bu sonuçların kuru öğütme sonuçları ile karşılaştırılması

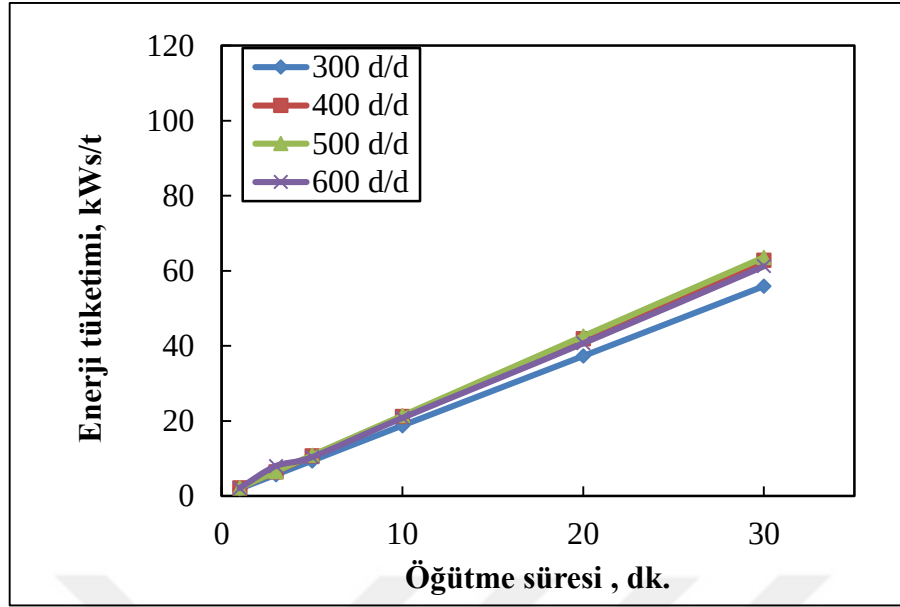
Deney koşulları	Enerji (kWs/t)	Yüzey A. (cm ² /g)	Kapasite (kg/saat)
Yaş öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,52, K: 0,45, bilya: 5 mm alumina ve 726 g	61,230	7567	0,324
Kuru öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,52, U: 0,80, bilya: 5 mm alumina ve 726 g	73,683	6207	0,324



Şekil 4.19. Farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, J: 0,52, K: 0,45, bilya: 726 g 5 mm alumina, örnek: 132 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.20. Farklı karıştırma hızlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, J: 0,52, K: 0,45, bilya: 726 g 5 mm alumina, örnek: 132 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.21. Farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (yaş öğütme, J: 0,52, K: 0,45, bilya: 726 g 5 mm alumina, örnek: 132 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)

4.2.2. Bilya doluluk oranının yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi

Hamey (2005)'e göre; atritör değirmenlerde öğütmede en önemli parametrelerden birisi, bilya miktarıdır. Bilya miktarı öğütmeyi birkaç şekilde etkileyebilir. Bunlar:

1. Bilya miktarı arttıkça bilya-tane temas sayısı artacaktır, bunun sonucunda öğütme hızı artacaktır. Ancak, bilya miktarı arttıkça ortamın viskozitesi yükseleceğinden değirmeni çalıştırmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacaktır. Bu yüzden öğütme hızı ile enerji tüketimi arasında bir denge kurulmalıdır.
2. Bilya miktarı arttıkça, bilya ve değirmen aşınması ve öğütülen cevherin kirlenmesi artmaktadır. Bu nedenle bilya miktarı belirlenirken bu hususlar da dikkate alınmalıdır.
3. Bilya miktarı değirmen içindeki bilyaların hareket tarzını ve dolayısıyla öğütmenin mekanizmasını belirler. Bilya miktarı belirlenirken bu hususun da göz önünde bulundurulmasında yarar vardır.

Bilya miktarı, her değirmenin kendine özgü çalışma koşullarına göre belirlenmelidir ve bilya miktarı belirlenirken değirmenin karıştırma hızı, bilyanın boyutu ve yoğunluğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Bilya miktarının yaş öğütmede olan etkisini incelemek amacıyla 600 d/d'da %45 katı oranında ve 5 mm alumina bilya kullanılarak farklı bilya oranlarında (J: 0,42-0,82) deneyler yapılmıştır. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar, öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.22'de; enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.23'te ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.24'de verilmiştir. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Şekil 4.22'de görüldüğü gibi, tüm bilya oranlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmek için yüksek bilya oranlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim duyulmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde J: 0,82 bilya oranı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir. Bunun nedeni J: 0,82 bilya oranında bilya sayısının artması ve bunun sonucunda bilya-tane temas sayısının artmasıdır.
- J: 0,42 ve 0,52 bilya oranlarında yüzey alanı değerleri zamanla doğrusal olarak artmaktadır (Şekil 4.22). Bu durum, adı geçen bilya oranlarında öğütmenin ve laminasyonun zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. J: 0,62; 0,72 ve 0,82 bilya oranlarında ise yüzey alanı değerleri 10 dakikaya kadar doğrusal sonrasında doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır (Şekil 4.22). Bu durum yüzey alanındaki artışın 10 dakika öğütme süresinden sonra yavaşlamaya başladığının bir göstergesidir. 10 dakika öğütme süresinden sonra yüzey alanındaki artışın yavaşlama nedeni, mikanın öğütülmesinin ve laminasyonunun azalmasından kaynaklanmış olabilir.
- Şekil 4.23'te görüldüğü gibi, tüm bilya oranlarında enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek bilya oranlarında daha az enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Aynı enerji tüketimlerinde J: 0,82 bilya oranı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir. Bu durum, bilya oranı arttıkça bilya-tane temas sayısının artmasından kaynaklanmaktadır.
- Şekil 4.24'de görüleceği gibi, tüm bilya oranlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde bilya oranı arttıkça, enerji tüketimi de artmaktadır. Bunun nedeni döndürülecek bilya sayısının artmasıdır.
- Şekil 4.23'te enerji tüketimi-yüzey alanı grafiği incelendiğinde, J: 0,82 bilya oranının J: 0,72 bilya oranından daha yüksek yüzey alanlı ürünler verdiği

görülmektedir. Ancak, J: 0,82 bilya oranında malzeme ve bilyaların değirmenden taşma eğilimi gözlenmiştir. Bu nedenden dolayı kuru öğütmede olduğu gibi yaş öğütmede de J: 0,72 bilya doluluk oranı en uygun bilya doluluk oranı olarak belirlenmiş ve bundan sonraki deneyler bu oranda yapılmıştır.

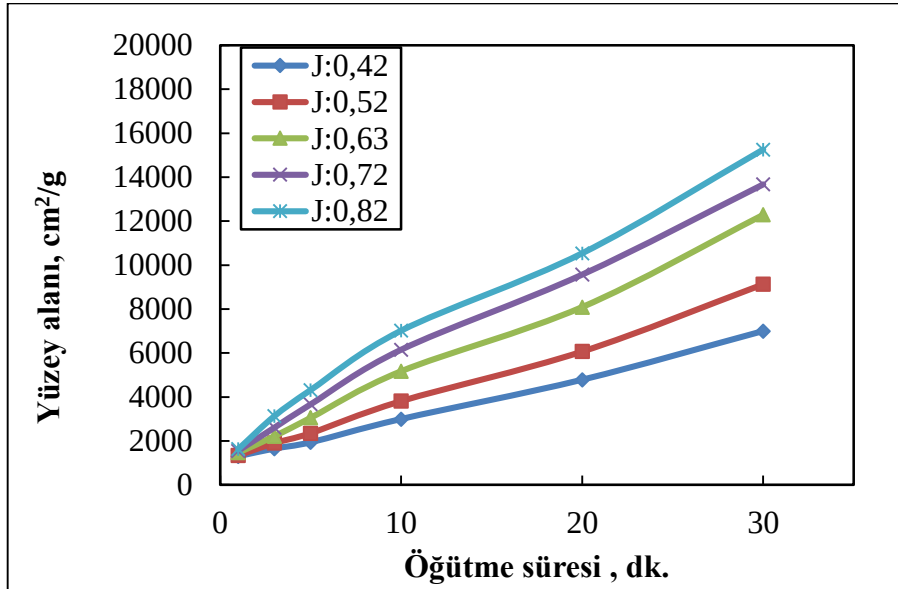
- Bu grup deneylerden yüzey alanı açısından elde edilen en verimli sonuçlar, aynı koşullarda kuru öğütmeden elde edilen sonuçlarla birlikte Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi, aynı kapasitede yaş öğütmede:

- enerji tüketimi %17,4 azalmakta ve
- ürün yüzey alanı %61,5 artmaktadır.

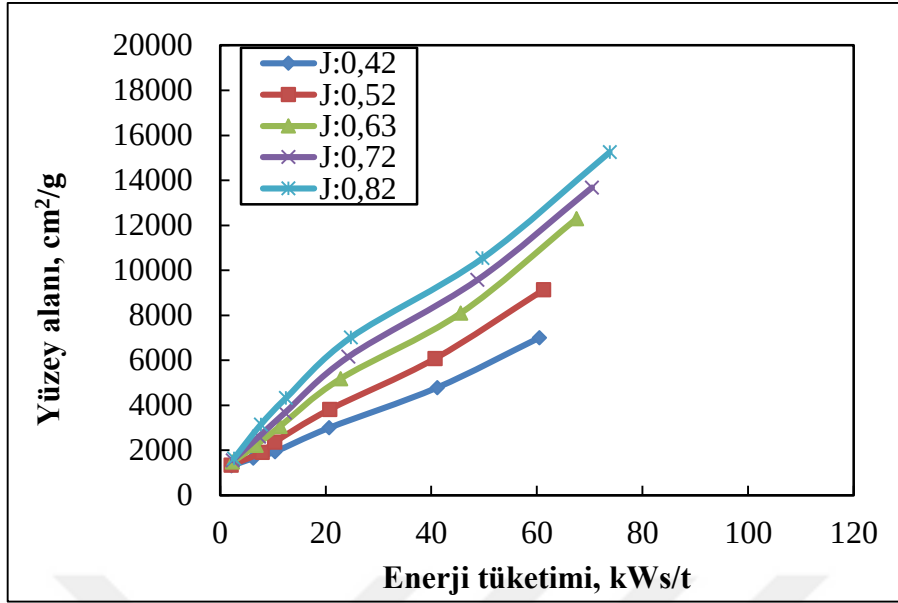
Aynı bilya oranında yaş öğütme ile, daha yüksek yüzey alanlı bir ürün daha az enerji tüketilerek elde edilmiştir.

Çizelge 4.6. Bilya oranı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar ve bu sonuçların kuru öğütme sonuçları ile karşılaştırılması

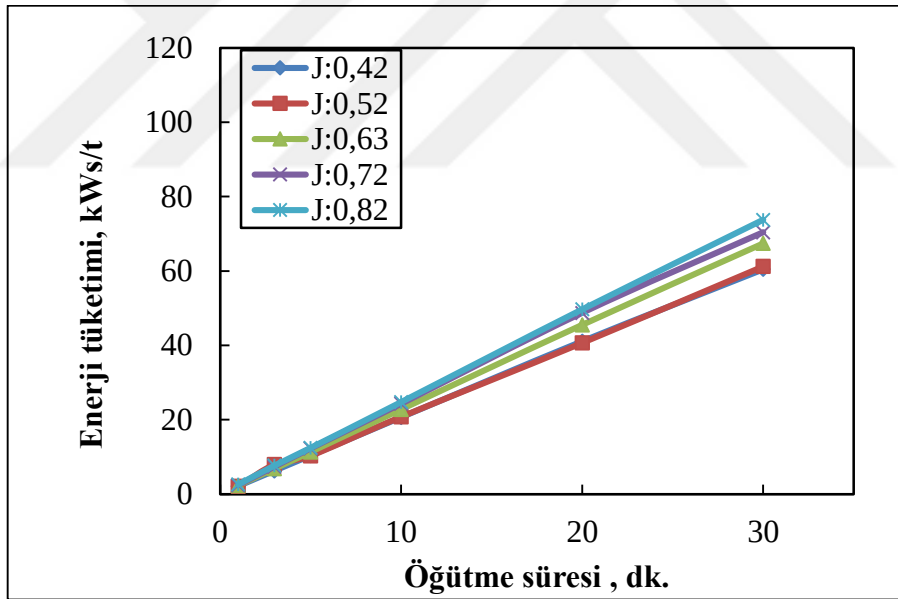
Deney koşulları	Enerji (kWs/t)	Yüzey A. (cm ² /g)	Kapasite (kg/saat)
Yaş öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,72, K: 0,45, bilya: 5 mm alumina ve 1003 g	70,409	13677	0,324
Kuru öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,72, U: 0,58, bilya: 5 mm alumina ve 1003 g	85,281	8470	0,324



Şekil 4.22. Farklı bilya oranlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,42-0,82, K: 0,45, bilya: 581-1142 g 5 mm alumina, örnek: 132 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.23. Farklı bilya oranlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,42-0,82, K: 0,45, bilya: 581-1142 g 5 mm alumina, örnek: 132 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.24. Farklı bilya oranlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,42-0,82, K: 0,45, bilya: 581-1142 g 5 mm alumina, örnek: 132 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)

4.2.3. Katı oranının yüzey alanı, enerji tüketimi ve kapasite üzerine etkisi

Literatürde değirmene beslenen malzeme miktarı yaş öğütmede katı oranı veya pülöp yoğunluğu cinsinden verilmektedir. Değirmendeki katı oranı özgül enerji tüketimini ve ürün tane boyutunu etkilediği gibi, öğütücü ortam tüketimini de etkilemektedir. Katı oranı arttıkça

enerji ve ortam tüketimi azalırken ürün tane boyutu artmaktadır. Enerji ve ortam tüketimindeki bu azalma öğütme veriminin en yüksek olduğu katı oranına kadar olumlu, onu geçtiğinde olumsuzdur (Fidan ve Arol, 1990).

Katı oranının yaş öğütmede olan etkisini incelemek amacıyla 600 d/d'da ve J: 0,72'de 5 mm alumina bilya kullanılarak farklı katı oranlarında (K: 0,35-0,65) bir grup deney gerçekleştirilmiştir. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar, öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.25'de; enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.26'da ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.27'de verilmiştir. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

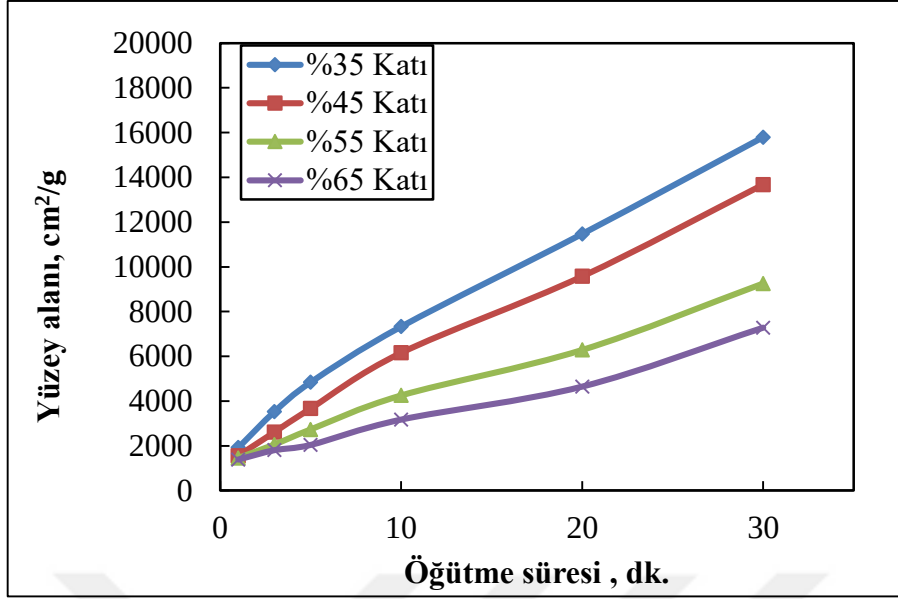
- Şekil 4.25'de görüldüğü gibi, tüm katı oranlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede düşük katı oranlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim vardır. Aynı öğütme sürelerinde 0,35 katı oranı en yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir. Bunun nedeni, 0,35 katı oranında malzeme miktarı az olduğundan, bilya-tane temas sayısının yüksek olmasıdır.
- Şekil 25'de görüldüğü gibi, K: 0,55 ve K: 0,65 katı oranlarında zamanla yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusaldır. Bu durum, öğütme ve laminasyonun zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. Ancak, K: 0,35'de 5. dakikadan sonra; K: 0,45'de 10. dakikadan sonra yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusallıktan uzaklaşmaktadır. Bu durum, öğütme ve laminasyonun zamanla yavaşladığının bir göstergesidir. Yüksek katı oranlarında, öğütme verimi düşüşü pülp viskozitesine bağlı olabilir. Ayrıca, ürün inceliği öğütme süresiyle önemli ölçüde arttığı için, reolojik özellikler de sistemde baskın olma eğilimindedir (Zheng vd., 1997; Bernhardt vd., 1999; Klimpel, 1999)
- Şekil 4.26'da görüldüğü gibi, tüm katı oranlarında enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede düşük katı oranlarında (K: 0,35-0,45) daha az enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Aynı enerji tüketimlerinde düşük katı oranları daha yüksek yüzey alanı değerlerini vermektedir.

- Tüm katı oranlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde katı oranı azaldıkça, enerji tüketimi artmaktadır (Şekil 4.27). Bunun nedeni öğütülen malzeme miktarının azalmasındandır.
- Şekil 4.26'da enerji tüketimi-yüzey alanı grafiği incelendiğinde, 70 kWs/t enerji tüketimine kadar K: 0,35 ve K: 0,45 katı oranlarının yaklaşık aynı yüzey alanlı ürünler verdiği görülmektedir. Aynı enerji tüketiminde K: 0,45 katı oranında kapasite daha yüksek olduğundan, bundan sonraki deneyler K: 0,45 katı oranında yapılmıştır.
- Bu grup deneylerden yüzey alanı açısından elde edilen en verimli sonuçlar, aynı koşullarda kuru öğütmeden elde edilen sonuçlarla birlikte Çizelge 4.7'de verilmiştir. Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi, aynı kapasitede yaş öğütmede:
 - enerji tüketimi %17,4 azalmakta ve
 - ürün yüzey alanı %61,5 artmaktadır.

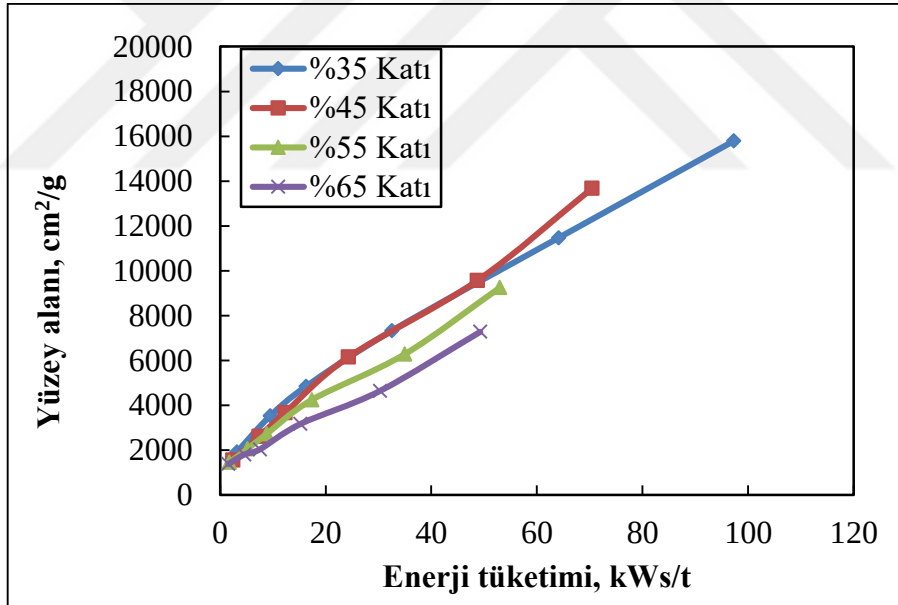
Yaş öğütme ile, daha yüksek yüzey alanlı ürün daha az enerji tüketilerek elde edilmektedir.

Çizelge 4.7. Katı oranı deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar ve bu sonuçların kuru öğütme sonuçları ile karşılaştırılması

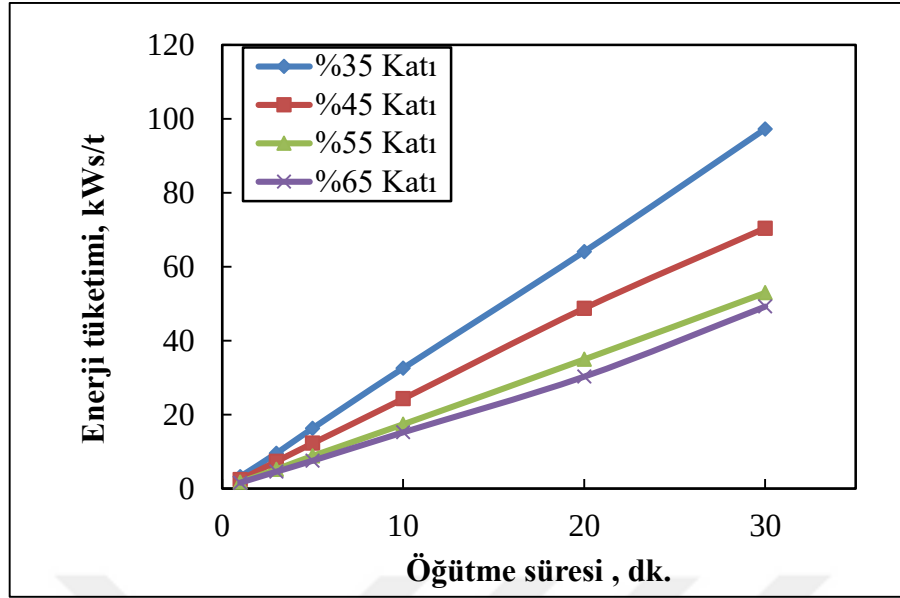
Deney koşulları	Enerji (kWs/t)	Yüzey A. (cm ² /g)	Kapasite (kg/saat)
Yaş öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,72, K: 0,45, bilya: 5 mm alumina ve 1003 g, örnek: 162 g.	70,409	13677	0,324
Kuru öğütme, 600 d/d, süre: 30 dk., J: 0,72, U: 0,58, bilya: 5 mm alumina ve 1003 g, örnek: 162 g.	85,281	8470	0,324



Şekil 4.25. Farklı katı oranlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,35-0,65, bilya: 1003 g 5 mm alumina, örnek: 116-279 g, su: 215-155 ml, kapasite: 0,231-16,740 kg/saat)



Şekil 4.26. Farklı katı oranlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,35-0,65, bilya: 1003 g 5 mm alumina, örnek: 116-279 g, su: 215-155 ml, kapasite: 0,231-16,740 kg/saat)



Şekil 4.27. Farklı katı oranlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,35-0,65, bilya: 1003 g 5 mm alumina, örnek: 116-279 g, su: 215-155 ml, kapasite: 0,231-16,740 kg/saat)

4.2.4. Bilya boyutu ve cinsinin yüzey alanı ve enerji tüketimi üzerine etkisi

Atritör değirmenlerde öğütme verimini etkileyen en önemli parametrelerden birisi kullanılan bilya boyutudur. Bilya boyutu beslemedeki en iri taneyi kırabilecek kadar büyük olmalıdır. Belli bir tane boyutundan küçük bilya kullanıldığında beslemedeki iri taneler öğütülememektedir. Bilya boyutu ile tane boyutu arasındaki optimum oranın 7:1 ile 20:1 arasında olması gerekmektedir. Bilya boyutu arttıkça tüketilen enerji miktarı da artmaktadır (Celep vd., 2008).

Atritör değirmenlerde öğütme verimini etkileyen en önemli parametrelerden bir diğeri de kullanılan bilya yoğunluğudur. Genellikle bilyanın yoğunluğu arttıkça, kırılma hızı da artmaktadır. Daha yoğun bilya, daha kısa sürede öğütme yapmaktadır. Bilya yoğunluğundaki farklılığın aynı özgül enerji tüketimi için ürün boyutu üzerinde %17 kadar etkisi olabilmektedir (Pilevneli, 2003). Düşük karıştırma hızı ve iri besleme malzemesi kullanıldığı zaman bilyaların yoğunluğu azaldıkça (cam, otojen malzeme vb.), yüksek yoğunluklu bilyalara (çelik, demir vb.) oranla öğütme verimi azalmaktadır. Atritör değirmenlerde kullanılacak ortamın seçimi aşınmaya, performansa, maliyete ve elde edilebilirliğe bağlıdır. Kullanılacak materyal ucuz ve aşınarak ortamı kirletmeyecek özelliğe sahip olmalıdır (Celep vd., 2008).

Bilya boyutu ve cinsinin (alumina, cam ve çelik) yaş öğütmede öğütme verimi üzerine etkisini incelemek amacıyla 600 d/d'da, J: 0,72 bilya doluluk oranında ve 0,45 katı oranında bir grup deney gerçekleştirilmiştir. Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar:

- Alumina bilya için öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.28'de; enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.29'da ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.30'da verilmiştir.
- Cam bilya için öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.31'de; enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.32'de ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.33'te verilmiştir.
- Çelik bilya için öğütme süresi-yüzey alanı olarak Şekil 4.34'te; enerji tüketimi-yüzey alanı olarak Şekil 4.35'te ve öğütme süresi-enerji tüketimi olarak Şekil 4.36'da verilmiştir.

Bu grup deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Şekil 4.28, 4.31 ve 4.34'da görüldüğü gibi, tüm bilya boyutları ve cinslerinde öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede iri bilya kullanıldığında tüm bilya cinslerinde daha kısa öğütme süresine gereksinim vardır. Aynı öğütme sürelerinde iri bilya kullanımı tüm bilya cinslerinde daha yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir.
- Şekil 4.28 ve 4.31'de görüldüğü gibi, iri ve ince alumina ve cam bilya kullanımında zamanla yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusala yakındır. Bu durum, öğütme ve laminasyonun zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. 4,76 mm ve 3,17 mm çelik bilyada ise zamanla yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusal değildir (Şekil 4.34). Bu durum, çelik bilya kullanımında öğütmenin ve laminasyonun zamanla yavaşladığının bir göstergesidir.
- Şekil 4.29, 4.32 ve 4.35'te görüldüğü gibi, tüm bilya boyutları ve cinslerinde enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları doğrusal veya doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Alümina ve cam bilyada belirli bir yüzey alanı elde etmede iri bilyalar kullanıldığında daha az enerjiye gereksinim duyulurken, çelik bilyada bilya boyutunun enerji tüketimi üzerinde etkisi yok gibidir. Alümina ve cam bilya cinslerinde aynı enerji tüketimlerinde iri bilyalar daha yüksek yüzey alanı değerleri verirken, çelik bilyada bilya boyutunun yüzey alanı üzerinde etkisi önemli görünmemektedir.

- Şekil 4.30, 4.33 ve 4.36’da görüldüğü gibi, tüm bilya boyutları ve cinslerinde öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde alümina ve çelik bilya kullanımında bilya boyutu arttıkça özgül enerji tüketimi artar iken, cam bilya kullanımında iri ve ince bilyanın enerji tüketimleri yaklaşık olarak aynı kalmıştır.
- Bu grup deneylerden 30 dakika öğütme süresi sonunda yüzey alanı açısından elde edilen en verimli sonuçlar, aynı koşullarda kuru öğütmeden elde edilen sonuçlarla birlikte Çizelge 4.8’de verilmiştir.

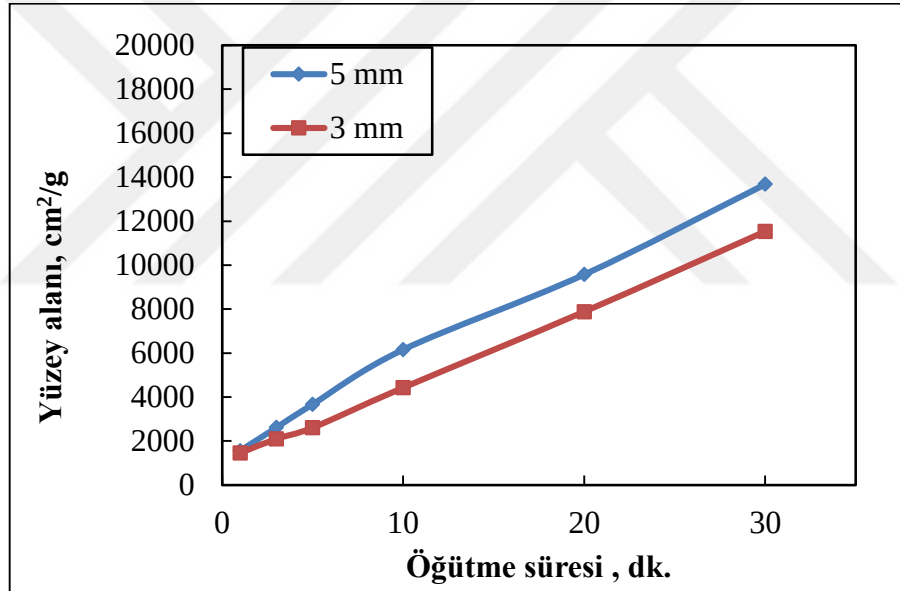
Çizelge 4.8. Bilya boyutu ve cinsi deneylerinden elde edilen en verimli sonuçlar ve bu sonuçların kuru öğütme sonuçları ile karşılaştırılması

Bilya Cinsi	Öğütme Tipi	Bilya Boyutu ve Miktarı	Enerji (kWs/t)	Yüzey A. (cm ² /g)	Kapasite (kg/saat)
Alümina	Yaş	5 mm, 1003 g	70,409	13677	0,324
		3 mm, 1003 g	65,868	11530	0,324
	Kuru	5 mm, 1003 g	85,281	8470	0,324
		3 mm, 1003 g	76,343	6808	0,324
Cam	Yaş	5 mm, 643 g	63,592	8965	0,324
		3,15 mm, 643 g	62,234	6827	0,324
	Kuru	5 mm, 643 g	73,322	5977	0,324
		3,15 mm, 643 g	70,084	5624	0,324
Çelik	Yaş	4,76 mm, 1980 g	86,118	18185	0,324
		3,17 mm, 1980 g	81,912	18676	0,324
	Kuru	4,76 mm, 1980 g	104,538	10019	0,324
		3,17 mm, 1980 g	94,304	9246	0,324

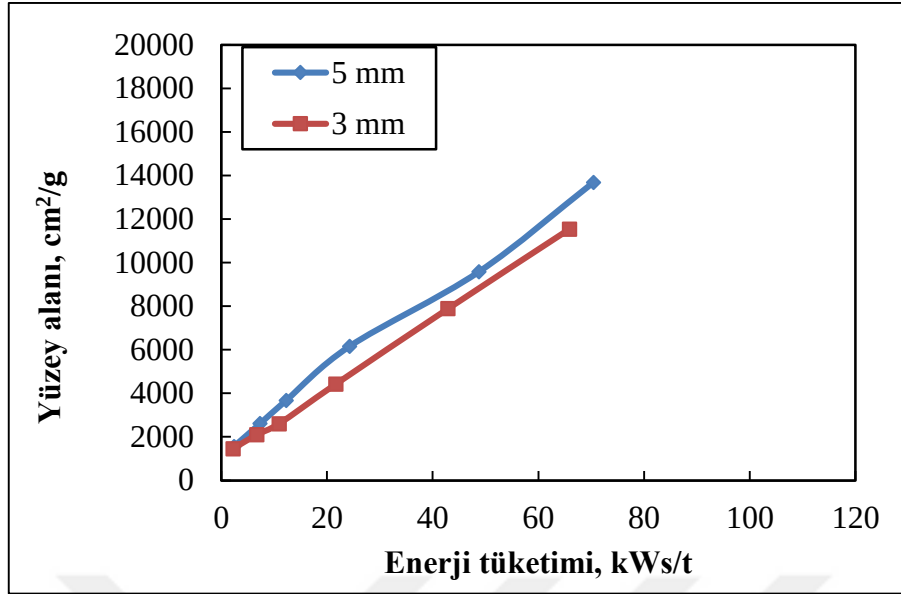
- Çizelge 4.8'in yaş öğütme sonuçları, aynı cins bilyalar için, bilya boyutu açısından enerji ve yüzey alanı göz önüne alınarak karşılaştırıldığında, iri bilya kullanımı aşağıdaki sonuçları vermiştir:
 - Alümina bilyada enerji tüketimini %6,9 arttırmakta, fakat ürün yüzey alanını da %18,6 arttırmaktadır.
 - Cam bilyada enerji tüketimini %2,2 arttırmakta, fakat ürün yüzey alanını da %31,3 arttırmaktadır.
 - Çelik bilyada iri ve ince bilya kullanımı yaklaşık aynı sonuçlar vermiştir.
- Çizelge 4.8'in yaş öğütme sonuçları bilya cinsi açısından enerji ve yüzey alanı göz önüne alınarak karşılaştırıldığında, aşağıdaki sonuçlara varmak mümkündür:
 - İri cam bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı diğer cins iri bilya kullanımlarına göre bir miktar düşüktür, fakat bu cins bilya ile elde edilen ürünün yüzey alanı diğer bilya cinslerine göre oldukça düşüktür. İnce cam bilya kullanımında da benzer eğilim vardır.
 - İri çelik bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı diğer cins iri bilya kullanımlarına göre bir miktar fazla olmasına rağmen; bu cins bilya ile en yüksek yüzey alanlı ürün elde edilmektedir. İri çelik bilya deneylerinde gözlemlenen bir diğer sonuç da, öğütülmüş ürünün renginin beyazdan bir miktar uzaklaşmasıdır. İnce çelik bilya kullanımında da benzer eğilim vardır.
 - Çizelge 4.8'de görüldüğü gibi, yüzey alanı açısından en verimli sonuçları çelik bilya kullanımı vermektedir. Fakat çelik bilya kullanımı elde edilen ürünün rengini gözle görülebilir bir şekilde değiştirmektedir.
- Çizelge 4.8'in sonuçları aynı kapasitede öğütme tipi (yaş ve kuru) açısından enerji ve yüzey alanı göz önüne alınarak karşılaştırıldığında, aşağıdaki sonuçlara varmak mümkündür:
 - Yaş öğütmede 3,15 mm cam bilya kullanılarak 62,234 kWs/t enerji tüketimiyle yüzey alanı 6827 cm²/g olan bir ürün elde edilebilmektedir. Yaklaşık aynı yüzey alanındaki bir ürün (6808 cm²/g) kuru öğütmede 3 mm alümina bilya kullanılarak 76,343 kWs/t enerji tüketimiyle elde edilebilmektedir. Kuru öğütmede tüketilen enerji miktarı yaş öğütmeye göre oldukça yüksektir.
 - Yaş öğütmede 5 mm cam bilya kullanılarak 63,592 kWs/t enerji

tüketimiyle yüzey alanı $8965 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan bir ürün elde edilebilmektedir. Yaklaşık aynı yüzey alanındaki bir ürün ($9246 \text{ cm}^2/\text{g}$) kuru öğütmede 3,17 mm çelik bilya kullanılarak 94.304 kWs/t enerji tüketimiyle elde edilebilmektedir. Kuru öğütmede tüketilen enerji miktarı yaş öğütmeye göre daha fazladır.

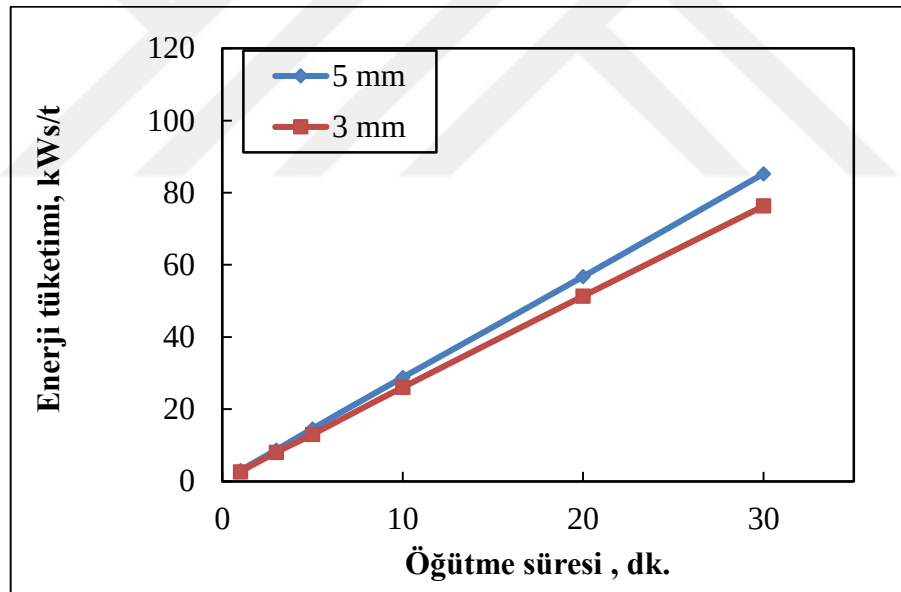
- Yaş öğütmede 5 mm cam bilya kullanılarak 63,592 kWs/t enerji tüketimiyle yüzey alanı $8965 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan bir ürün elde edilebilmektedir. Yaklaşık aynı yüzey alanındaki bir ürün ($8470 \text{ cm}^2/\text{g}$) kuru öğütmede 5 mm alümina bilya kullanılarak 85,281 kWs/t enerji tüketimiyle elde edilebilmektedir. Kuru öğütmede tüketilen enerji miktarı yaş öğütmeye göre daha yüksektir.



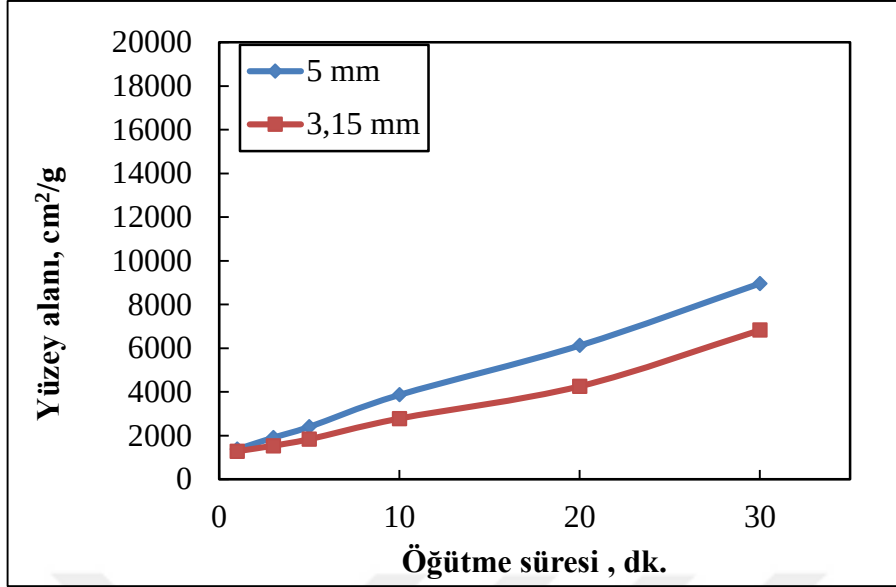
Şekil 4.28. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,45, bilya: 1003 g 5 mm ve 3 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



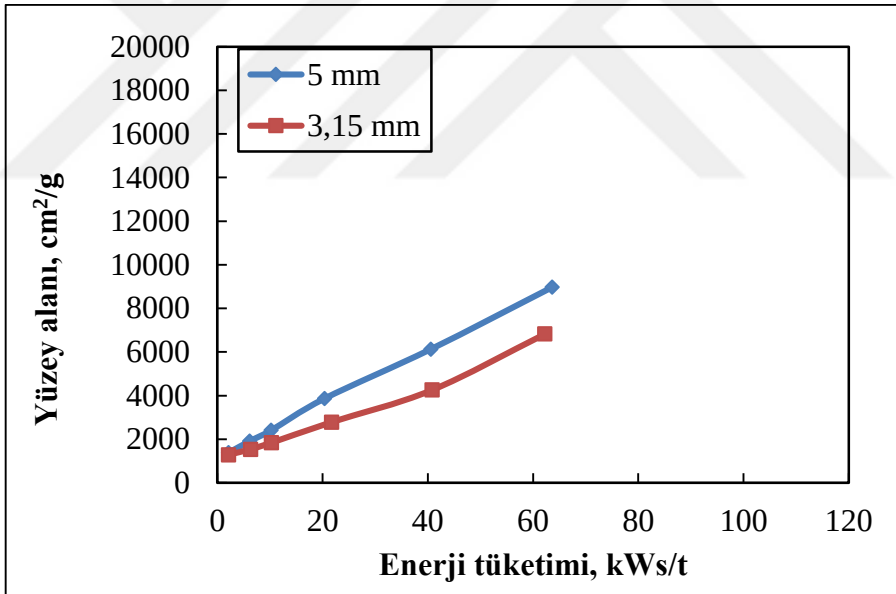
Şekil 4.29. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,45, bilya: 1003 g 5 mm ve 3 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



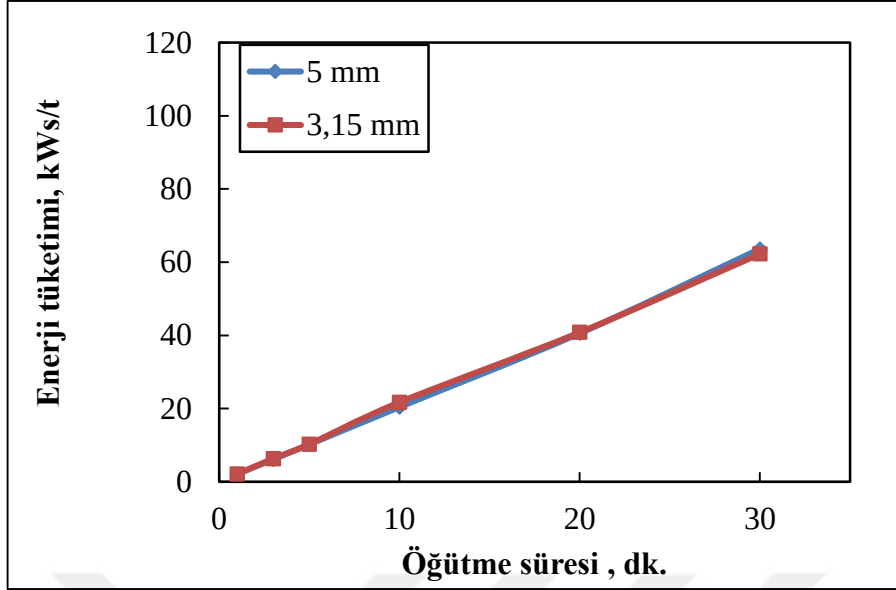
Şekil 4.30. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,45, bilya: 1003 g 5 mm ve 3 mm alumina, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



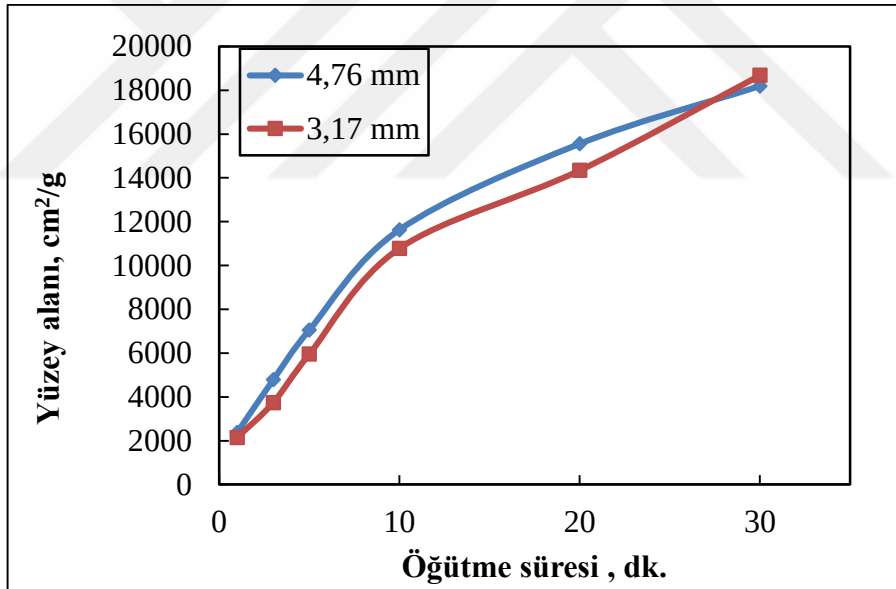
Şekil 4.31. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,45, bilya: 643 g 5 mm ve 3,15 mm cam, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



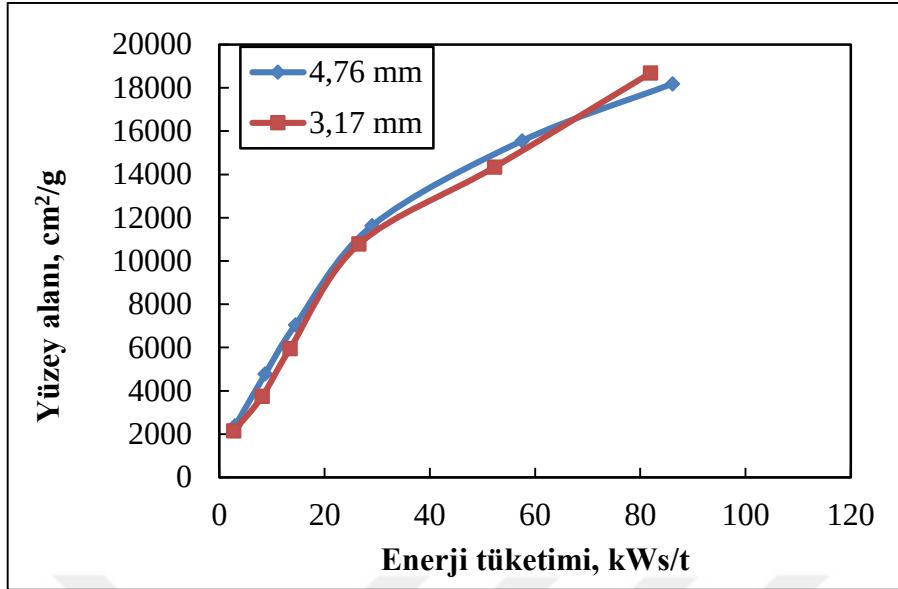
Şekil 4.32. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,45, bilya: 643 g 5 mm ve 3,15 mm cam, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



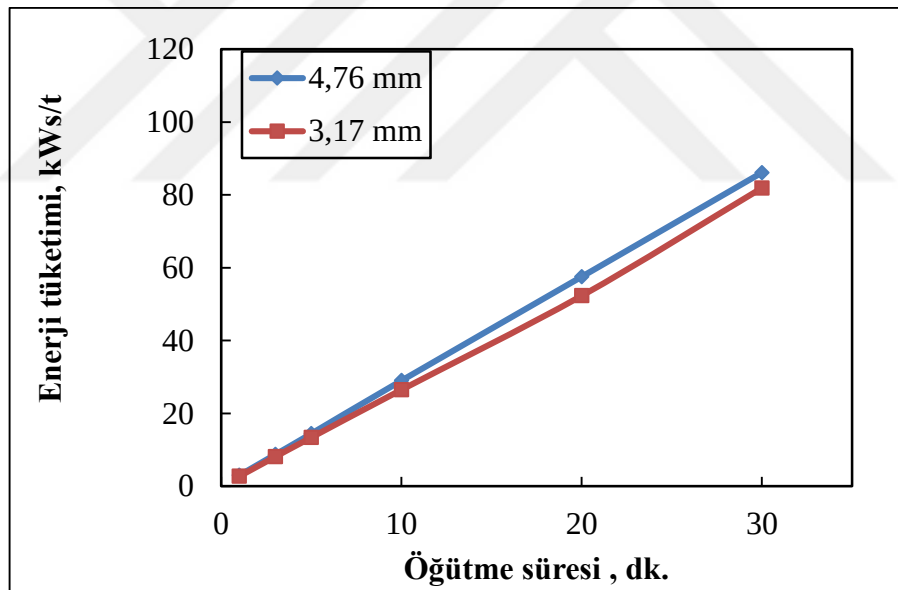
Şekil 4.33. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,45, bilya: 643 g 5 mm ve 3,15 mm cam, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.34. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,45, bilya: 1980 g 4,76 mm ve 3,17 mm çelik, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.35. Farklı bilya boyutlarında enerji tüketiminin yüzey alanı üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,45, bilya: 1980 g 4,76 mm ve 3,17 mm çelik, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)



Şekil 4.36. Farklı bilya boyutlarında öğütme süresinin enerji tüketimi üzerine etkisi (yaş öğütme, 600 d/d, J: 0,72, K: 0,45, bilya: 1980 g 4,76 mm ve 3,17 mm çelik, örnek: 162 g, kapasite: 0,324-9,720 kg/saat)

4.2.5. Yaş öğütme sonuçları

Yaş öğütme ile 30 dakika öğütme süresinde (70,409 kWs/t enerji tüketiminde) yüzey alanı 13677 cm²/g olan bir ürün 0,324 kg/s kapasite ile elde edilmiştir. Ayrıca, yaş öğütmede

işlem parametrelerinin gözlenen etkileri aşağıda verilmiş olup, genellikle bu etkiler kuru öğütme ile paralellik göstermektedir.

Karıştırma hızı deneyleri:

- Aynı öğütme süresinde karıştırma hızı arttıkça, enerji tüketimleri genellikle artmaktadır.
- Aynı enerji tüketiminde karıştırma hızı arttıkça, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır.

Bilya oranı deneyleri:

- Aynı öğütme süresinde bilya oranı arttıkça, enerji tüketimleri artmaktadır.
- Aynı enerji tüketiminde bilya oranı arttıkça, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır.

Katı oranı deneyleri:

- Aynı öğütme süresinde katı oranı azaldıkça, enerji tüketimleri artmaktadır.
- Aynı enerji tüketiminde katı oranı azaldıkça, genellikle, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır.

Bilya boyutu ve cinsi deneyleri:

Bilya boyutu:

- Aynı öğütme süresinde tüm bilya cinslerinde (alumina, cam ve çelik) bilya boyutu arttıkça, özgül enerji tüketimi artmaktadır.
- Aynı enerji tüketiminde tüm bilya cinslerinde bilya boyutu arttıkça, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır.

Bilya cinsi:

- Cam bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı alümina ve çelik bilya kullanımlarına göre bir miktar düşüktür, fakat bu cins bilya ile elde edilen ürün yüzey alanı diğer bilya cinslerine oldukça küçüktür.
- Çelik bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı alümina ve cam bilya kullanımlarına göre bir miktar fazla olmasına rağmen; bu cins bilya ile en yüksek yüzey alanlı ürün elde edilmektedir.
- Yüzey alanı açısından en verimli sonuçlar çelik bilya kullanımı ile elde edilmektedir. Fakat çelik bilya kullanımı elde edilen ürünün rengini değiştirmektedir.

4.3. Kuru ve Yaş Öğütmenin Optimum Koşullarında Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde, kuru ve yaş öğütmenin optimum koşullarında elde edilen sonuçların karşılaştırılması verilmiştir (Çizelge 4.9). Kuru ve yaş öğütmenin birbirlerine göre yararları ve sakıncaları:

- Çizelge 4.9’da görüldüğü gibi, kuru öğütme ile 30 dakika öğütme süresinde (85,281 kWs/t enerji tüketiminde) yüzey alanı 8470 cm²/g olan bir ürün 0,324 kg/s kapasite ile elde edilmiştir. Yaş öğütme ile ise aynı öğütme süresinde (70,409 kWs/t enerji tüketiminde) yüzey alanı 13677 cm²/g olan bir ürün aynı kapasite ile elde edilmiştir. Kuru öğütme ile yaş öğütme sonuçları aynı kapasitede karşılaştırılacak olur ise, yaş öğütme:
 - Enerji tüketimini %17,4 azaltmıştır.
 - Yüzey alanını %61,5 arttırmıştır.

Çizelge 4.9. Kuru ve yaş öğütmeden elde edilen en verimli sonuçlar (600 d/d, süre: 30 dk., bilya: 5 mm alumina ve 1003 g, örnek: 162 g, J: 0,72, U:0,58, K: 0,45)

Öğütme Tipi	Enerji (kWs/t)	Yüz. A. (cm ² /g)	Kapasite (kg/s)
Kuru	85,281	8470	0,324
Yaş	70,409	13677	0,324

- Yaş öğütme sonuçları kuru öğütmeye göre oldukça üstündür. Ancak yaş öğütmeden elde edilen ürünün kurutulması gerekmektedir. Sprey kurutucuda kurutma maliyeti ton başına yaklaşık 8-10 Amerikan Doları’dır. Bu yüzden kurutma maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır.

4.4. Modelleme Çalışmaları

Bir öğütme işleminden maksimum verimliliğin elde edilebilmesi, en uygun ekipmanların seçimi, işletme değişkenlerinin iyi tanımlanması ve işletim sırasında bu değişkenlerdeki değişimin işlem üzerindeki etkisinin doğru belirlenebilmesine bağlıdır. Sistemin tasarım, kontrol ve optimizasyonu ancak işletme değişkenlerinde veya besleme

özelliklerindeki değişimleri güvenilir bir şekilde tanımlayabilecek matematiksel eşitliklerin tanımlanması ile mümkün olabilmektedir.

Bu tezin önceki bölümde atritör değirmenin işlem değişkenlerinin ürün yüzey alanı üzerine etkileri verilmiştir. Bu bölümde ise bir önceki bölümde kullanılan verilerden yararlanarak deneylerde kullanılan atritör değirmen için modeller geliştirilmiştir.

4.4.1. Yüzey alanına bağlı matematiksel modelin geliştirilmesi

Rittinger modeli, tane boyutunun küçültülmesinde tüketilen enerjinin üretilen yeni yüzey ile orantılı olduğunu ileri sürmüş olmakla birlikte, bu model enerji tüketiminin düşük olduğu koşullarda uygulanabilir (Choi vd., 2009). Daha yüksek enerji tüketimi için Tanaka (1954), tarafından önerilen öğütme inceliğinin sınır modeli uygulanabilir (Eşitlik 4.1).

$$\frac{dS_w}{dt} = K(S_{w\infty} - S_w) \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte K, öğütme katsayısı; t, öğütme süresi; S_w özgül yüzey alanı ve $S_{w\infty}$, $t=\infty$ anındaki özgül yüzey alanıdır.

Başlangıç koşulları için ($t=0$, $S_w = S_{w0}$) Eşitlik 4.1 çözüldüğünde, Eşitlik 4.2 elde edilir.

$$\frac{S_{w\infty} - S_w}{S_{w\infty} - S_{w0}} = (1 - \exp(-Kt)) \quad (4.2)$$

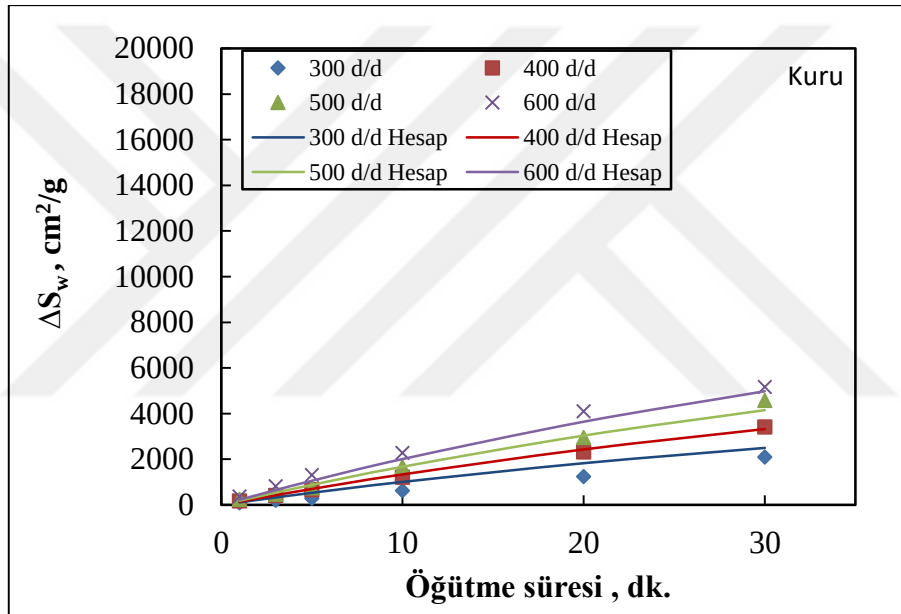
Eşitlik 4.2, $S_{w\infty} - S_w$ yerine ΔS_w ve $S_{w\infty} - S_{w0}$ yerine $\Delta S_{w\infty}$ yazılarak tekrar düzenlenirse Eşitlik 4.3 elde edilir.

$$\Delta S_w = \Delta S_{w\infty} \times (1 - \exp(-Kt)) \quad (4.3)$$

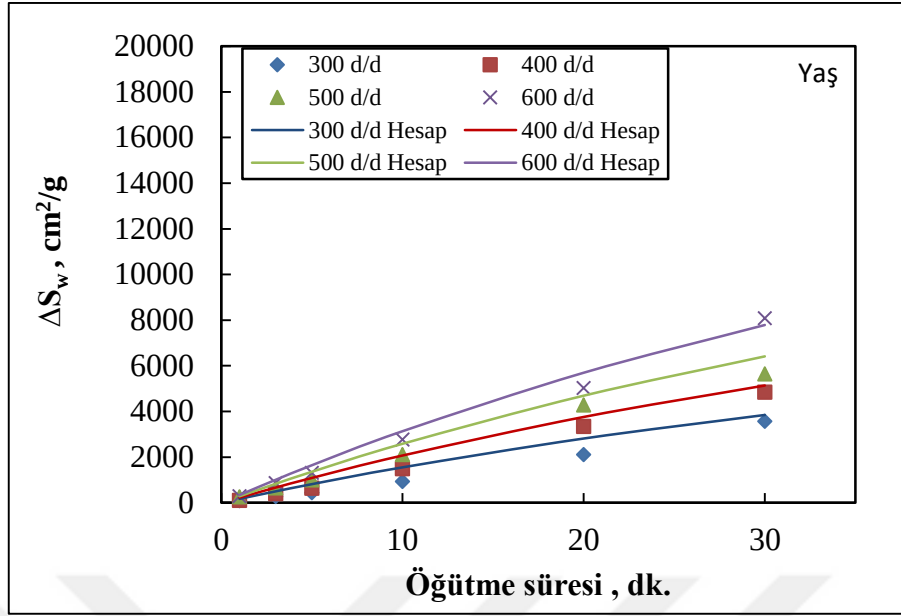
Yüzey alanı modellemesi çalışmalarında Eşitlik 4.3'teki K değeri sabit tutularak, yüzey alanı limit değerini temsil eden $\Delta S_{w\infty}$ değerinin öğütme işlem parametresiyle ilişkileri

incelenmiştir. $\Delta S_{w\infty}$ ve K değerleri excel programı kullanılarak doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle hesaplanmıştır.

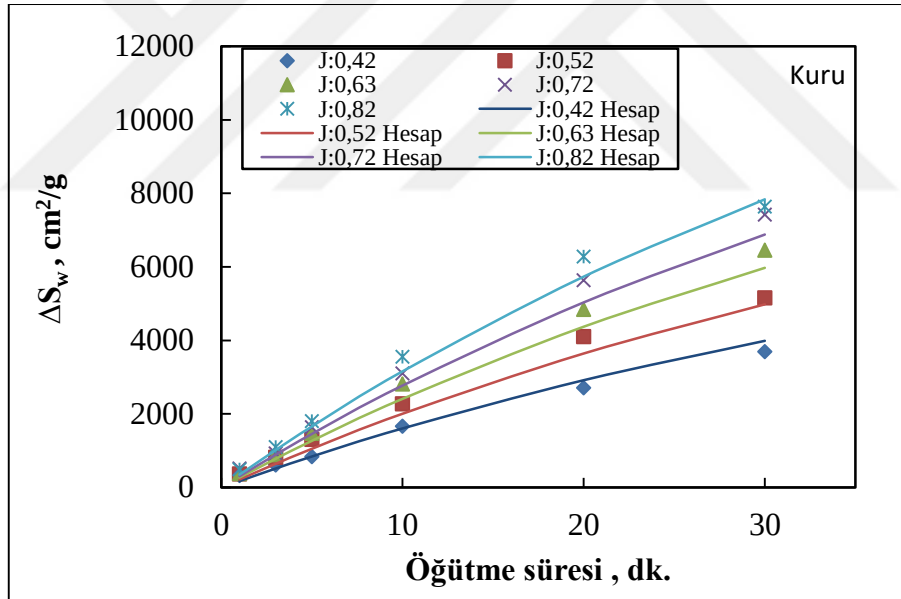
Değirmen işlem değişkenlerinin kontrollü koşullar içerisinde değiştirilmesi sonucunda, öğütme enerjilerinde değişim yaratılmıştır. Bu enerji değişimine bağlı olarak oluşan yüzey alanı farkının (ΔS_w) zamana bağlı değişimleri kuru ve yaş öğütme koşulları için Şekil 4.37 ve 4.48’de verilmiştir. Bu şekillerde, oluşan yüzey alanı farkının zamana bağlı değişimleri incelendiğinde, Bölüm 4.1 ve 4.2’de tartışıldığı üzere, artan öğütme sürelerine bağlı olarak oluşan yüzey alanı farkında artış meydana geldiği gözlenmektedir.



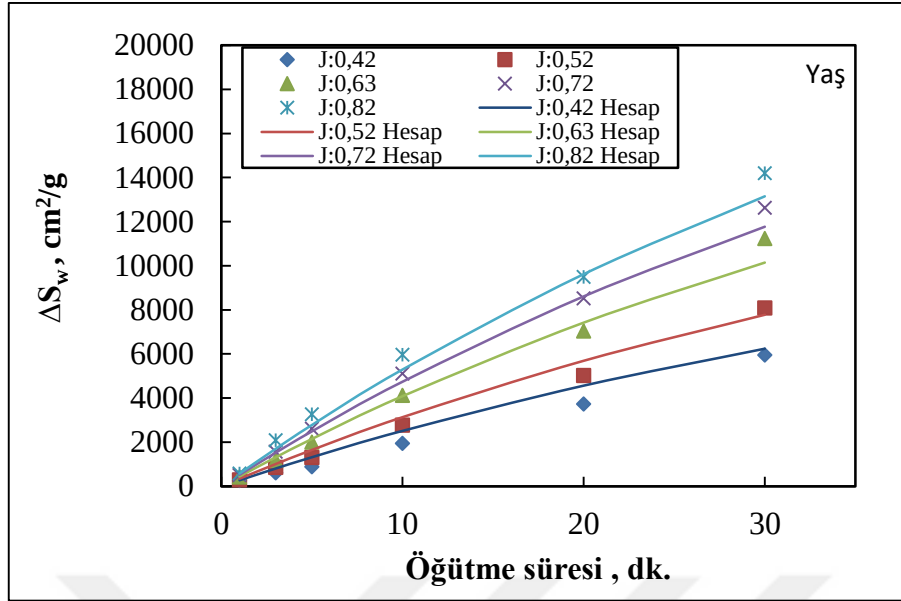
Şekil 4.37. Kuru öğütme koşullarında ve farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



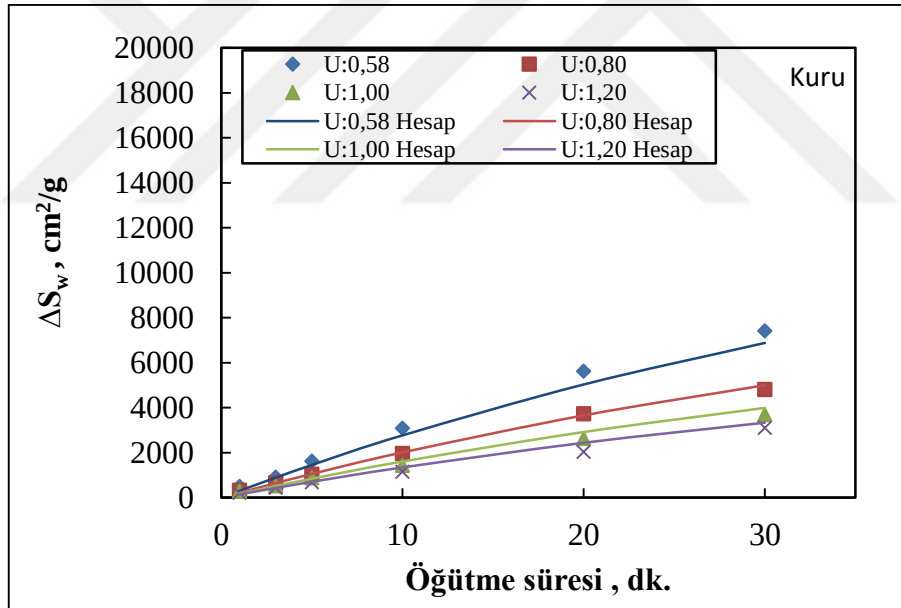
Şekil 4.38. Yaş öğütme koşullarında ve farklı karıştırma hızlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



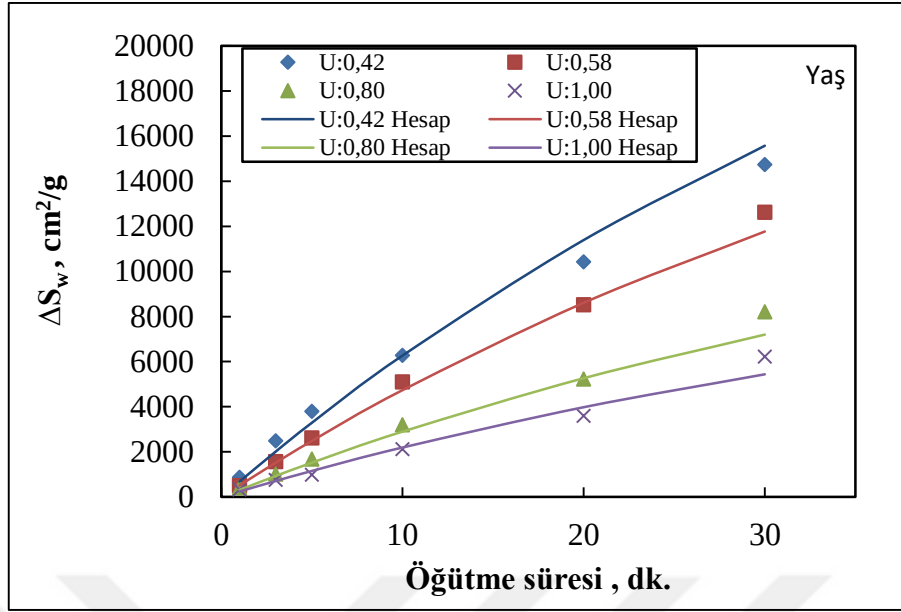
Şekil 4.39. Kuru öğütme koşullarında ve farklı bilya oranlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



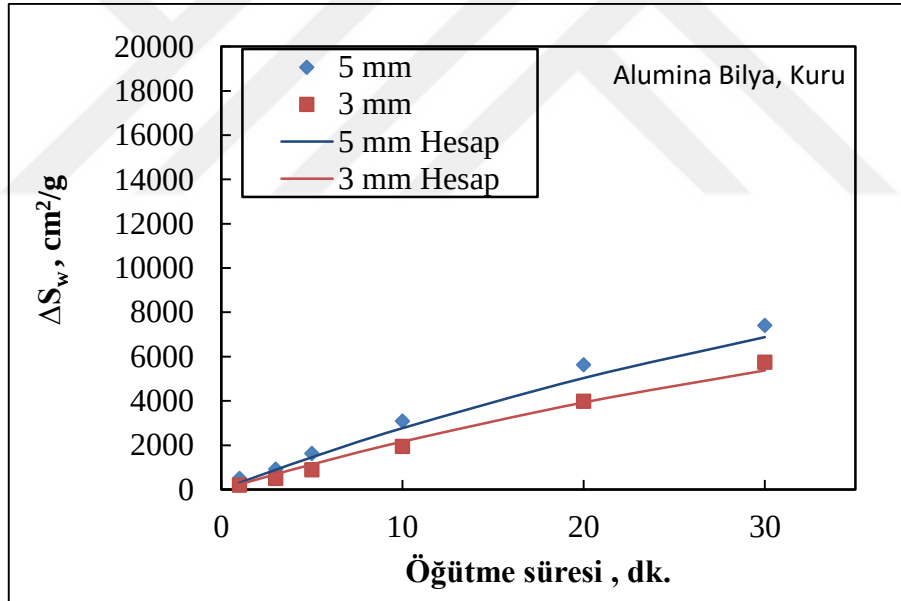
Şekil 4.40. Yaş öğütme koşullarında ve farklı bilya oranlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



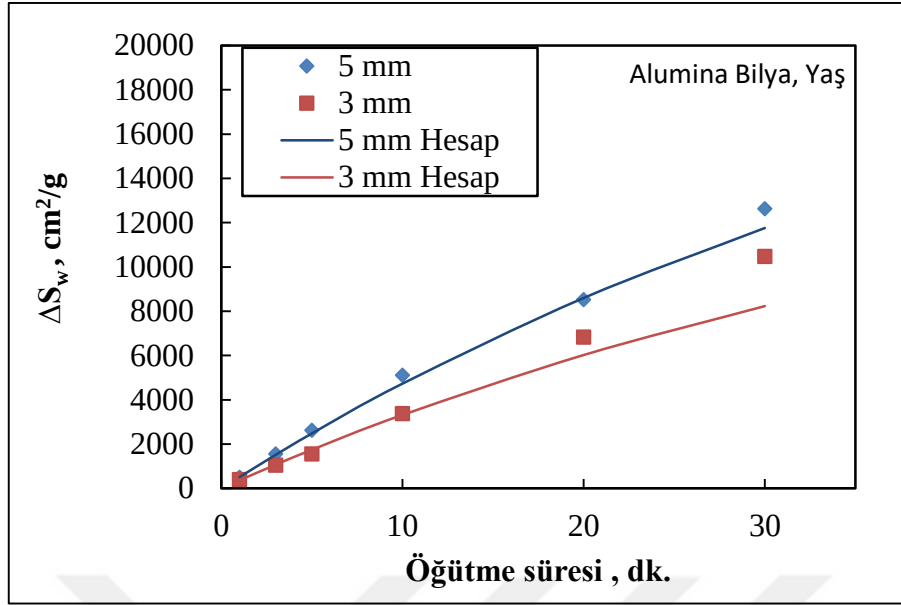
Şekil 4.41. Kuru öğütme koşullarında ve farklı boşluk doldurma oranlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



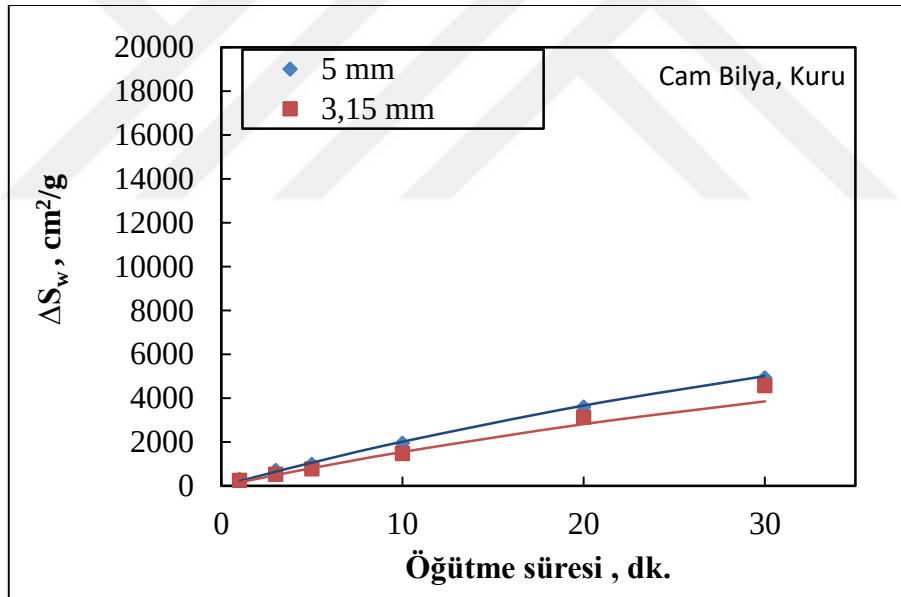
Şekil 4.42. Yaş öğütme koşullarında ve farklı boşluk doldurma oranlarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



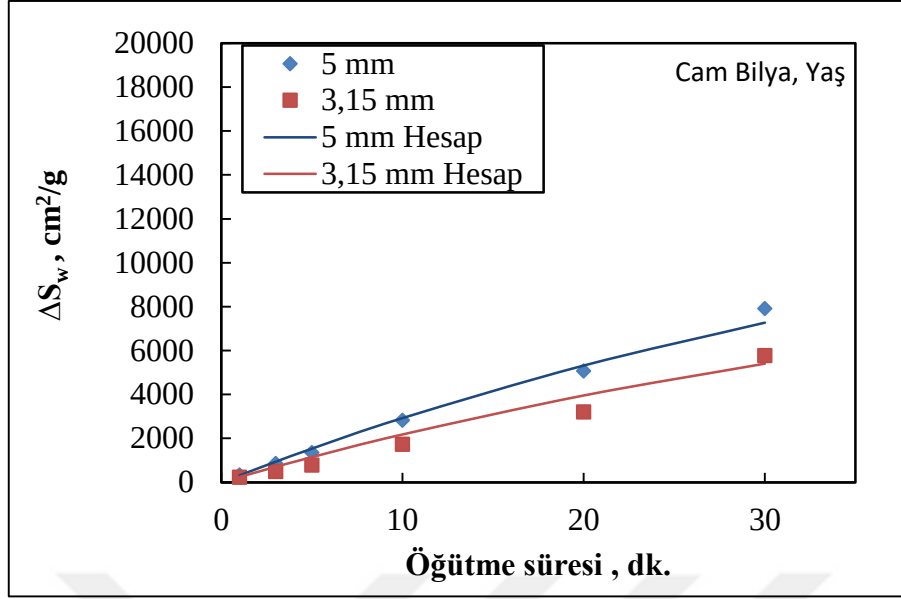
Şekil 4.43. Kuru öğütme koşullarında ve alumina bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



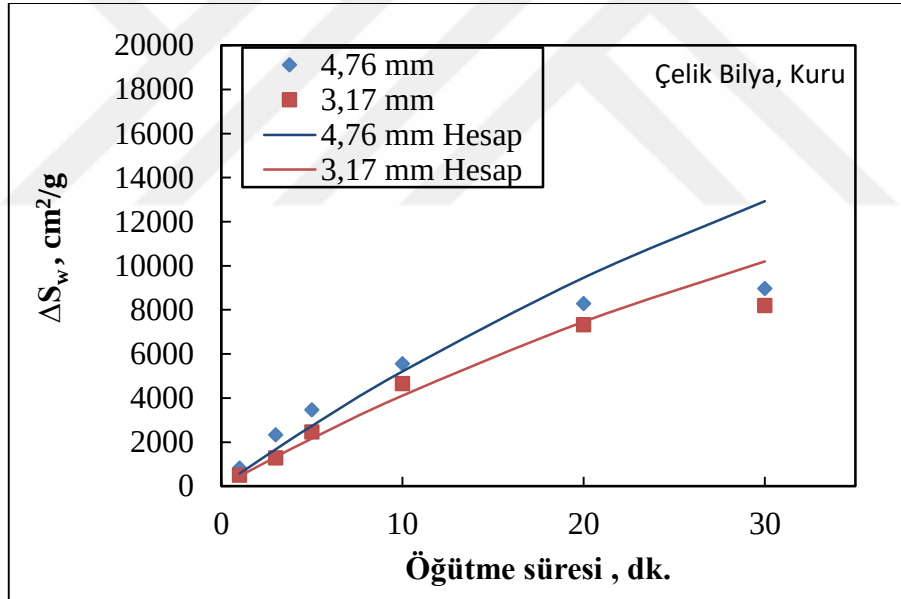
Şekil 4.44. Yaş öğütme koşullarında ve alumina bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



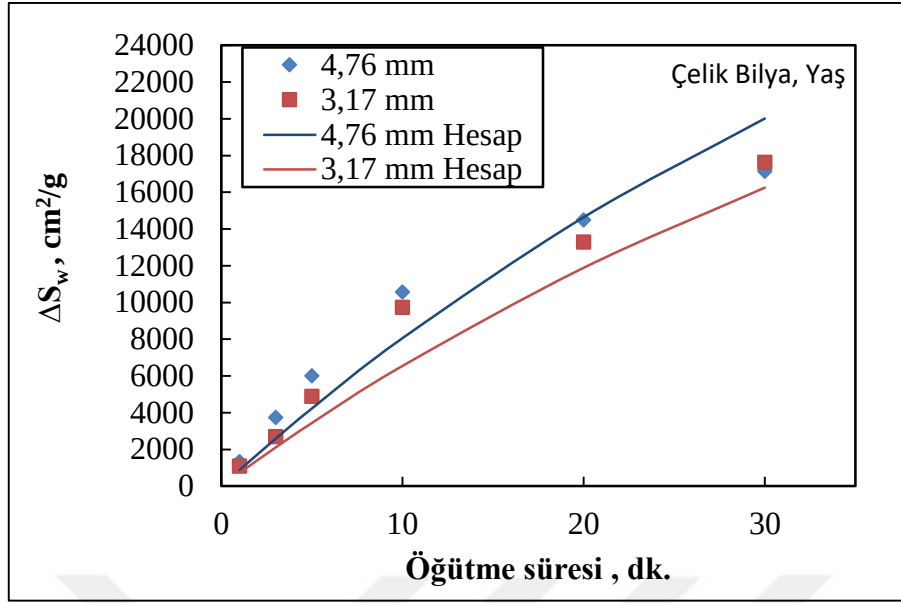
Şekil 4.45. Kuru öğütme koşullarında ve cam bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



Şekil 4.46. Yaş öğütme koşullarında ve cam bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



Şekil 4.47. Kuru öğütme koşullarında ve çelik bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi



Şekil 4.48. Yaş öğütme koşullarında ve çelik bilya için, farklı bilya çaplarında öğütme süresinin oluşan yüzey alanı üzerine etkisi

Oluşan yüzey alanı farkının hesaplanması sırasında elde edilen K değeri, $\Delta S_{w\infty}$ değerleri, ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki belirleme katsayıları (R^2) kuru ve yaş öğütme koşulları için sırasıyla Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.37-4.48 incelendiğinde hesaplanan ve ölçülen yüzey alanı eğrilerinin benzeştiği ve Çizelge 4.10-4.11 incelendiğinde ise hesaplanan ve ölçülen yüzey alanı değerlerinin yüksek belirleme katsayılarına sahip olduğu görülmektedir.

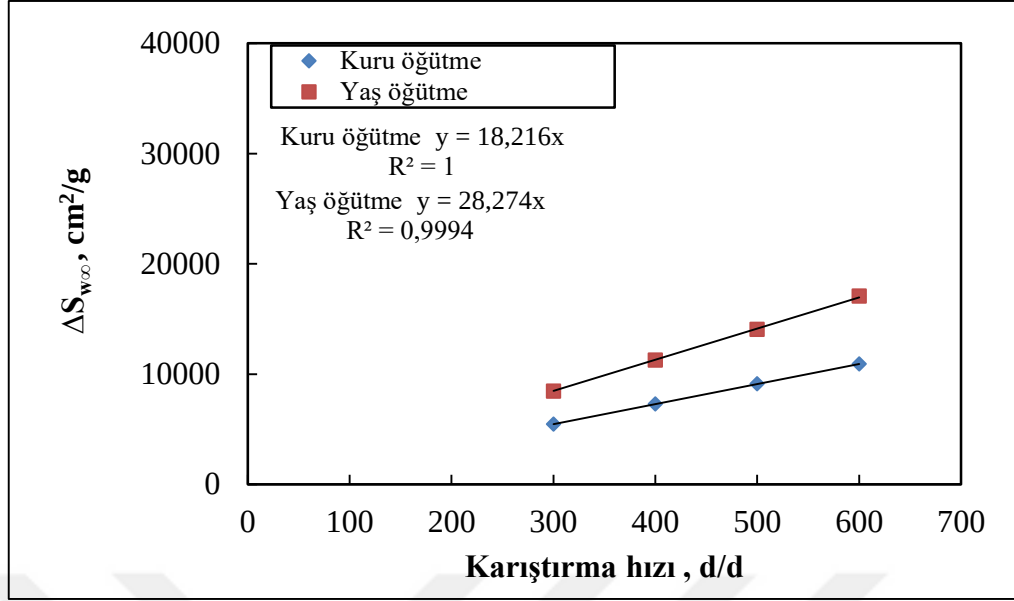
Çizelge 4.10. Kuru öğütme koşulları için model ve belirleme katsayıları

Parametreler	Koşullar	$\Delta S_{w\infty}$	K	R ²
Karıştırma Hızı	300 d/d	5464,7	0,0203	0,9769
	400 d/d	7286,2		0,9959
	500 d/d	9107,8		0,9915
	600 d/d	10929,4		0,997
Bilya doluluğu	J:0,42	8743,2		0,9986
	J:0,52	10929,4		0,997
	J:0,63	13115,5		0,9992
	J:0,72	15093,9		0,9987
	J:0,82	17194,3		0,9923
Bilyalar arası boşluk doldurma	U:0,58	15093,9		0,9987
	U:0,80	10965,1		0,9981
	U:1,00	8764,2		0,9982
	U:1,20	7310,1		0,9921
Bilya çapı ve yoğunluğu	5 mm, 2,5 g/cm ³	10978,1		0,9992
	3,15 mm, 2,5 g/cm ³	8461,1		0,9922
	5 mm, 3,9 g/cm ³	15093,9		0,9987
	3 mm, 3,9 g/cm ³	11808,7		0,9962
	4,76 mm, 7,7 g/cm ³	28368,0		0,9473
	3,17 mm, 7,7 g/cm ³	22366,2		0,9645

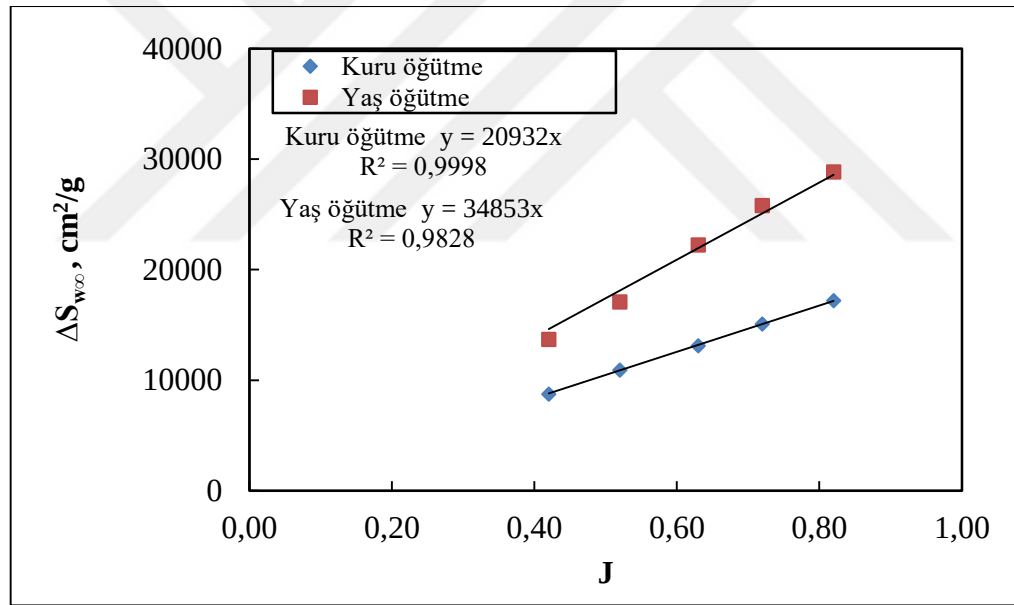
Çizelge 4.11. Yaş öğütme koşulları için model ve belirleme katsayıları

Parametreler	Koşullar	$\Delta S_{w\infty}$	K	R ²
Karıştırma Hızı	300 d/d	8440,3	0,0203	0,9745
	400 d/d	11253,8		0,9934
	500 d/d	14067,2		0,9973
	600 d/d	17080,6		0,9882
Bilya doluluğu	J:0,42	13704,1		0,9873
	J:0,52	17080,6		0,9882
	J:0,63	22257,2		0,9902
	J:0,72	25812,9		0,9967
	J:0,82	28857,0		0,9941
Bilyalar arası boşluk doldurma	U:0,42	34177,6		0,9974
	U:0,58	25812,9		0,9967
	U:0,80	15798,1		0,9911
	U:1,00	11944,4		0,9742
Bilya çapı ve yoğunluğu	5 mm, 2,5 g/cm ³	15952,8		0,9920
	3,15 mm, 2,5 g/cm ³	11868,4		0,9682
	5 mm, 3,9 g/cm ³	25812,9		0,9967
	3 mm, 3,9 g/cm ³	18058,1		0,9906
	4,76 mm, 7,7 g/cm ³	43909,9		0,9583
	3,17 mm, 7,7 g/cm ³	35649,5		0,9787

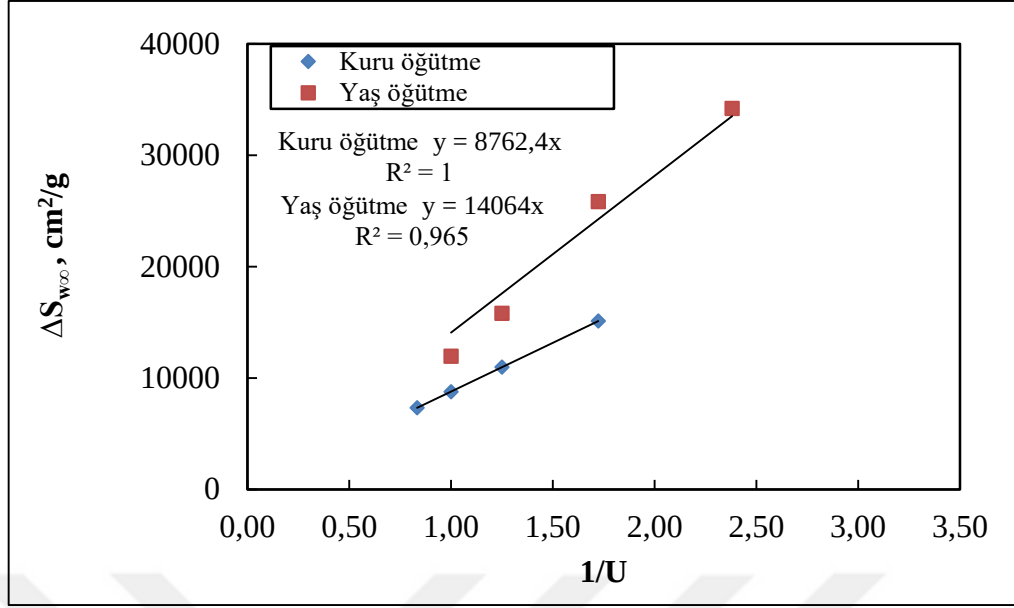
İşlem değişkenleri ile oluşan yüzey alanı değişim verileri kullanılarak, Eşitlik 4.3'te verilen matematiksel ifadede yer alan $\Delta S_{w\infty}$ parametre değerleri sabit K parametresi değeri için belirlenmiştir. Şekil 4.49-4.53'te $\Delta S_{w\infty}$ parametresinin farklı işlem değişkenleri ile değişimi ve her bir ilişkinin teorik ve hesaplanan uyumunu gösteren eğriler verilmiştir.



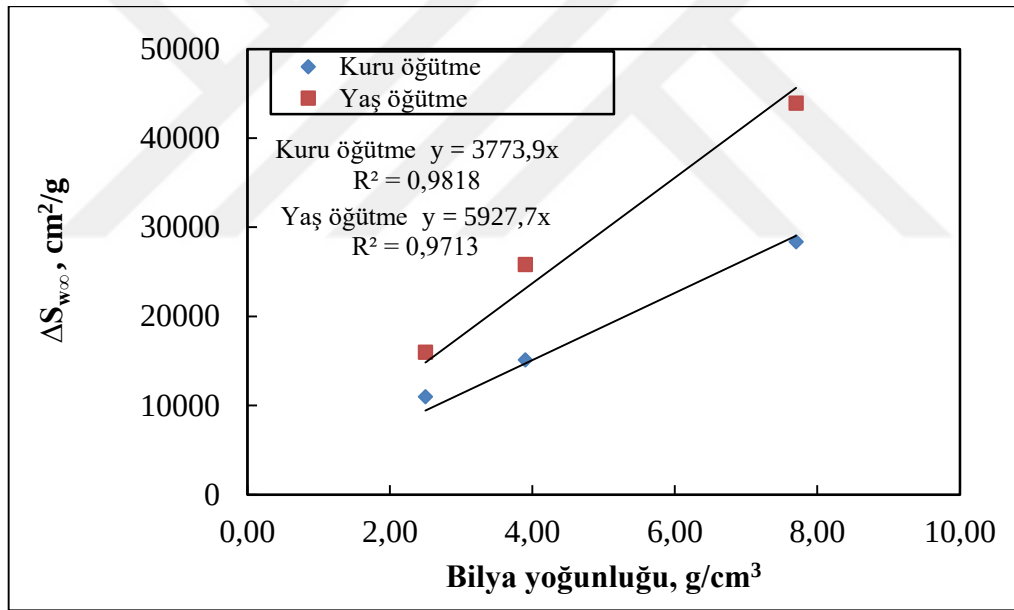
Şekil 4.49. Farklı karıştırma hızlarının $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi



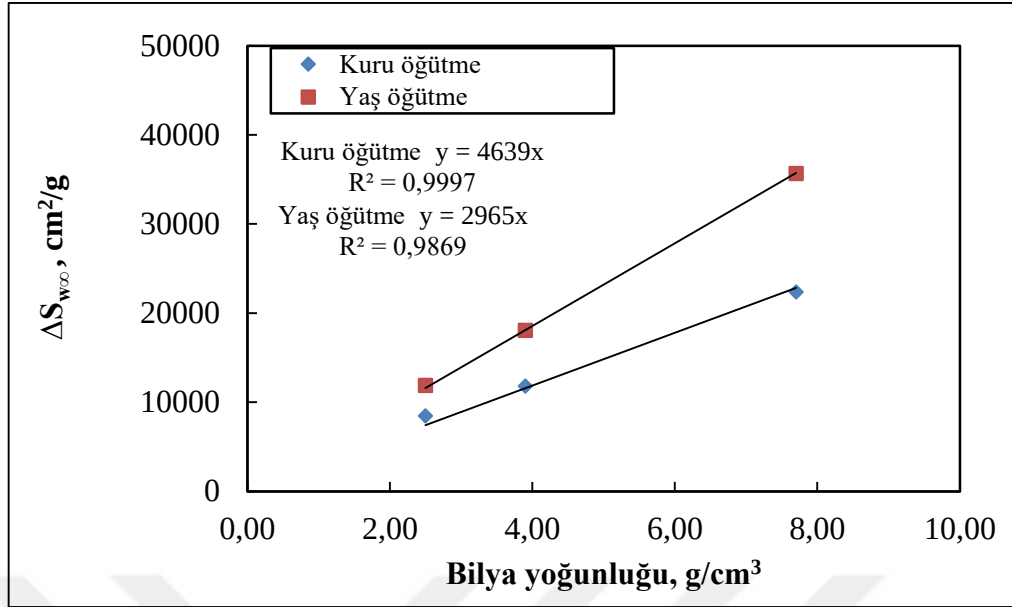
Şekil 4.50. Farklı bilya doldurma oranlarının $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi



Şekil 4.51. Farklı boşluk doldurma oranlarının $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi



Şekil 4.52. İri bilya için bilya yoğunluğunun $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi

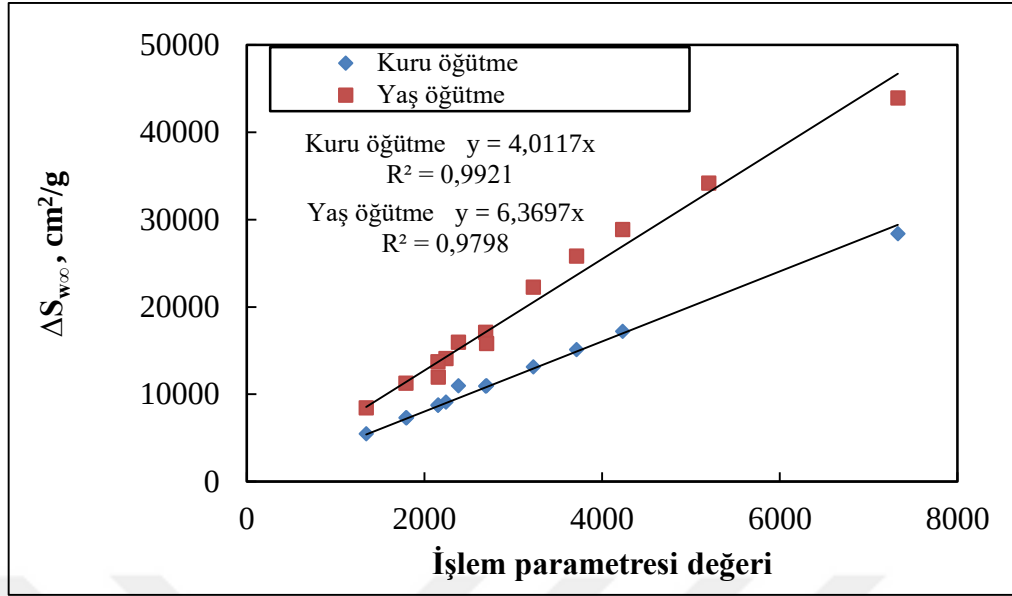


Şekil 4.53. İnce bilya için bilya yoğunluğunun $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi

Şekil 4.49-4.53'te görüldüğü gibi, farklı işlem değişkenleri için $\Delta S_{w\infty}$ parametresi oldukça iyi bir belirleme katsayısı değerlerine sahiptir. Yaş öğütme koşullarında, boşluk doldurma oranının (U) $\Delta S_{w\infty}$ değerine etkisi hariç, R^2 değerleri %97 nin üzerinde olduğu gözlenmektedir. Bu deney grubunda boşluk doldurma oranı değişimiyle % katı miktarları da değiştiğinden % katının $\Delta S_{w\infty}$ parametresine etkisi ayrıca incelenecektir. Model parametresi, ayrı ayrı değişkenler için yüzey alanı oluşumunu başarılı bir şekilde ifade etmektedir.

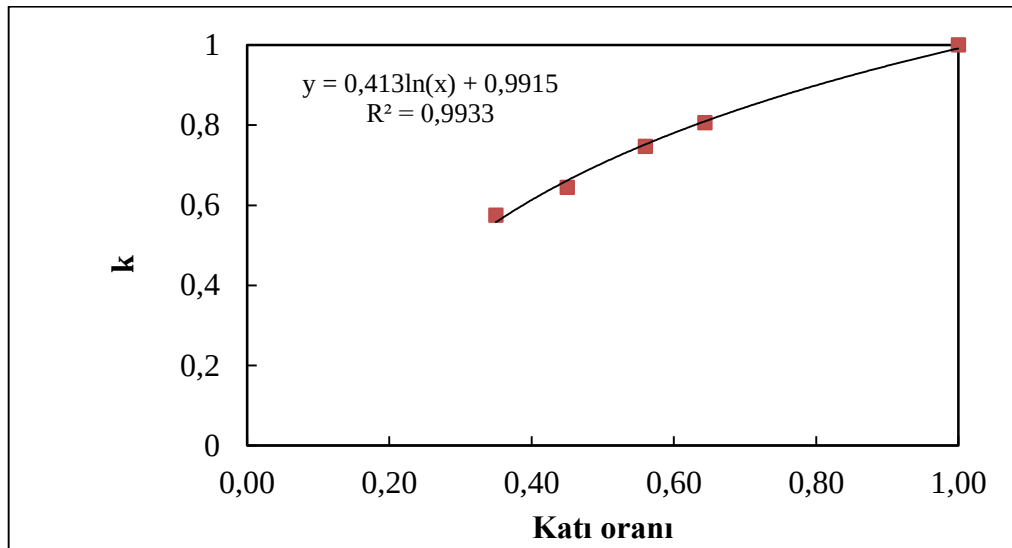
İşlem değişkenlerinden karıştırma hızı, bilya doldurma oranı, boşluk doldurma oranı, bilya çapı ve yoğunluğu birbirleriyle iç etkileşimi olan parametrelerdir. Şekil 4.49-4.53'te görüldüğü gibi $\Delta S_{w\infty}$ parametresi, karıştırma hızı; bilya doldurma oranı ve bilya yoğunluğu değişkenleriyle doğru, boşluk doldurma oranı ile ters ve doğrusal olarak artmaktadır. Bu işlem değişkenlerinin ortak bir ifadesi olarak değirmen içerisindeki malzeme miktarı başına bilya ağırlığı hesaplanmış ve işlem parametresi değeri Eşitlik 4.4'te verildiği gibi hesap edilerek $\Delta S_{w\infty}$ parametresi ile arasındaki ilişki incelenmiştir (Şekil 4.54)

$$\text{İşlem parametresi değeri} = \text{Karıştırma hızı} \times \frac{\text{Bilya miktarı}}{\text{Malzeme miktarı}} \quad (4.4)$$



Şekil 4.54. Eşitlik 4.4'ten elde edilen işlem parametresi değerinin $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi

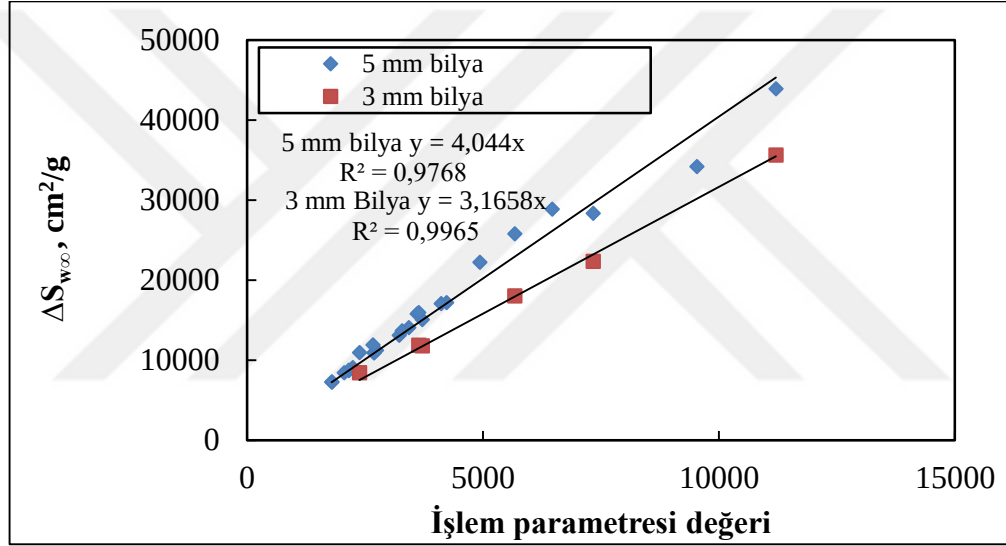
Şekil 4.54'te $\Delta S_{w\infty}$ değeri ile işlem parametresi değeri arasındaki ilişki yaş ve kuru öğütme koşulları olmak üzere iki farklı koşulda verilmiştir. Kuru ve yaş öğütme koşullarını tek bir modelle ifade edebilmek amacıyla kuru öğütme koşullarında elde edilen eşitlik kullanılarak yaş öğütme işlem parametre değeri hesaplanmıştır. Daha sonra hesaplanan işlem parametresi değerleri ile Eşitlik 4.4'ten elde edilen işlem parametresi değerleri oranlanarak elde edilen katsayıların (k) katı oranı ile değişimi incelenmiştir (Şekil 4.55).



Şekil 4.55. Katı oranı değişiminin k değeri üzerine etkisi

Şekil 4.55'den elde edilen eşitlik kullanılarak Eşitlik 4.4 yeniden düzenlenmiş ve Eşitlik 4.5 elde edilmiştir. Eşitlik 4.5 ile kuru ve yaş öğütme koşulları için tek bir model geliştirilmiştir. Şekil 4.56'da farklı bilya çaplarında Eşitlik 4.5'ten elde edilen işlem parametresi değeri ile $\Delta S_{w\infty}$ değeri arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 4.56'da, Eşitlik 4.5'ten elde edilen işlem parametresi değerleri ile $\Delta S_{w\infty}$ parametresi değişiminin oldukça iyi bir belirleme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Bu belirleme katsayıları (R^2) iri (~ 5 mm) bilya çapı için 0,9768; ince (~ 3 mm) bilya çapı için 0,9965 olarak bulunmuştur.

$$\text{İşlem parametresi değeri} = \text{Karıştırma hızı} \times \frac{\text{Bilya miktarı}}{\text{Malzeme miktarı}} \times \frac{1}{0,413 \ln(\text{katı oranı})+1} \quad (4.5)$$

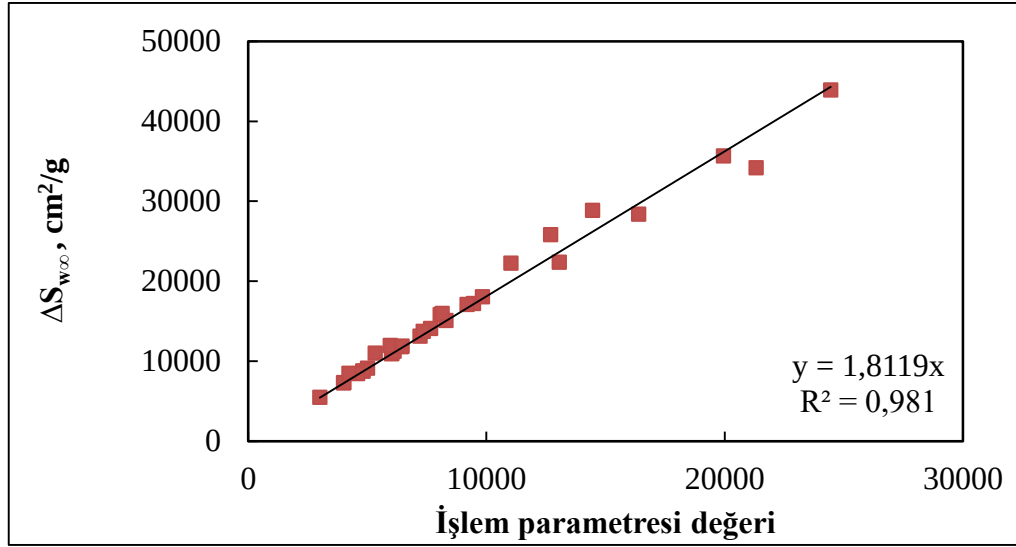


Şekil 4.56. Eşitlik 4.5'ten elde edilen işlem parametresi değerinin $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi

Farklı yoğunluklarda olan bilyaların çapları ~ 5 mm (iri) ve ~ 3 mm (ince) 'dir. Bilya çapıyla $\Delta S_{w\infty}$ arasındaki değişim bilya çapının karekökü olarak ifade edilerek, Eşitlik 4.5'ten Eşitlik 4.6 türetilmiştir.

$$\text{İşlem parametresi değeri} = \text{Karıştırma hızı} \times \frac{\text{Bilya miktarı}}{\text{Malzeme miktarı}} \times \frac{1}{0,413 \ln(\text{katı oranı})+1} \times \sqrt{\text{Bilya çapı}} \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6 kullanılarak elde edilen işlem parametreleriyle $\Delta S_{w\infty}$ değerlerinin değişimi Şekil 4.57'de verilmiştir. Şekil 4.57'de görüldüğü gibi, edilen işlem parametresi değerleriyle $\Delta S_{w\infty}$ parametresi değerleri oldukça iyi belirleme katsayısına sahiptir ($R^2=0,981$).



Şekil 4.57. Eşitlik 4.6 dan elde edilen işlem parametresi değerinin $\Delta S_{w\infty}$ değeri üzerine etkisi

Yapılan yüzey alanı modelleme çalışması sonucunda, kullanılan atritör değirmenin karıştırma hızı, bilya miktarı, malzeme miktarı, bilya yoğunluğu ve çapı parametrelerindeki değişimlerin oluşan yüzey alanı farkına etkisi Eşitlik 4.7'de verilmiştir.

$$\Delta S_w = (1,8119 \times \text{Karıştırma hızı} \times \frac{\text{Bilya miktarı}}{\text{Malzeme miktarı}} \times \frac{1}{0,413 \times \ln(\text{katı oranı}) + 1} \times \sqrt{\text{Bilya çapı}} \times (1 - \exp^{-0,0203t})) \quad (4.7)$$

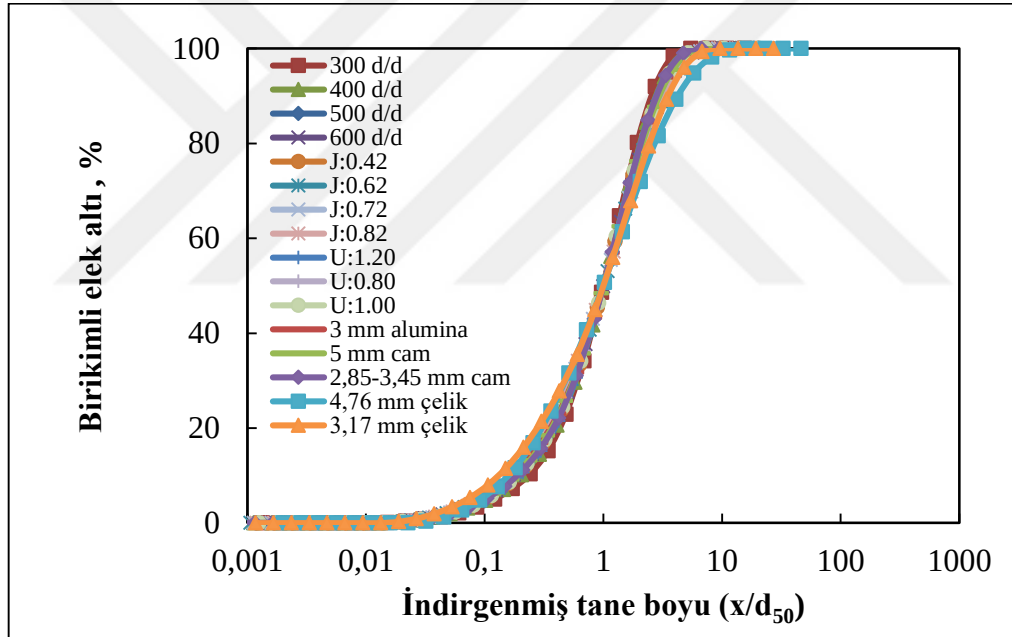
4.4.2. Kırılma hızının (r/d) matematiksel modellenmesi

Öğütme işlemi sonucunda öğütme koşullarına ve öğütme süresine göre farklı tane boyu dağılımları ortaya çıkmaktadır. Tane dağılımının, değirmen içerisindeki kırılma mekanizmasına ışık tutacak ipuçlarını içermesi ve bu ipuçlarından hareketle öğütme koşullarına hükmederek, arzulanan tane dağılımına ulaşılabilmesi mümkün olmaktadır.

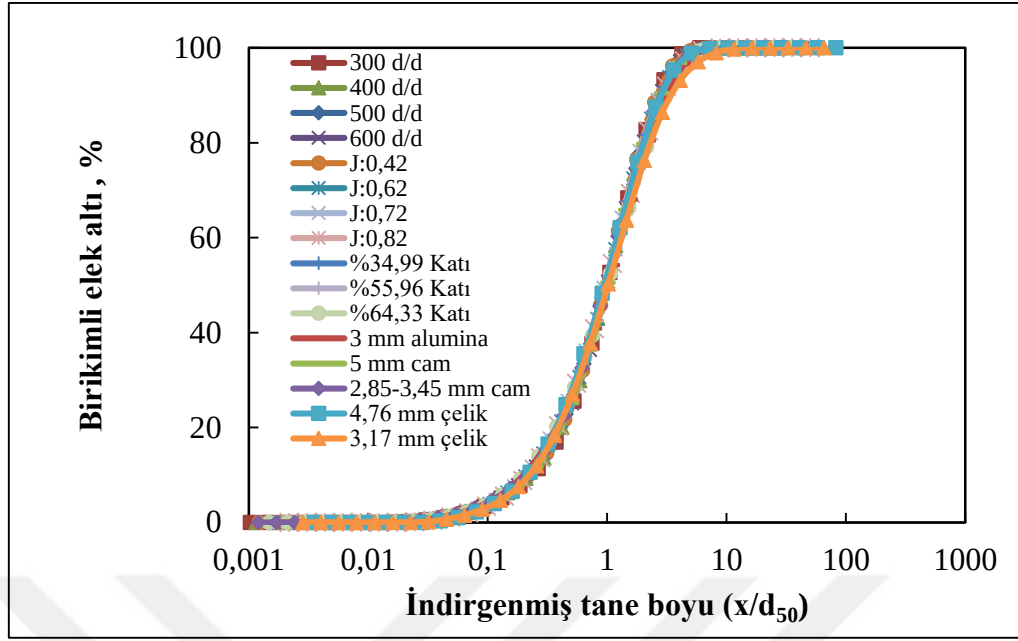
Kırılma hızının matematiksel modellenmesi bölümünde 112R008 nolu TÜBİTAK projesinin verilerinden yararlanılmıştır. Bu proje kapsamında karıştırmalı bilyalı değirmende mikanın kuru ve yaş olarak mikronize boyuta öğütülmesinde işlem parametrelerinin ürün boyut dağılımı üzerine etkisi araştırılmıştır.

Kapur (1972), farklı öğütme sürelerinde üretilen tane boyutu dağılımlarının, boyutsuz tane boyutunun bir fonksiyonu olarak çizildiğinde tek bir eğri üzerinde çakıştığını öne sürmüştür. İlk momentin, median tane boyutunun (d_{50}) veya herhangi bir boyutunun

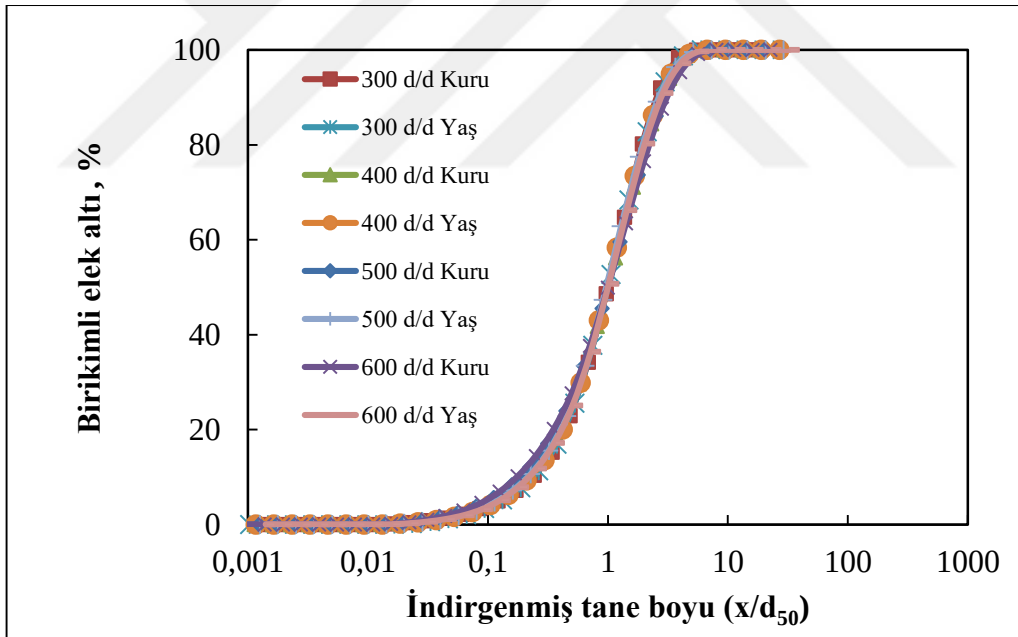
hepsiyle orantılı olduğunu ve öğütme denkleminin bir benzerlik çözümüne sahip olduğunu göstermiştir. Modelleme çalışmaları öncesinde verilerin analizi için Kapur (1972), önerdiği yaklaşım kullanılmıştır. Bu amaçla, öğütme işletme koşullarının ve öğütme zamanının etkisinin incelenebilmesi için her biri işlem değişkeni için indirgenmiş tane boyu eğrileri çizilmiştir. İndirgenmiş tane boyu eğrisi her bir tane boyunun orta boyuna (d_{50}) bölünmesi sonucunda elde edilen tane boyu dağılımı olarak çizilmektedir. Şekil 4.58 ve 4.59'da sırasıyla kuru ve yaş öğütme koşullarında karıştırma hızı, bilya doluluk oranı, boşluk doldurma oranı, bilya çapı ve bilya tipleri için indirgenmiş tane boyu dağılımları ve 5 dakikalık öğütme zamanı için verilmektedir. Şekil 4.60'da 5 dakikalık öğütme süresi için farklı karıştırma hızlarında yaş ve kuru öğütme koşulları için indirgenmiş tane boyu dağılımları verilmektedir.



Şekil 4.58. Kuru öğütme koşullarında farklı öğütme koşullarında 5 dakikalık öğütme süresi için indirgenmiş tane boyu dağılımı eğrileri



Şekil 4.59. Yaş öğütme koşullarında farklı öğütme koşullarında 5 dakikalık öğütme süresi için indirgenmiş tane boyu dağılımı eğrileri

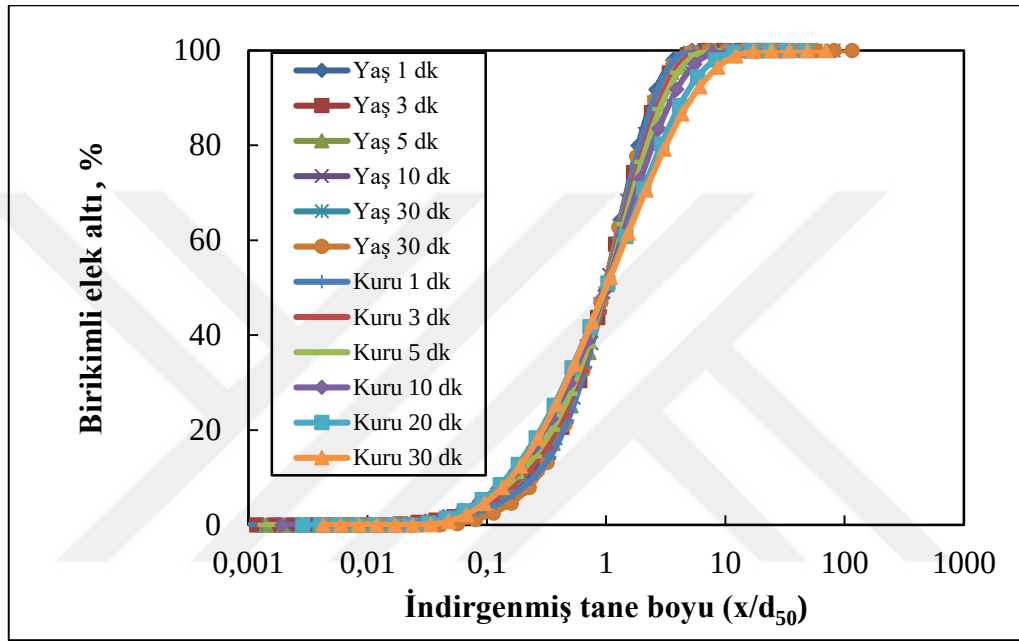


Şekil 4.60. Kuru ve yaş öğütme koşullarında farklı karıştırma hızlarında 5 dakikalık öğütme süresi için indirgenmiş tane boyu dağılımı eğrileri

Şekil 4.58, Şekil 4.59 ve Şekil 4.60'da görüldüğü üzere farklı işlem koşullarına ait indirgenmiş tane boyu dağılımlarının eğimleri (α) birbirine çok yakındır. α 'nın sabit denebilecek kadar birbirine yakın değer alması, indirgenmiş tane boyu dağılım eğrilerinin şeklinin test edilen öğütme koşullarından bağımsız ve sabit olduğunu göstermektedir. Bu da tane boyu dağılım eğrilerinin, farklı öğütme koşulları için modellenebileceğini

göstermektedir ve bu durumda kırılma hızı tane boyu ilişkisinin farklı işlem değişkenlerine göre sabit eğimde gelişeceği düşünülmektedir.

Şekil 4.61’de 600 d/d karıştırma hızında kuru ve yaş öğütme koşullarında zamana bağlı olarak indirgenmiş tane boyu dağılımları verilmiştir. Farklı öğütme süreleri için indirgenmiş tane boyu dağılımı eğrilerinin eğiminin değiştiği gözlenmektedir.



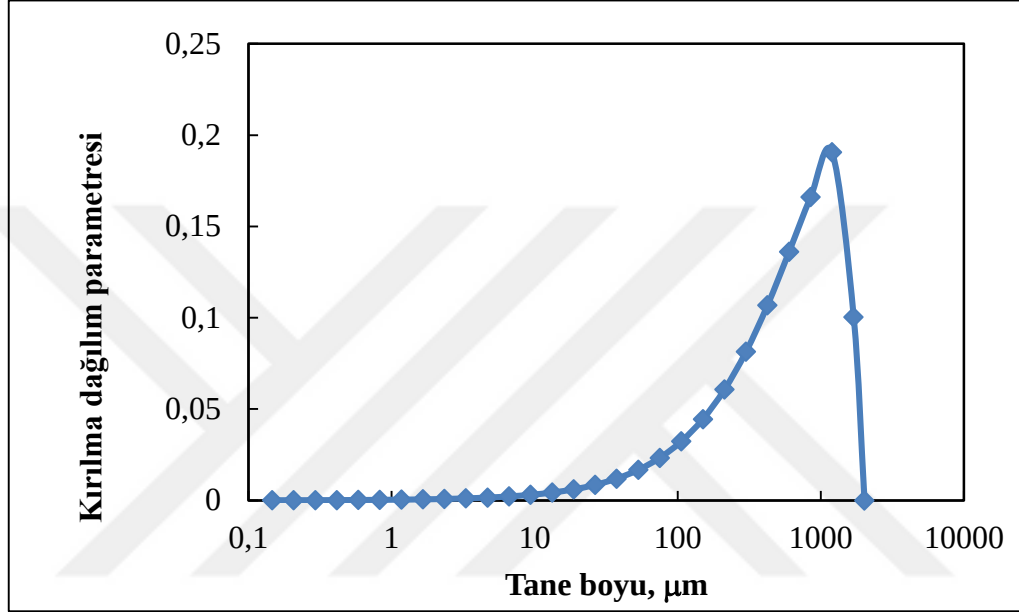
Şekil 4.61. Kuru ve yaş öğütme koşullarında farklı öğütme süreleri için indirgenmiş tane boyu dağılımı eğrileri

İndirgenmiş tane boyu eğrilerinden de görüleceği gibi değirmende öğütme koşullarına göre ve öğütme süresine göre farklı tane boyu dağılımları ortaya çıkmaktadır. Bu bulgulardan yola çıkılarak kırılma hızı parametrelerinin işletme koşullarıyla değişiminin modellenebilir olduğu düşünülmüş ve parametrelerin işletme koşullarıyla değişimi incelenmiştir.

Kırılma hızlarının (r/d) hesabında Bölüm 2’de detaylı olarak bahsedilen Whiten’in 1972’de önermiş olduğu mükemmel karışım bilyalı değirmen modeli kullanılmıştır (Eşitlik 2.23). Mükemmel karışım modelinde yer alan kırılma dağılım fonksiyonunun belirlenmesi için Bölüm 2’de bahsedilen boyut dağılımının geometrik bir seriye bağlı olarak ifadesi kullanılmıştır (Broadbent ve Callcott 1956) (Eşitlik 4.8).

$$Y = \frac{1 - e^{-\left(\frac{x}{k}\right)}}{1 - e^{-1}} \quad (4.8)$$

Eşitlikteki Y değerleri kırılma dağılım fonksiyonudur ve kırılma matrisinin ilk sütununu oluşturmaktadır. Şekil 4.62’de modelleme çalışmalarında kullanılan kırılma dağılım fonksiyonu sunulmaktadır.



Şekil 4.62. Modelleme çalışmalarında kullanılan kırılma dağılım fonksiyonu tane boyu ilişkisi

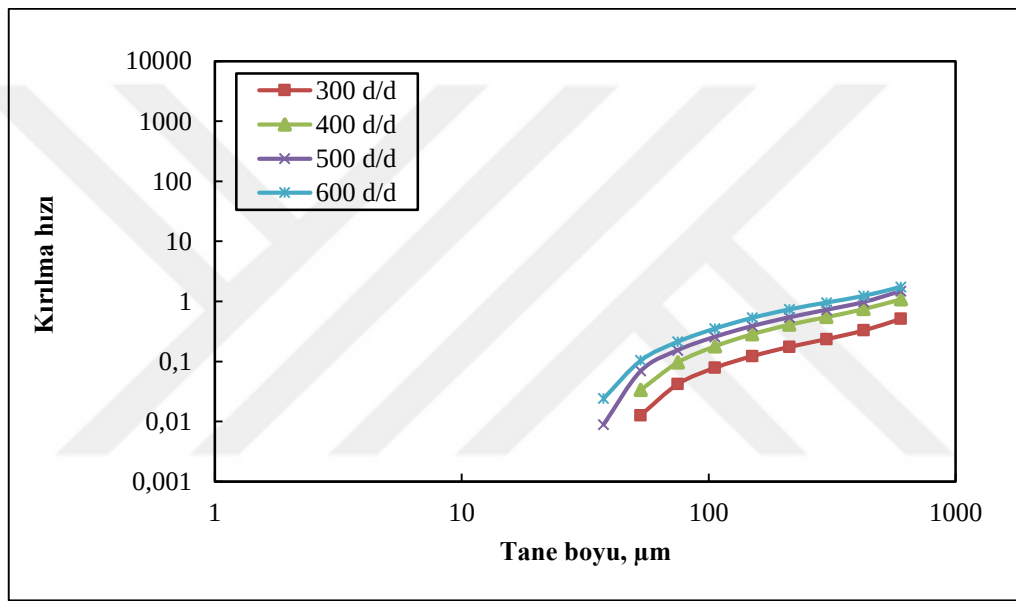
Zamana bağlı kesikli öğütme sonuçlarının modellenmesine yönelik olarak kullanılan kütle denkliği modelinde yer alan r/d parametreleri Eşitlik 4.8’den elde edilen matris kullanılarak mükemmel karışım modeliyle her bir işlem koşulu için belirlenmiştir. Kırılma hızı ile tane boyu değişiminin matematiksel olarak ifadesi için Eşitlik 4.9’da sunulan eşitlik kullanılmıştır.

$$\frac{r}{d} (\text{kırılma hızı}) = ax^{\alpha} \quad (4.9)$$

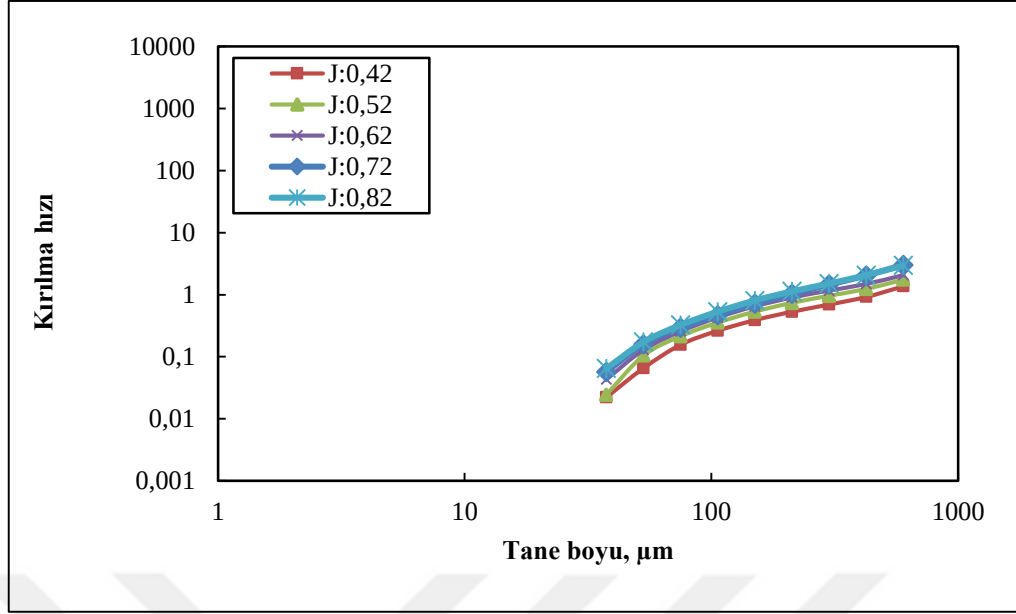
Eşitlikte a ve α model parametreleri olarak yer almaktadır. Bu parametreler excel programında çözücü eklentisi kullanılarak doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. a parametresi ekipman bazlı değişkenleri ifade ederken α ise malzemeye bağlı

değişkenleri tanımlamaktadır. Her bir öğütme zamanı sonucunda malzeme özelliklerindeki (tane boyu dağılımı) değişim α parametresi ile ifade edilmiştir.

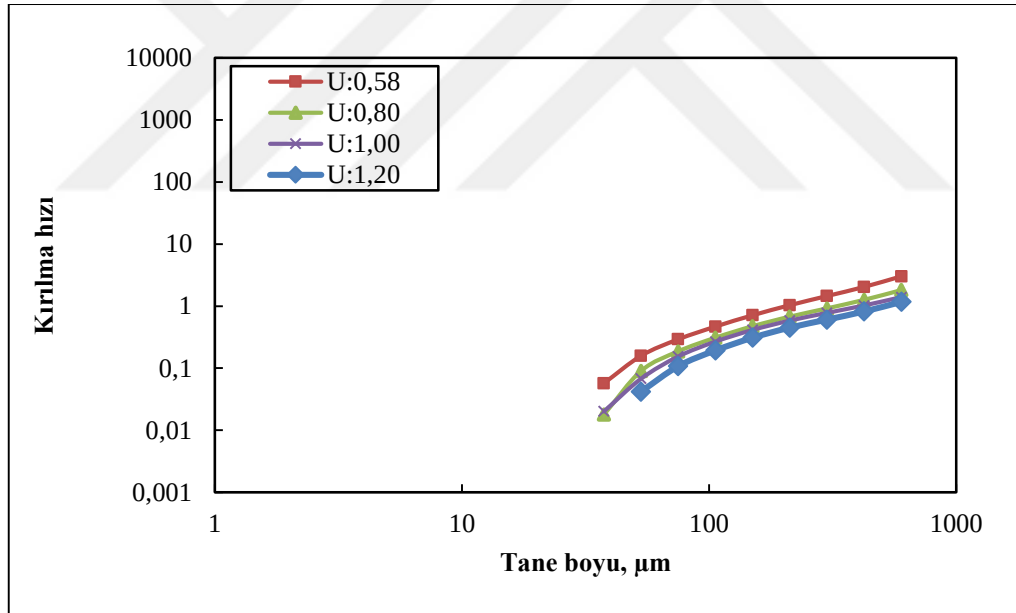
Değirmen işlem değişkenlerinin kontrollü koşullar içerisinde değiştirilmesi neticesinde öğütme enerjilerinde değişim yaratılmıştır. Bu sayede elde edilen 5 dakikalık öğütme süresinde farklı işlem koşulları için hesaplanan kırılma hızları Şekil 63 – Şekil 72’de verilmiştir. Kırılma hızı tane boyu değişimleri incelendiğinde beklenildiği üzere artan öğütme enerjilerine bağlı olarak kırılma hızlarında artış meydana geldiği gözlenmektedir.



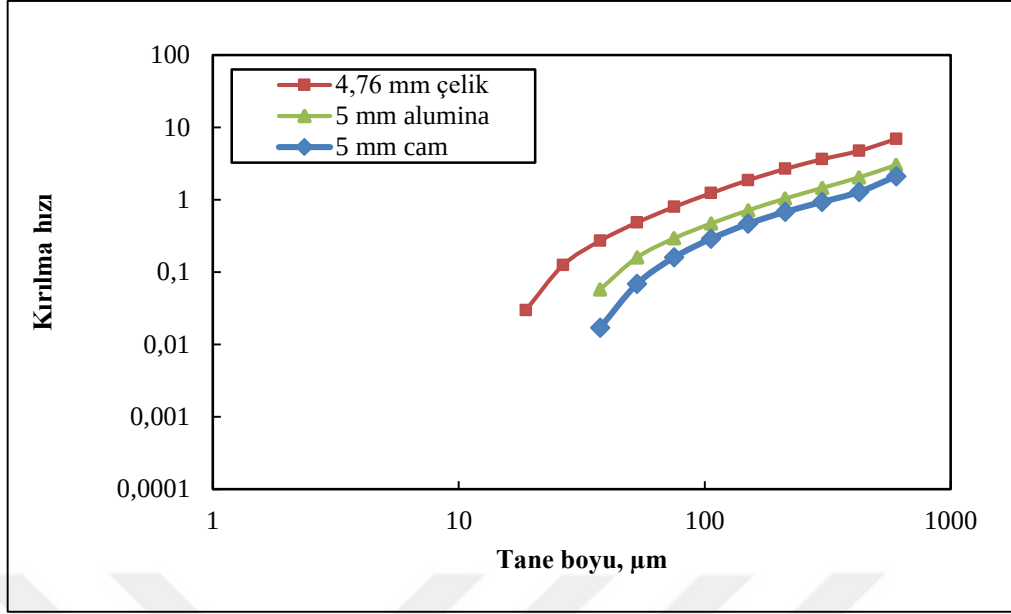
Şekil 4.63. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için farklı karıştırma hızlarının kırılma hızına etkisi



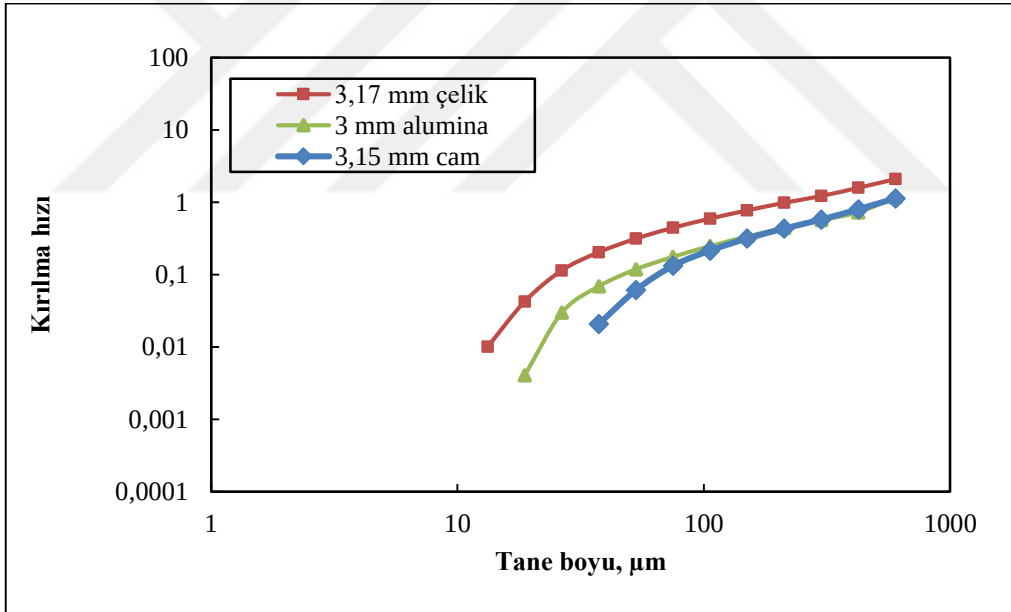
Şekil 4.64. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için bilya doldurma oranının kırılma hızına etkisi



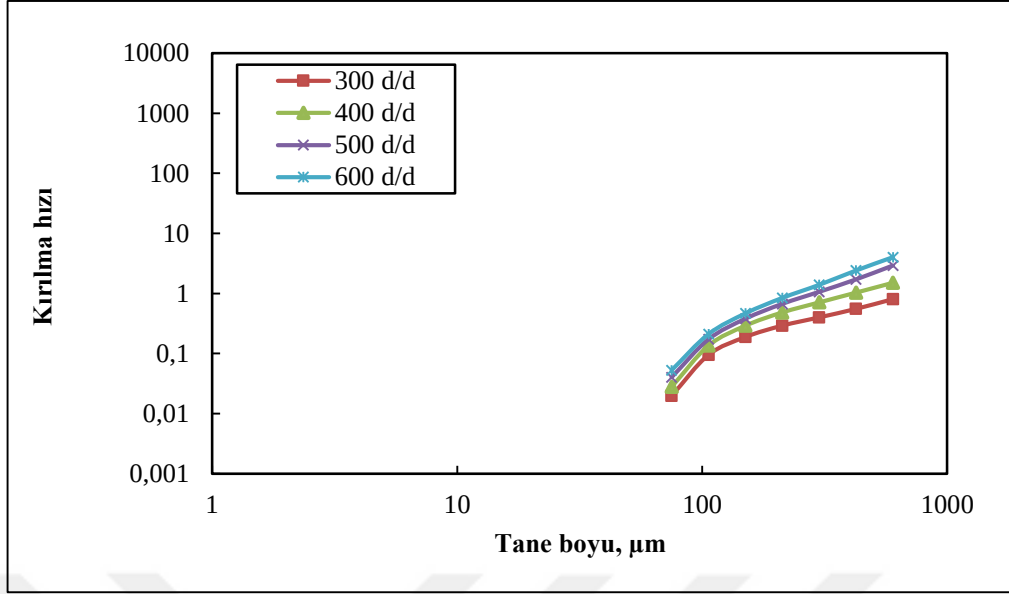
Şekil 4.65. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için farklı bilyalar arası boşluk doldurma oranının kırılma hızına etkisi



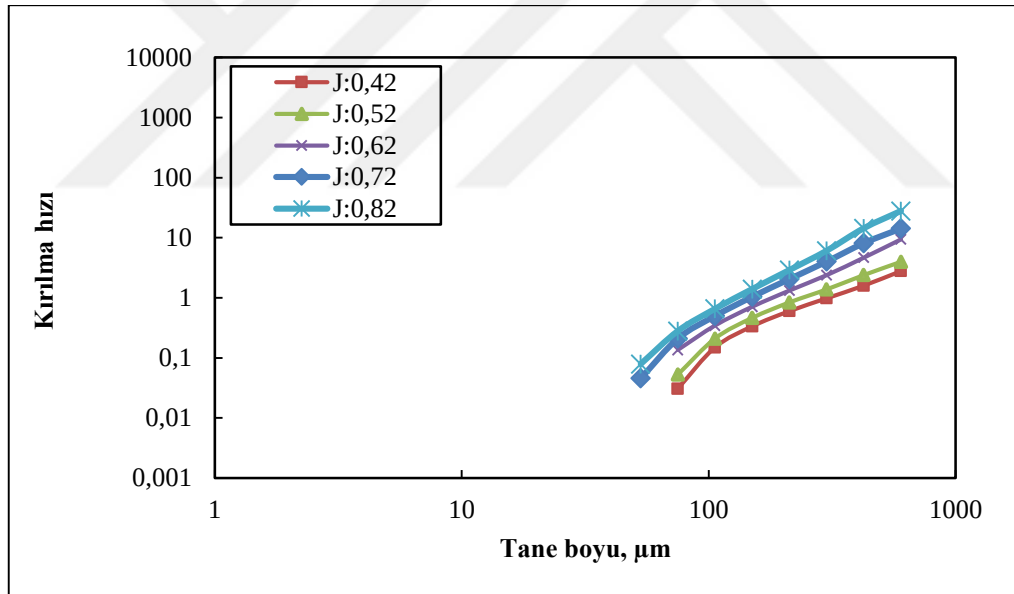
Şekil 4.66. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için iri boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi



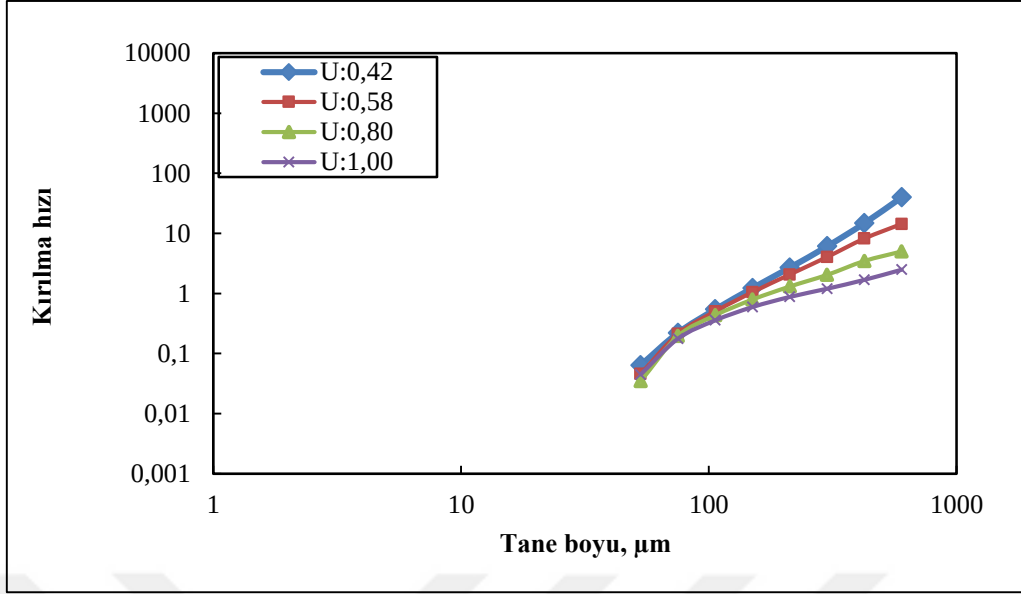
Şekil 4.67. Kuru öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için ince boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi



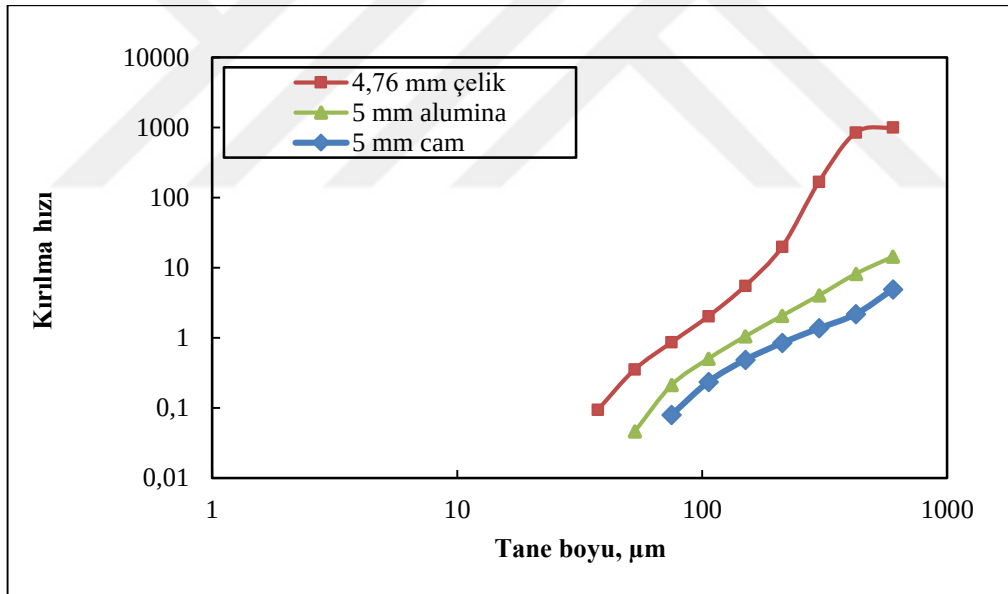
Şekil 4.68. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için iri boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi



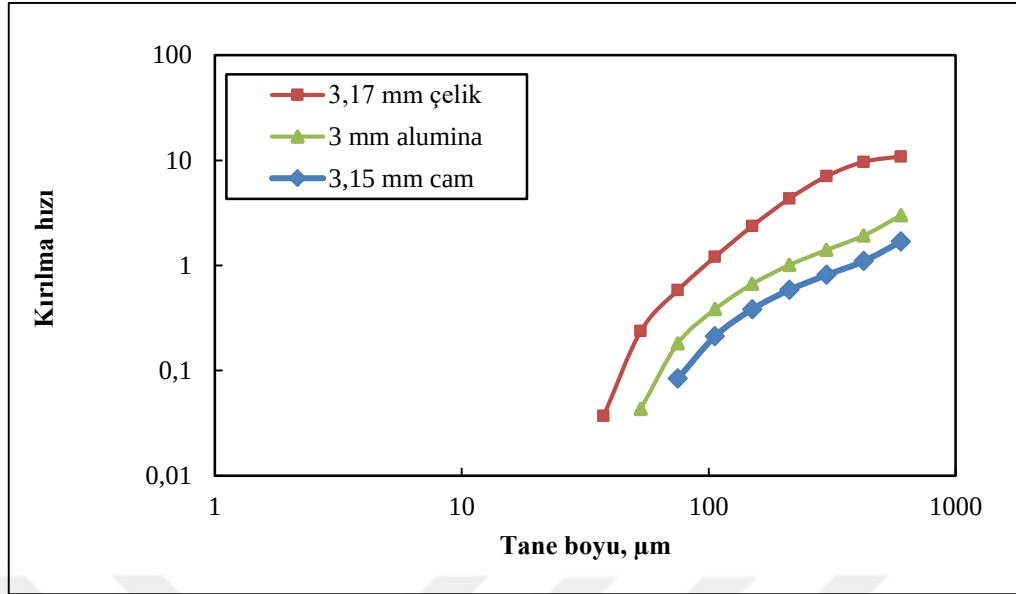
Şekil 4.69. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için bilya doldurma oranının kırılma hızına etkisi



Şekil 4.70. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için farklı bilyalar arası boşluk doldurma oranının kırılma hızına etkisi

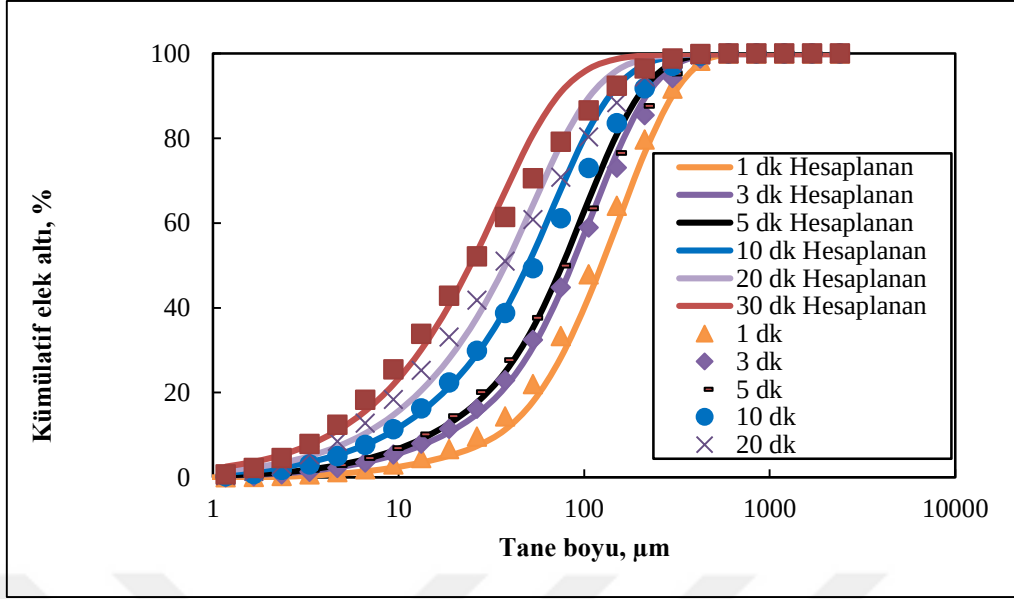


Şekil 4.71. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için iri boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi

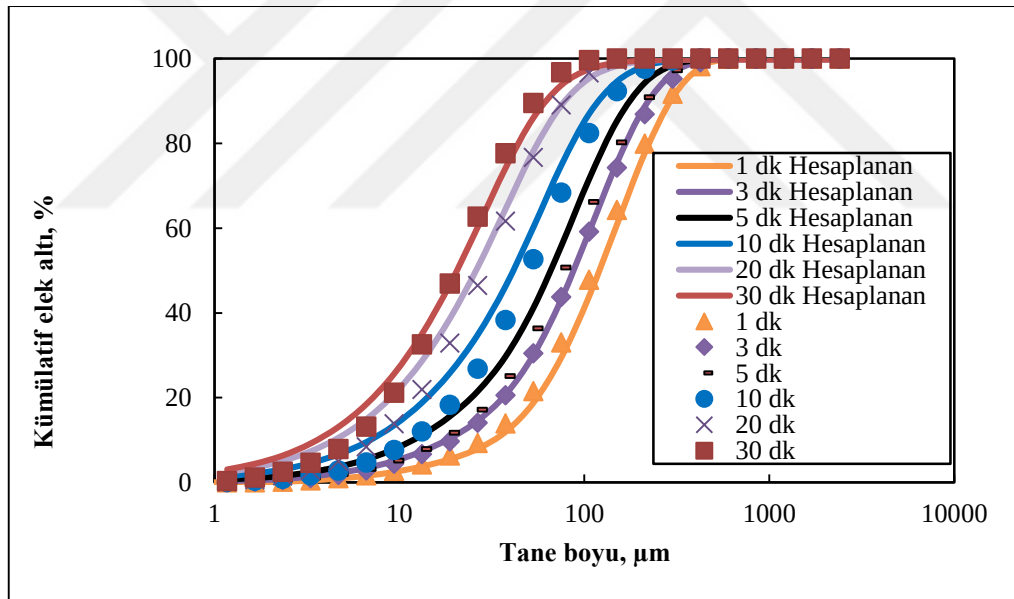


Şekil 4.72. Yaş öğütme koşullarında 5 dakika öğütme süresi için ince boyuttaki farklı bilya yoğunluklarının kırılma hızına etkisi

Kırılma hızı parametrelerinin geri hesaplanması işleminin başarısının belirlenebilmesi amacıyla hesaplama sonrasında elde edilen boyut dağılımları belirlenmiştir. Hesaplamalara örnek teşkil etmek üzere kuru ve yaş öğütme koşulları için 600 d/d karıştırma hızında yapılan deneylerin farklı zamanda öğütülmesi (1-30 dakika) sonucunda elde edilen ölçüm değerleriyle hesaplanan değerlerin tane boyu dağılımları Şekil 4.73 ve Şekil 4.74'te sunulmaktadır. Şekilden de görülebileceği üzere sonuçlar birbiriyle uyum içerisindedir. Her bir deney sonucu için benzer durum söz konusudur. Diğer koşullar için belirlenen boyut dağılımlarıyla, ölçülen boyut dağılımları Ek Açıklama-A'da sunulmuştur.

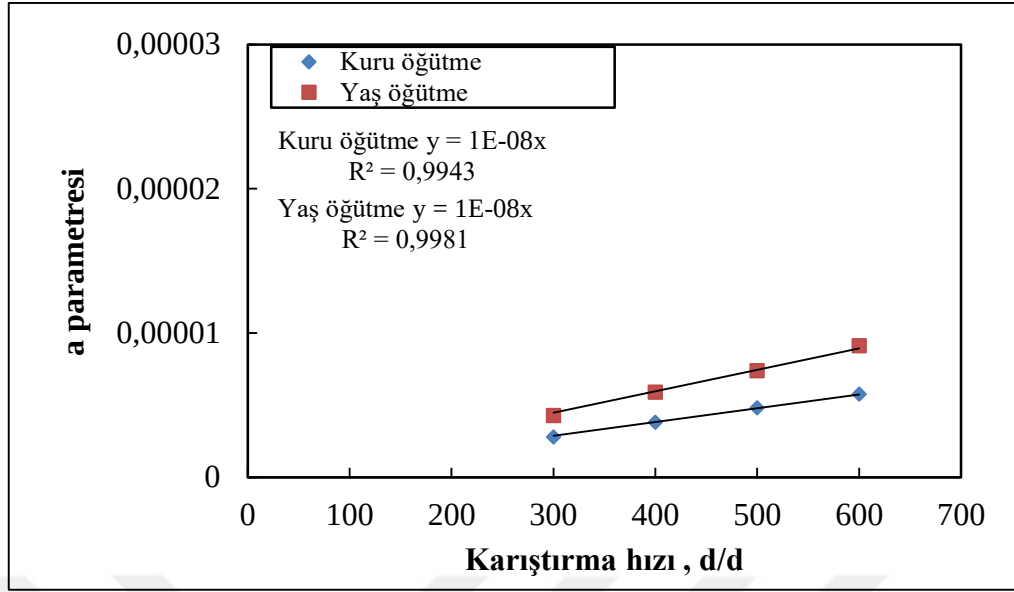


Şekil 4.73. Kuru öğütme koşulları için 600 d/d karıştırma hızında kırılma hızı parametreleri belirlenirken ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

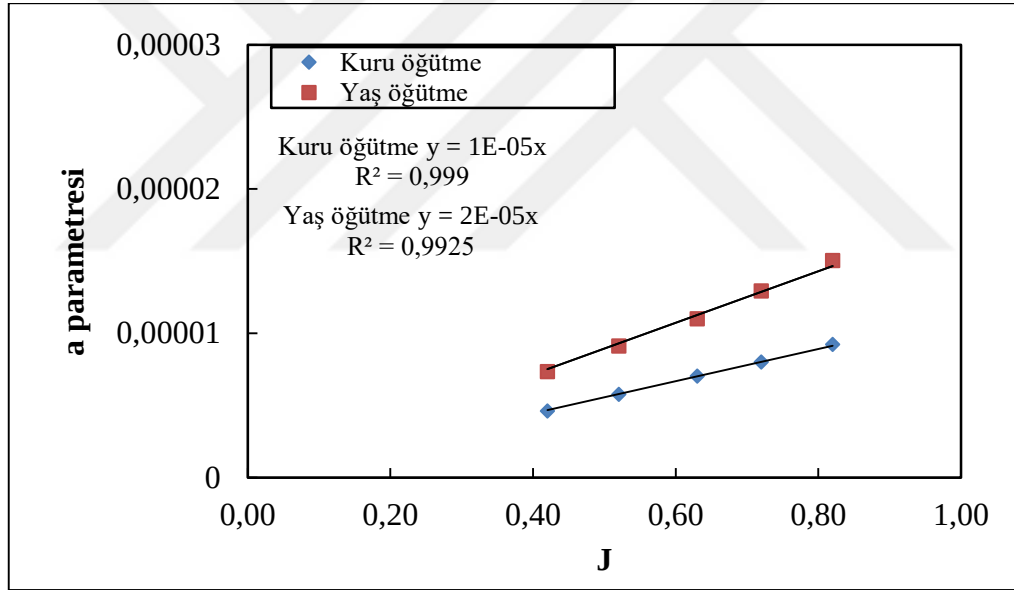


Şekil 4.74. Yaş öğütme koşulları için 600 d/d karıştırma hızında kırılma hızı parametreleri belirlenirken ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

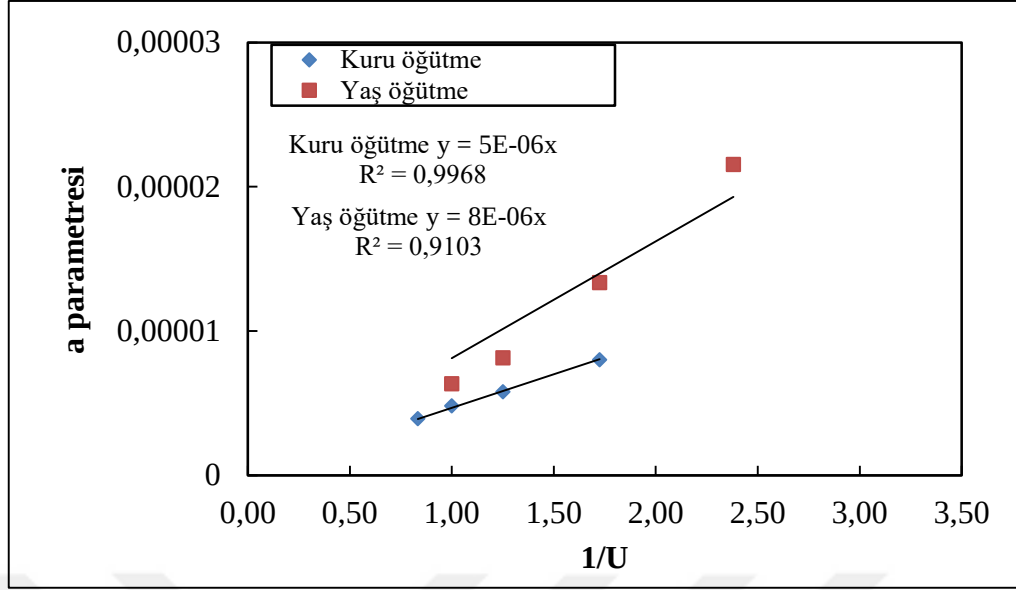
Kırılma hızlarının tane boyu ile değişim verileri kullanılarak Eşitlik 4.9'da verilen matematiksel ifade de yer alan a parametresi değerleri sabit α parametresi değeri için belirlenmiştir. Şekil 4.75-79'da a parametresinin farklı işlem değişkenleri ile değişimi ve her bir ilişkinin uyumunu gösteren R^2 değerleri sunulmaktadır.



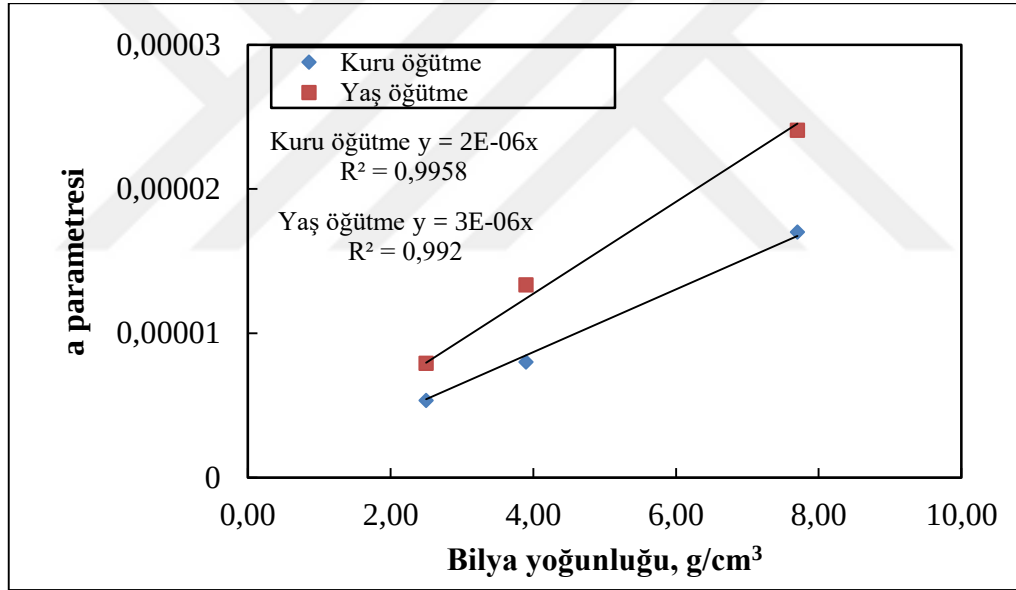
Şekil 4.75. Farklı karıştırma hızlarının a değeri üzerine etkisi



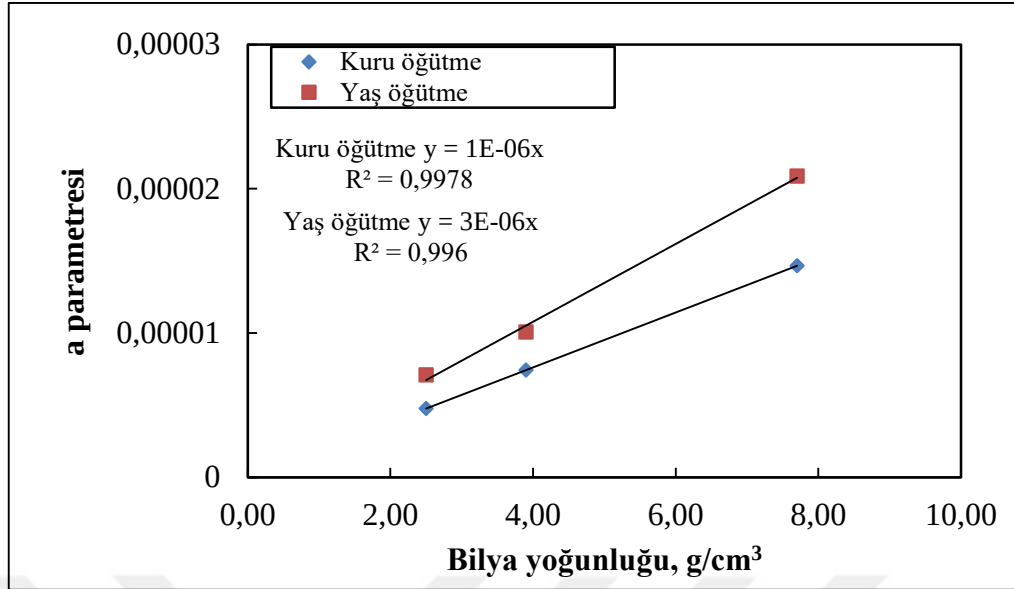
Şekil 4.76. Farklı bilya doldurma oranlarının a değeri üzerine etkisi



Şekil 4.77. Farklı boşluk doldurma oranlarının a değeri üzerine etkisi



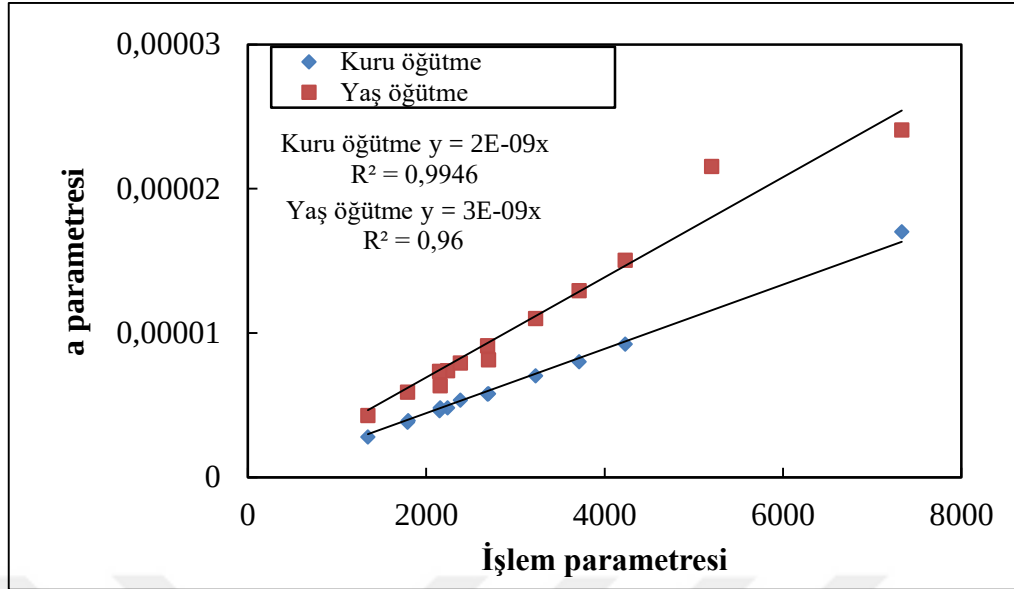
Şekil 4.78. 5 mm bilya için bilya yoğunluğunun a değeri üzerine etkisi



Şekil 4.79. 3 mm bilya için bilya yoğunluğunun a değeri üzerine etkisi

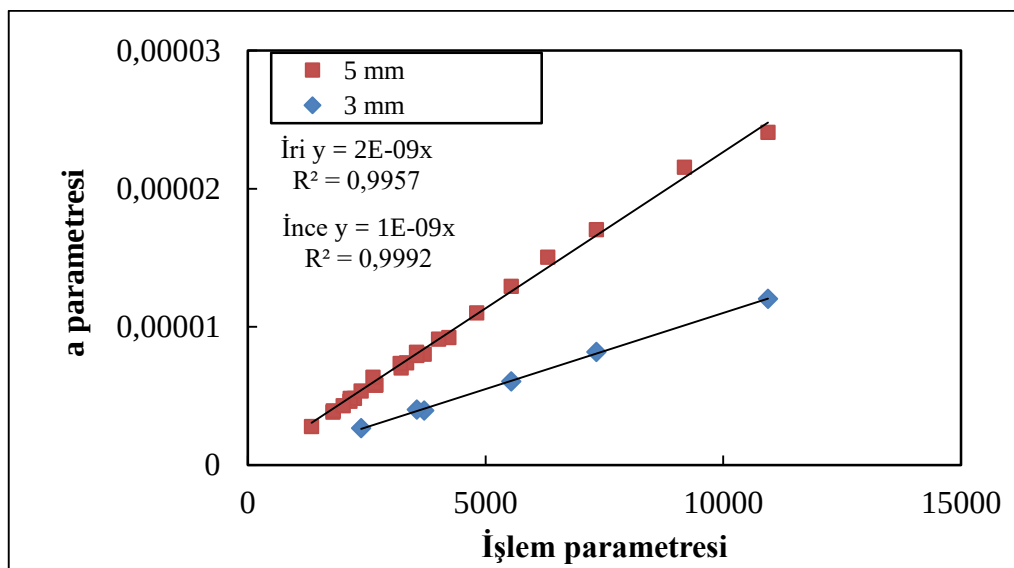
Farklı işlem değişkenleri için kırılma hızı verilerinden belirlenen a parametresi değerlerinin işlem parametreleriyle oldukça uyumlu oldukları (R^2 değerleri 0,99 üzeridedir) gözlenmektedir. Yaş öğütme koşullarında, bilyalar arası malzeme doldurma oranının a parametresine etkisinde R^2 değerleri %91 çıktığı görülmektedir. Bu deney grubunda bilyalar arası malzeme doldurma oranı değişimiyle % katı miktarları da değiştiğinden % katının a parametresine etkisi ayrıca incelenecektir. Görülen uyum değerleri neticesinde model parametresi ayrı ayrı değişkenler için kırılma hızını başarılı bir şekilde ifade etmektedir.

Yüzey alanı modellenmesi sırasında elde edilen sonuçlar neticesinde karıştırma hızı, bilya doldurma oranı, boşluk doldurma oranı, bilya çapı ve yoğunluğu birbirleriyle iç etkileşimi olan parametrelerdir. Şekil 4.75-79'da görüldüğü gibi a parametresi, karıştırma hızı; bilya doldurma oranı ve bilya yoğunluğu değişkenleriyle doğru, boşluk doldurma oranı ile ters ve doğrusal olarak artmaktadır. Bu işlem değişkenlerinin ortak bir ifadesi olarak Eşitlik 4.4'ten elde edilen işlem parametresi değerleri ile a parametresi arasındaki ilişki incelenmiştir (Şekil 4.80).



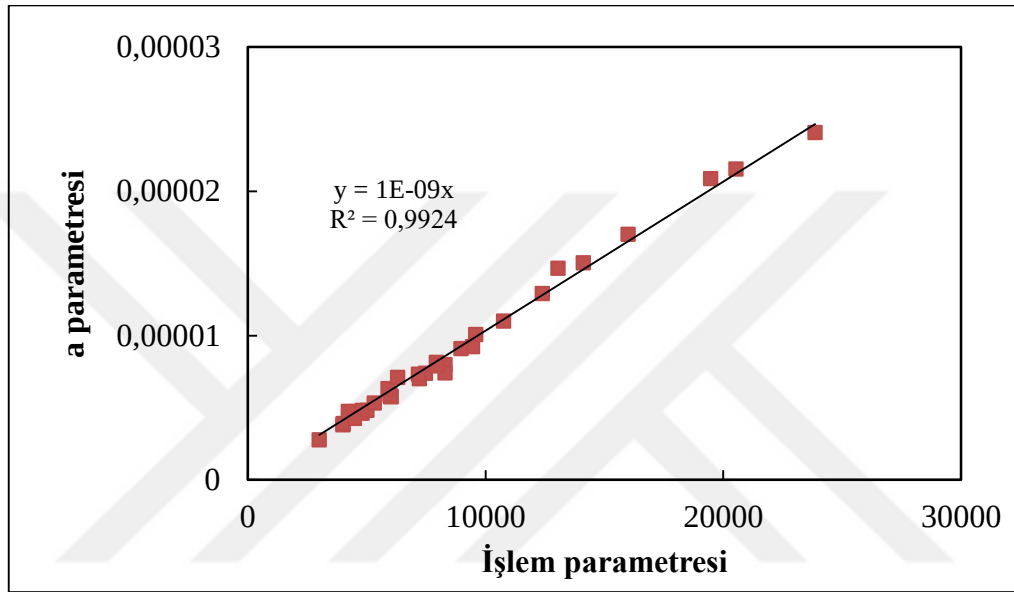
Şekil 4.80. Eşitlik 4.4'ten elde edilen işlem parametresi değerinin a değeri üzerine etkisi

Kuru ve yaş öğütme koşullarını tek bir modelle ifade edebilmek amacıyla yüzey alanı modelleme çalışmalarından elde edilen Eşitlik 4.5 kullanılmıştır. Eşitlikten elde edilen işlem parametre değerleriyle farklı bilya çaplarındaki a parametresi değerlerinin değişimi Şekil 4.81'de verilmiştir. Eşitlik 4.5'ten elde edilen işlem parametresi değerleri ile a parametresi değişiminin oldukça iyi bir belirleme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Bu belirleme katsayıları (R^2) kullanılan iri boyutlu bilya çapları için 0,9957, ince boyutlu bilya çapları için 0,9992 olarak bulunmuştur.



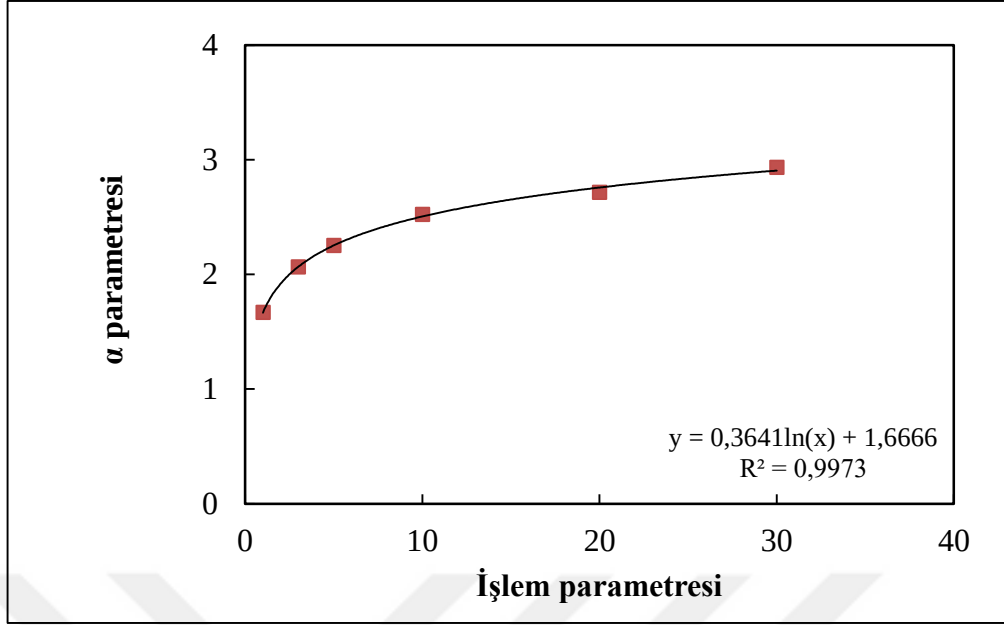
Şekil 4.81. Eşitlik 4.5'ten elde edilen işlem parametresi değerinin a değeri üzerine etkisi

Farklı yoğunluklarda olan bilyaların çaplarının yaklaşık değerleri iri bilya için 5 mm ince bilya çapı için 3 mm dir. Bilya çapıyla a arasındaki değişim yüzey alanı modellemesinde olduğu gibi bilya çapının karekökü olarak ifade edilerek, elde edilen Eşitlik 4.6'da hesaplanan yeni işlem parametresi değerleriyle a parametresi arasındaki ilişki Şekil 4.82'de verilmiştir. Şekil 4.82'de görüldüğü gibi, elde edilen işlem parametresi değerleriyle a parametresi değerleri oldukça iyi belirleme katsayısına sahiptir ($R^2=0,9924$).



Şekil 4.82. Eşitlik 4.6'dan elde edilen işlem parametresi değerinin a değeri üzerine etkisi

Modelleme çalışmaları sırasında öğütme zamanının yansıtılabilmesi amacıyla farklı öğütme zamanları için kırılma hızı parametreleri belirlenmiştir. İndirgenmiş tane boyu dağılımı değişimi incelendiğinde öğütme zamanı Eşitlik 4.9'da sunulan α parametresi üzerinde etkili olmaktadır. Hesaplamalar sabit her bir işlem değişkeni için farklı zaman dilimlerinde yapılmış ve Şekil 4.83'te sunulmuş olan α parametresinin öğütme süresi ile değişimi belirlenmiştir. Gerek kırılma hızı değerlerinin hesaplanması gerekse de a ve α parametrelerinin belirlenmesi sırasında elde edilen uyum değerleri tatmin edici düzeyde olmuştur.



Şekil 4.83. α parametresinin öğütme süresi ile değişimi

Yapılan modelleme çalışmasında değirmen işlem parametrelerinin kırılma hızına etkisi incelenmiş ve kırılma hızı Eşitlik 4.10'da tanımlanmıştır.

$$\frac{r}{d} = \left(\text{Karıştırma hızı} \times \frac{\text{Bilya miktarı}}{\text{Malzeme miktarı}} \times \frac{1}{0,413 \times \ln(\text{katı oranı}) + 1} \times \sqrt{\text{Bilya çapı}} \right) \times 10^{-9} x^{0,36 \ln(t) + 1,667} \quad (4.10)$$

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Kuru Öğütme Deneyleri

5.1.1. Karıştırma hızı deneyleri (300-600 d/d)

Tüm karıştırma hızlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede karıştırma hızı arttıkça daha kısa öğütme süresine gereksinim duyulmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde 600 d/d karıştırma hızı, en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Bu durum, karıştırma hızı arttıkça bilyaların kinetik enerjilerinin artmasından kaynaklanmaktadır.

Tüm karıştırma hızlarında yüzey alanı değerleri zamanla doğrusal olarak artmaktadır (600 d/d hariç). Bu durum yüzey alanındaki artışın zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. Yüzey alanındaki artışın nedeni, mikanın öğütülmesinin ve laminasyonunun (mikanın levhalara/plakalara ayrılması) devam etmesindendir.

Tüm karıştırma hızlarında enerji tüketimi arttıkça, ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek karıştırma hızlarında daha az enerjiye gereksinim vardır. Aynı enerji tüketimlerinde 600 d/d karıştırma hızı en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir.

Tüm karıştırma hızlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır ve aynı öğütme sürelerinde karıştırma hızı arttıkça, enerji tüketimi de genellikle artmaktadır. 600 d/d karıştırma hızında tüketilen enerji ile 500 d/d karıştırma hızında tüketilen enerji yaklaşık olarak aynıdır. Buna neden olarak, 600 d/d karıştırma hızında bilyaların çok hızlı bir şekilde dönmesi sonucu şafta fazla yük binmemesi gösterilebilir.

Aynı enerji tüketimlerinde 600 d/d karıştırma hızında en yüksek yüzey alanlı ürünler elde edilmiştir.

5.1.2. Bilya oranı deneyleri (J: 0,42-0,82)

Tüm bilya oranlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek bilya oranlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim vardır. Aynı öğütme sürelerinde J: 0,82 bilya oranı, en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Bunun nedeni J: 0,82 bilya oranında bilya sayısının artması sonucu, bilya-tane temas sayısının artmasıdır.

Tüm bilya oranlarında yüzey alanı değerleri 10 dakikaya kadar doğrusal sonrasında doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Bu durum, yüzey alanındaki artışın 10 dakika öğütme süresinden sonra yavaşlamaya başladığının bir göstergesidir. 10 dakika öğütme süresinden sonra yüzey alanındaki artışın yavaşlama nedeni, mikanın öğütülmesinin ve laminasyonunun azalmasıdır.

Tüm bilya oranlarında enerji tüketimi arttıkça, ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek bilya oranlarında daha az enerjiye gereksinim vardır. Aynı enerji tüketimlerinde J: 0,82 bilya oranı en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir.

Tüm bilya oranlarında öğütme süresi arttıkça, enerji tüketimi artmaktadır ve aynı öğütme sürelerinde bilya oranı arttıkça, enerji tüketimi artmaktadır. Bunun nedeni, döndürülen bilya sayısının artmasıdır.

Aynı enerji tüketimlerinde J: 0,82 bilya oranı genellikle daha yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Ancak, J: 0,82 bilya oranında malzeme ve bilyaların değirmenden taşma eğilimi vardır. Bu yüzden J: 0,72 bilya doluluk oranı en uygun bilya doluluk oranı tercih edilmelidir.

5.1.3. Boşluk doldurma oranı deneyleri (U: 0,58-1,20)

Tüm boşluk doldurma oranlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede düşük boşluk doldurma oranlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim duyulmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde U: 0,58 boşluk

doldurma oranı en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Bunun nedeni, 0,58 boşluk doldurma oranında malzeme miktarının az olması sonucu bilya-tane temas sayısının fazla olmasıdır.

Yüksek boşluk doldurma oranlarında (U: 1,00 ve U: 1,20) zamanla yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusaldır. Bu durum, bu boşluk doldurma oranlarında yüzey alanındaki artışın (öğütmenin ve laminasyonun) zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. Düşük boşluk doldurma oranlarında (U: 0,58 ve U: 0,80) ise yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusal değildir. Öğütme ve laminasyon U: 0,58'de 10'uncu dakikadan sonra, U: 0,80'de 20'nci dakikadan sonra yavaşlamaktadır.

Tüm boşluk doldurma oranlarında enerji tüketimi arttıkça, değirmenden elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede boşluk doldurma oranı azaldıkça, enerji tüketimi düşmektedir. Aynı enerji tüketimlerinde boşluk doldurma oranı azaldıkça, elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır.

Tüm boşluk doldurma oranlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır ve aynı öğütme sürelerinde boşluk doldurma oranı azaldıkça, enerji tüketimi artmaktadır.

Aynı enerji tüketimlerinde U: 0,58 boşluk doldurma oranında en yüksek yüzey alanlı ürünler elde edilmiştir.

5.1.4. Bilya boyutu ve cinsi deneyleri (İri ve ince; alümina, cam ve çelik)

Tüm bilya boyutları ve cinslerinde öğütme süresi arttıkça elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır ve tüm bilya cinslerinde belirli bir yüzey alanı elde etmede iri bilya kullanıldığında daha kısa öğütme süresine gereksinim vardır. Aynı öğütme sürelerinde tüm bilya cinslerinde 5 mm bilya kullanımı en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Bunun nedeni, iri boyutlu bilyaların çarpma, ezme ve makaslama kuvvetlerinin daha yüksek olmasıdır.

İri ve ince alümina ve cam bilya cinslerinde yüzey alanı değeri zamanla doğrusal bir şekilde artmaktadır. Bu durum, öğütme ve laminasyonun zamanla devam ettiğinin bir

göstergesidir. 4,76 mm ve 3,17 mm çelik bilyada ise yüzey alanı değerleri öğütme başlangıcından hemen sonra zamanla doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Bu durum 4,75 mm ve 3,17 mm çelik bilyada öğütme ve laminasyonun öğütme başlangıcından hemen sonra yavaşlamaya başladığının bir göstergesidir.

Tüm bilya boyutları ve cinslerinde enerji tüketimi arttıkça, değirmenden elde edilen ürünlerin yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede tüm bilya cinslerinde iri bilyalar kullanıldığında daha az enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca, aynı enerji tüketimlerinde iri bilyalar tüm bilya cinslerinde daha yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir.

Tüm bilya boyutları ve cinslerinde öğütme süresi arttıkça, enerji tüketimi artmaktadır ve tüm bilya cinslerinde aynı öğütme sürelerinde bilya boyutu arttıkça özgül enerji tüketimi de artmaktadır. Bunun nedeni, iri boyutlu bilyaların karıştırılmasının daha güç olmasıdır.

Tüm bilya cinslerinde 5 mm bilya kullanımı enerji tüketimini bir miktar arttırmakta, fakat ürün yüzey alanlarını önemli ölçüde arttırmaktadır.

5 mm cam bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı diğer cins 5 mm bilya kullanımlarına göre bir miktar düşüktür, fakat bu cins bilya ile elde edilen ürünün yüzey alanı oldukça küçüktür. 3,15 mm cam bilya kullanımında da durum benzerdir.

4,76 mm çelik bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı diğer cins iri bilya kullanımlarına göre bir miktar fazla olmasına rağmen; bu cins bilya ile en yüksek yüzey alanlı ürünler elde edilmektedir. 4,76 mm çelik bilya deneylerinde gözlemlenen bir diğer sonuç da öğütülmüş ürünün renginin beyazdan bir miktar uzaklaşmasıdır. 3,17 mm çelik bilya kullanımında da durum benzerdir.

5.2. Yaş Öğütme Deneyleri

5.2.1. Karıştırma hızı deneyleri (300-600 d/d)

Tüm karıştırma hızlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanlı ürün elde etmede yüksek karıştırma hızlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim vardır. Aynı öğütme sürelerinde 600 d/d karıştırma hızı en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Bu durum, karıştırma hızı arttıkça bilyaların kinetik enerjilerinin artmasından kaynaklanmaktadır.

300 d/d karıştırma hızında zamanla yüzey alanı değerleri doğrusal bir şekilde artmaktadır. Bu, 300 d/d karıştırma hızında öğütme ve laminasyonun zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. Diğer karıştırma hızlarında ise yüzey alanı değerleri 20 dakikaya kadar doğrusal daha sonra doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Bu durum, 20'nci dakikaya kadar öğütme ve laminasyonun devam ettiğini ve daha sonra yavaşladığını göstermektedir.

Tüm karıştırma hızlarında enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları da artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek karıştırma hızlarında daha az enerjiye gereksinim vardır. Aynı enerji tüketimlerinde 600 d/d karıştırma hızı en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir.

Tüm karıştırma hızlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde karıştırma hızı arttıkça, enerji tüketimi de genellikle artmaktadır. 600 d/d karıştırma hızında tüketilen enerji 400 d/d karıştırma hızında tüketilen enerjiden bir miktar daha düşüktür. Buna neden olarak bilyaların çok hızlı bir şekilde dönmesi sonucu şafta fazla yük binmemesi gösterilebilir.

Tüm karıştırma hızlarında 30 dakika öğütme süresinde elde edilen ürünlerin d_{10} boyutları yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum, karıştırma hızının artmasının değirmende aşırı öğünmeye neden olmadığının bir göstergesidir.

600 d/d karıştırma hızındaki yaş öğütme sonuçları ile aynı koşullarda kuru öğütme sonuçları karşılaştırıldığında, aynı kapasitede yaş öğütmede enerji tüketimi %16,9 azalmakta ve ürün yüzey alanı %21.9 artmaktadır.

5.2.2. Bilya oranı deneyleri (J: 0,42-0,82)

Tüm bilya oranlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek bilya oranlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim vardır. Aynı öğütme sürelerinde J: 0,82 bilya oranı en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Bunun nedeni bu bilya oranında bilya sayısının artması ve bunun sonucunda bilya-tane temas sayısının artmasıdır.

J: 0,42 ve 0,52 bilya oranlarında yüzey alanı değerleri zamanla lineer olarak artmaktadır. Bu durum, bu bilya oranlarında öğütmenin ve laminasyonun zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. Ancak, J: 0,62-0,82 bilya oranlarında yüzey alanı değerleri 10 dakikaya kadar doğrusal sonrasında doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Bu durum, yüzey alanındaki artışın 10 dakika öğütme süresinden sonra yavaşlamaya başladığının bir göstergesidir. 10 dakika öğütme süresinden sonra yüzey alanındaki artışın yavaşlama nedeni, mikanın öğünmesinin ve laminasyonunun azalmasından kaynaklanmaktadır.

Tüm bilya oranlarında enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları da artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede yüksek bilya oranlarında daha az enerjiye gereksinim vardır. Aynı enerji tüketimlerinde bilya oranı arttıkça, elde edilen ürünlerin yüzey alanı değerleri artmaktadır.

Tüm bilya oranlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi de artmaktadır ve aynı öğütme sürelerinde bilya oranı arttıkça, enerji tüketimi de artmaktadır. Bunun nedeni döndürülecek bilya sayısının artmasıdır.

J: 0,82 bilya oranı en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Ancak, J: 0,82 bilya oranında malzeme ve bilyaların değirmenden taşma eğilimi gözlenmiştir. Bu nedenden dolayı kuru öğütmede olduğu gibi yaş öğütmede de J: 0,72 bilya doluluk oranı en uygun bilya doluluk oranı olarak belirlenmiştir.

J: 0,72 bilya oranındaki yaş öğütme sonuçları ile aynı koşullarda kuru öğütme sonuçları karşılaştırıldığında, aynı kapasitede yaş öğütmede enerji tüketimi %17,4 azalmakta ve ürün yüzey alanı %61,5 artmaktadır.

5.2.3. Katı oranı deneyleri (K: 0,35-0,65)

Tüm katı oranlarında öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmakta ve belirli bir yüzey alanı elde etmede düşük katı oranlarında daha kısa öğütme süresine gereksinim duyulmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde 0,35 katı oranı en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Bunun nedeni, 0,35 katı oranında malzeme miktarı az olduğundan, bilya-tane temas sayısının yüksek olmasıdır.

K: 0,55 ve K: 0,65 katı oranlarında zamanla yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusaldır. Bu durum, öğütme ve laminasyonun etkisiyle yüzey alanındaki artışın zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. K: 0,35 ve K: 0,45 katı oranlarında ise sırasıyla 5'inci ve 10'uncu dakikadan sonra yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusallıktan uzaklaşmaktadır. Bu durum bu sürelerden sonra öğünmenin ve laminasyonun yavaşladığını göstermektedir.

Tüm katı oranlarında enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede düşük katı oranlarında daha az enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Aynı enerji tüketimlerinde düşük katı oranları daha yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir.

Tüm katı oranlarında öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. Aynı öğütme sürelerinde katı oranı azaldıkça, enerji tüketimi artmaktadır. Bunun nedeni öğütülen malzeme miktarının azalmasıdır.

K: 0,45 katı oranındaki yaş öğütme sonuçları ile aynı koşullarda kuru öğütme sonuçları karşılaştırıldığında, aynı kapasitede yaş öğütmede enerji tüketimi %17,4 azalmakta ve ürün yüzey alanı %61,5 artmaktadır.

5.2.4. Bilya boyutu ve cinsi deneyleri (İri ve ince; alümina, cam ve çelik)

Tüm bilya boyutları ve cinslerinde öğütme süresi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede iri bilya kullanıldığında tüm bilya cinslerinde daha kısa öğütme süresine gereksinim vardır. Aynı öğütme sürelerinde 5 mm bilya kullanımı tüm bilya cinslerinde en yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir.

İri ve ince alümina ve cam bilya cinslerinde yüzey alanı değerlerindeki artış doğrusala yakındır. Bu durum, öğünmenin ve laminasyonun zamanla devam ettiğinin bir göstergesidir. İri ve ince çelik bilyada ise yüzey alanı değerleri öğütme başlangıcından hemen sonra zamanla doğrusal olamayan bir şekilde artmaktadır. Bu durum İri ve ince çelik bilyada öğünmenin ve laminasyonun zamanla azaldığını göstermektedir.

Tüm bilya boyutları ve cinslerinde enerji tüketimi arttıkça ürün yüzey alanları artmaktadır ve belirli bir yüzey alanı elde etmede iri bilyalar kullanıldığında alümina ve cam bilyada daha az enerjiye gereksinim vardır. Aynı enerji tüketimlerinde iri bilyalar alümina ve cam bilya cinslerinde daha yüksek yüzey alanı değerleri vermektedir. Aynı enerji tüketimlerinde İri ve ince çelik bilya kullanımında ürün yüzey alanları yaklaşık olarak aynıdır.

Tüm bilya boyutları ve cinslerinde öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmaktadır ve aynı öğütme sürelerinde bilya boyutu arttıkça alümina ve çelik bilyada özgül enerji tüketimi artmaktadır. İri ve ince cam bilya kullanımında tüm öğütme sürelerinde enerji tüketimleri yaklaşık olarak aynıdır.

Alümina ve cam bilyada ince bilya yerine iri bilya kullanımı enerji tüketimini bir miktar arttırmakta, fakat ürün yüzey alanlarını önemli ölçüde arttırmaktadır. Çelik bilyada ise ince bilya yerine iri bilya kullanımı enerji tüketimi bir miktar arttırmakta, fakat ürün yüzey alanını önemli ölçüde değiştirmemektedir (4,76 mm çelik bilya ile 3,17 mm çelik bilya yaklaşık aynı yüzey alanlı ürünler vermektedir).

İri cam bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı diğer cins iri bilya kullanımlarına göre bir miktar düşüktür, fakat bu cins bilya ile elde edilen ürünün yüzey alanı da diğer bilya cinslerine göre oldukça düşüktür. İnce cam bilya kullanımında da benzer eğilim vardır.

İri çelik bilya kullanımında tüketilen enerji miktarı diğer cins iri bilya kullanımlarına göre bir miktar fazla olmasına rağmen; bu cins bilya ile en yüksek yüzey alanlı ürün elde edilmektedir. İri çelik bilya deneylerinde gözlemlenen bir diğer sonuç da öğütülmüş ürünün renginin beyazdan bir miktar uzaklaşmasıdır. İnce çelik bilya kullanımında da benzer eğilim vardır.

Yaş öğütmede 3,15 mm cam bilya kullanılarak 62,234 kWs/t enerji tüketimiyle yüzey alanı 6827 cm²/g olan bir ürün elde edilebilmektedir. Yaklaşık aynı yüzey alanındaki bir ürün (6808 cm²/g) kuru öğütmede 3 mm alümina bilya kullanılarak 76,343 kWs/t enerji tüketimiyle elde edilebilmektedir. Kuru öğütmede tüketilen enerji miktarı yaş öğütmeye göre oldukça yüksektir.

Yaş öğütme ile iri cam bilya kullanılarak 63,592 kWs/t enerji tüketimiyle yüzey alanı 8965 cm²/g olan bir ürün elde edilebilmektedir. Yaklaşık aynı yüzey alanındaki bir ürün (9246 cm²/g) aynı kapasitede kuru öğütme ile ince çelik bilya kullanılarak 94,304 kWs/t enerji tüketimiyle elde edilebilmektedir.

Yaş öğütmede 5 mm cam bilya kullanılarak 63,592 kWs/t enerji tüketimiyle yüzey alanı 8965 cm²/g olan bir ürün elde edilebilmektedir. Yaklaşık aynı yüzey alanındaki bir ürün (8470 cm²/g) kuru öğütmede 5 mm alümina bilya kullanılarak 85,281 kWs/t enerji tüketimiyle elde edilebilmektedir. Kuru öğütmede tüketilen enerji miktarı yaş öğütmeye göre daha yüksektir.

5.3. Kuru ve Yaş Öğütmenin Optimum Koşullarında Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Kuru öğütme ile 30 dakika öğütme süresinde (85,281 kWs/t enerji tüketimi ile) yüzey alanı 8470 cm²/g olan bir ürün 0,324 kg/s kapasite ile elde edilmiştir. Yaş öğütme ile ise 30 dakika öğütme süresinde (70,409 kWs/t enerji tüketimi ile) yüzey alanı 13677 cm²/g olan bir ürün aynı kapasite ile elde edilmiştir.

5.4. Modelleme Çalışmaları

Bu çalışma kapsamında ayrıca özgül yüzey alanına ($\Delta S_{w\infty}$) ve kırılma hızına (r/d) bağlı kesikli öğütme modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller:

5.4.1. Yüzey alanına matematiksel model

$$\Delta S_w = (1,8119 \times \text{Karıştırma hızı} \times \frac{\text{Bilya miktarı}}{\text{Malzeme miktarı}} \times \frac{1}{0,413 \times \ln(\text{katı oranı}) + 1} \times \sqrt{\text{Bilya çapı}}) \times (1 - \exp^{-0,0203t})$$

5.4.2. Kırılma hızına bağlı matematiksel model

$$r/d = (\text{Karıştırma hızı} \times \frac{\text{Bilya miktarı}}{\text{Malzeme miktarı}} \times \frac{1}{0,413 \times \ln(\text{katı oranı}) + 1} \times \sqrt{\text{Bilya çapı}}) \times 10^{-9} x^{0,36 \ln(t) + 1,667}$$

5.5. Öneriler

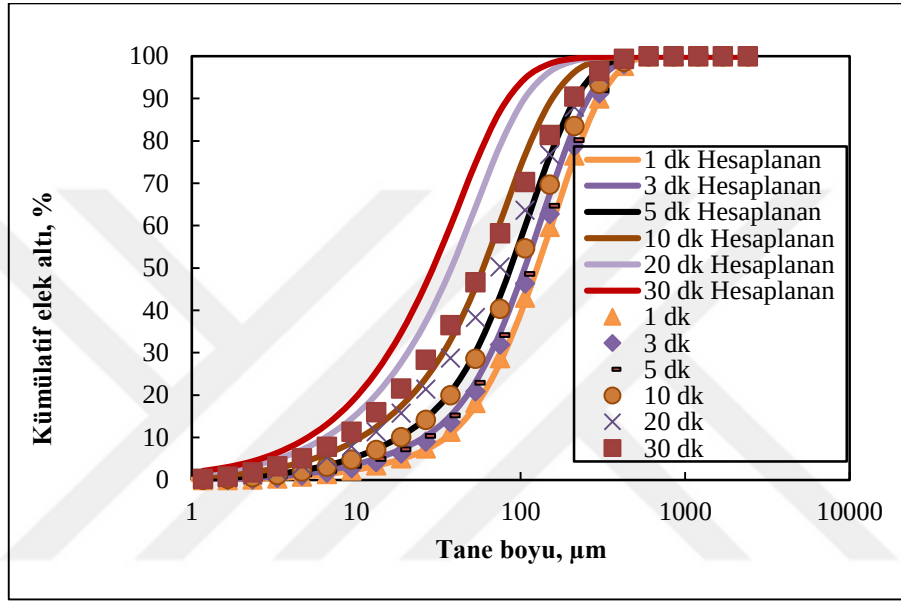
Deneylerde kullanılan atritör değirmen, kesikli çalışan bir değirmendir. Aynı deneylerin sürekli çalışan bir değirmende tekrarlanmasında yarar vardır.

Geliştirilen model yapısı mikanın kuru ve yaş öğütme koşullarına bağlı olarak türetilmiştir. Farklı malzemeler için de modelleme çalışmalarının yürütülerek malzeme etkisinin model yapısına yansıtılması gerekmektedir. Modelin ampirik formundan yarı ampirik formuna geçmesi için daha fazla çalışma yapılması önerilmektedir.

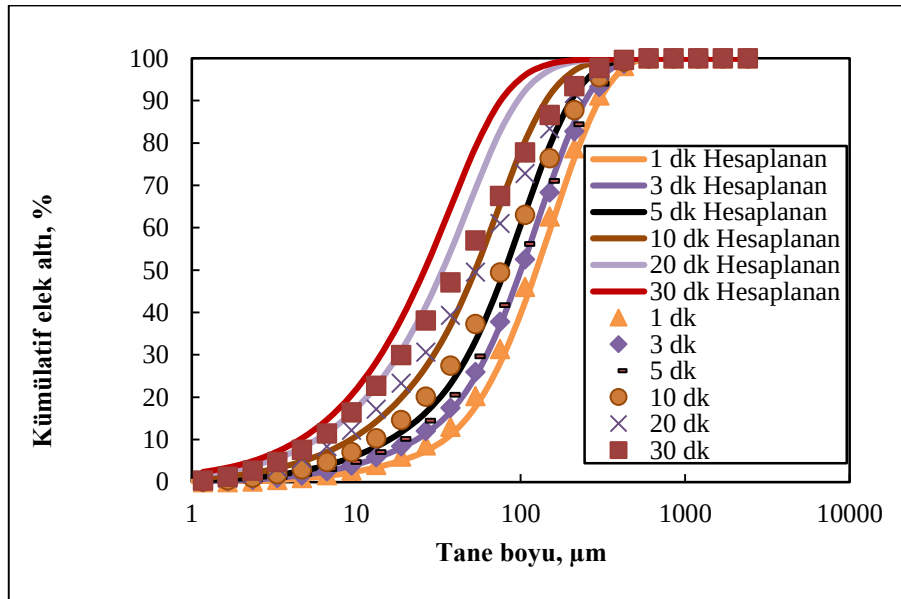
EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama-A Ölçülen ve Hesaplanan Tane Boyu Dağılımları

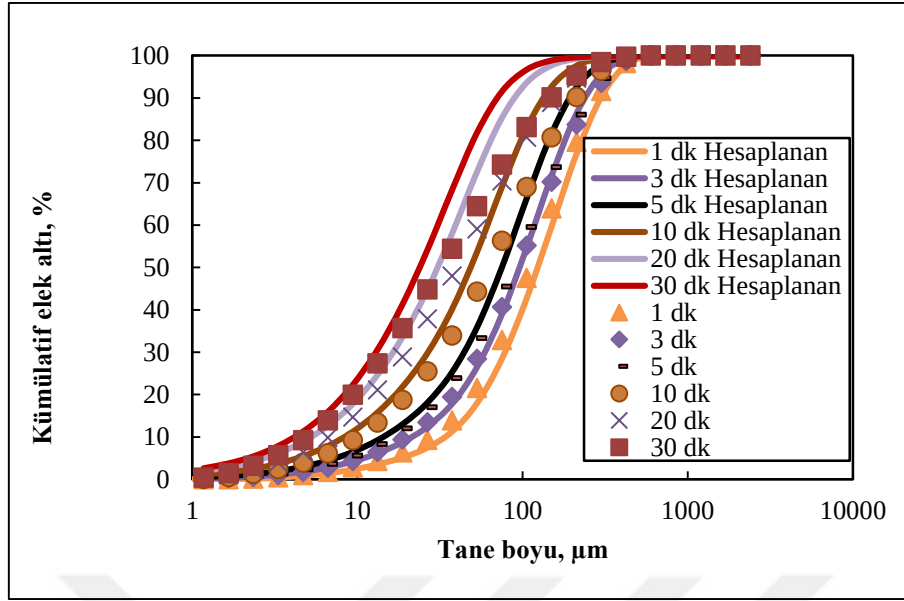
Farklı işlem parametreleri için ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları



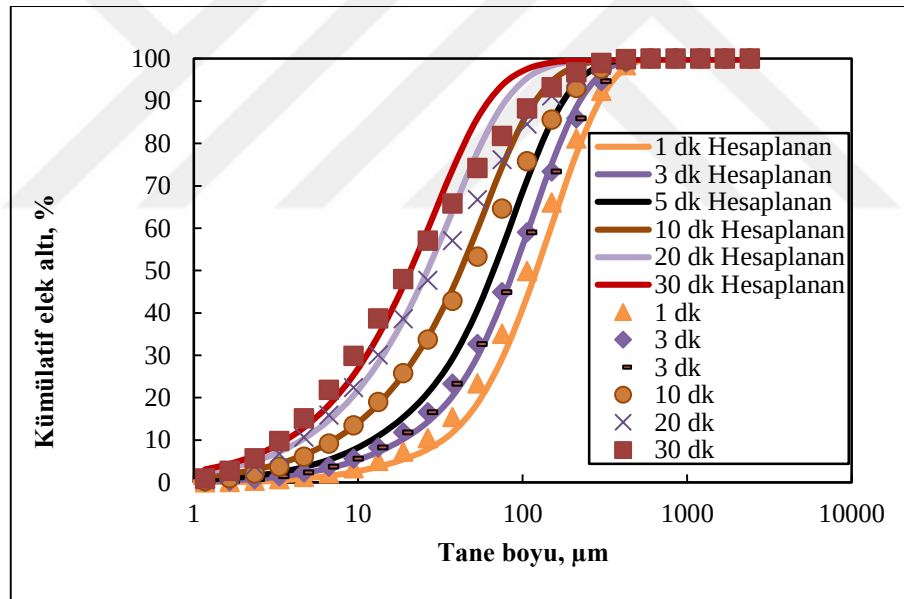
Şekil A.1. Kuru öğütme koşullarında 300 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



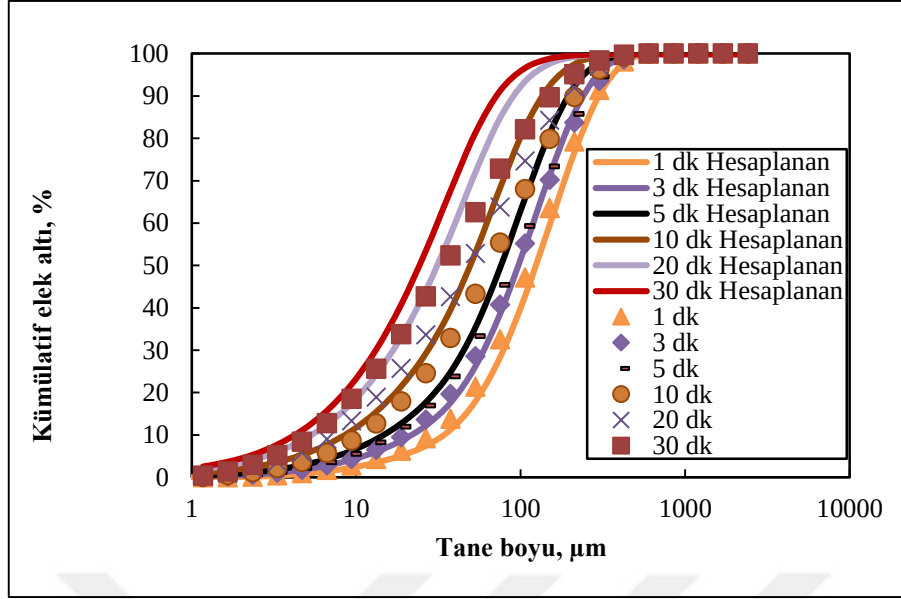
Şekil A.2. Kuru öğütme koşullarında 400 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



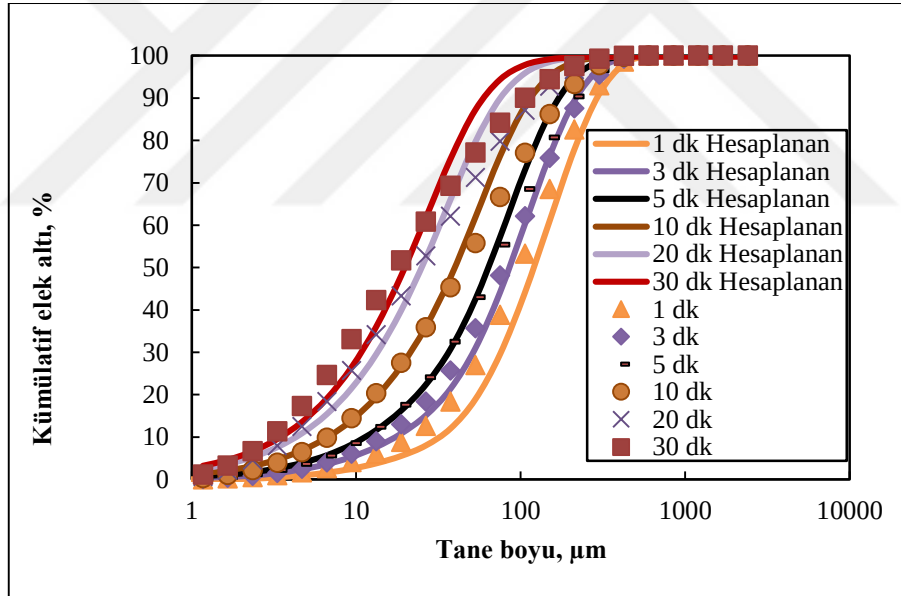
Şekil A.3. Kuru öğütme koşullarında 500 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



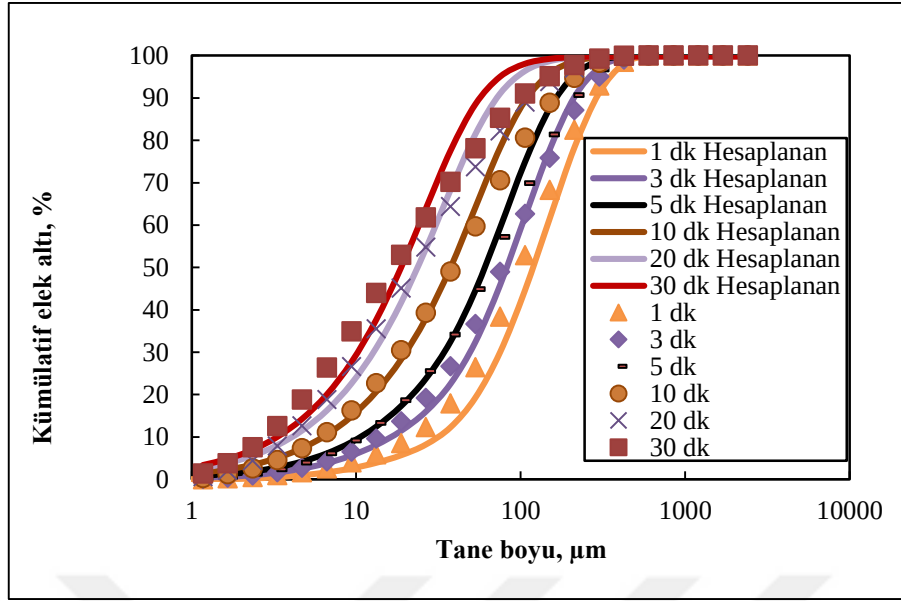
Şekil A.4. Kuru öğütme koşullarında J:0,63 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



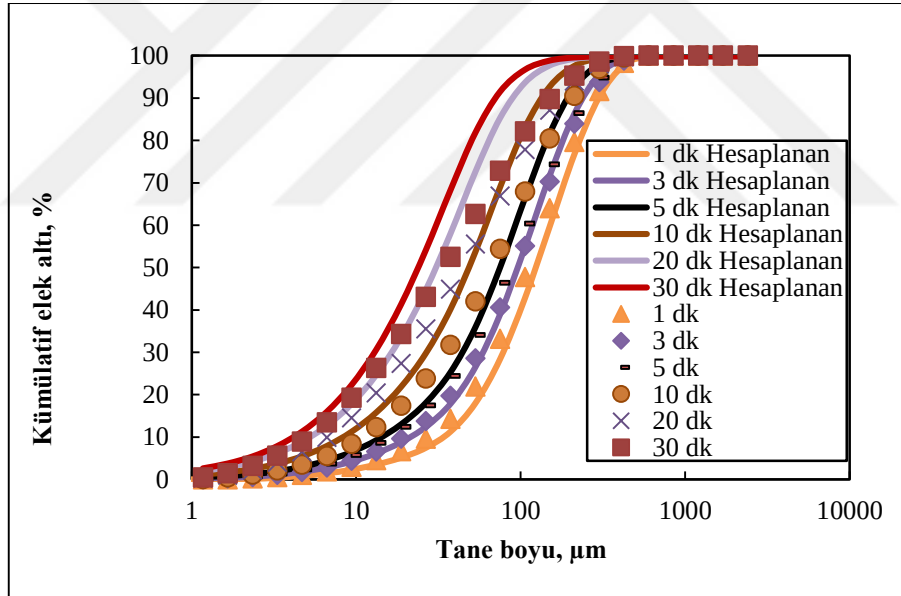
Şekil A.5. Kuru öğütme koşullarında J:0,42 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



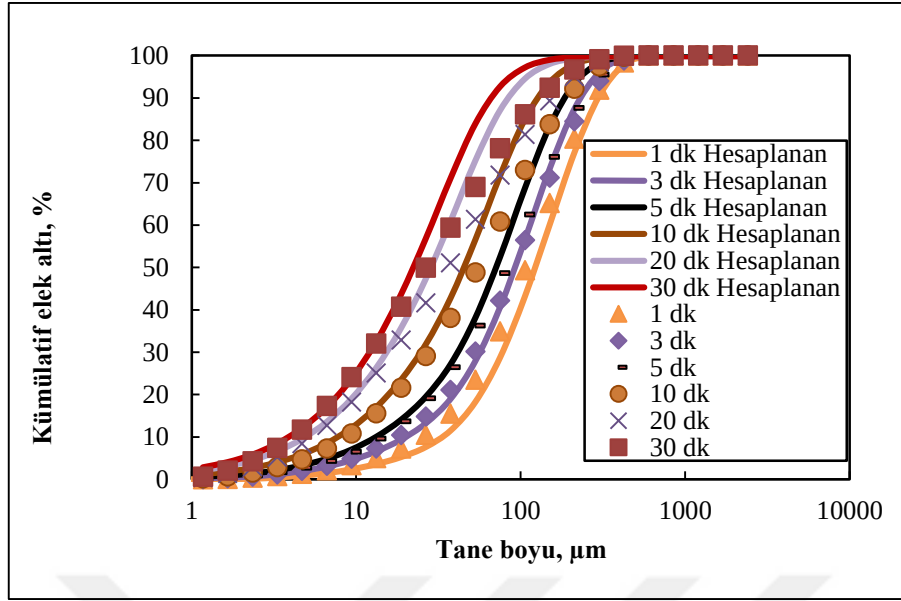
Şekil A.6. Kuru öğütme koşullarında J:0,72 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



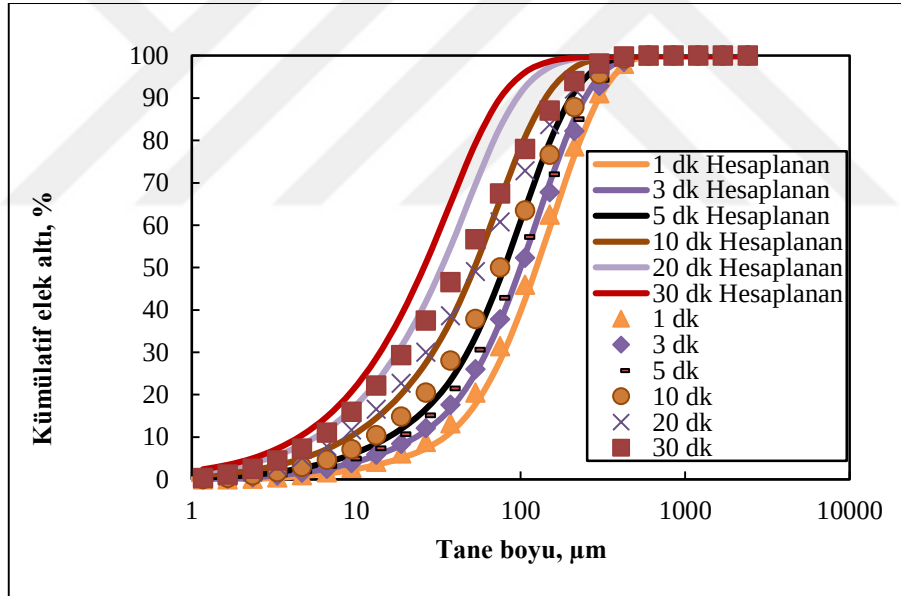
Şekil A.7. Kuru öğütme koşullarında J:0,82 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



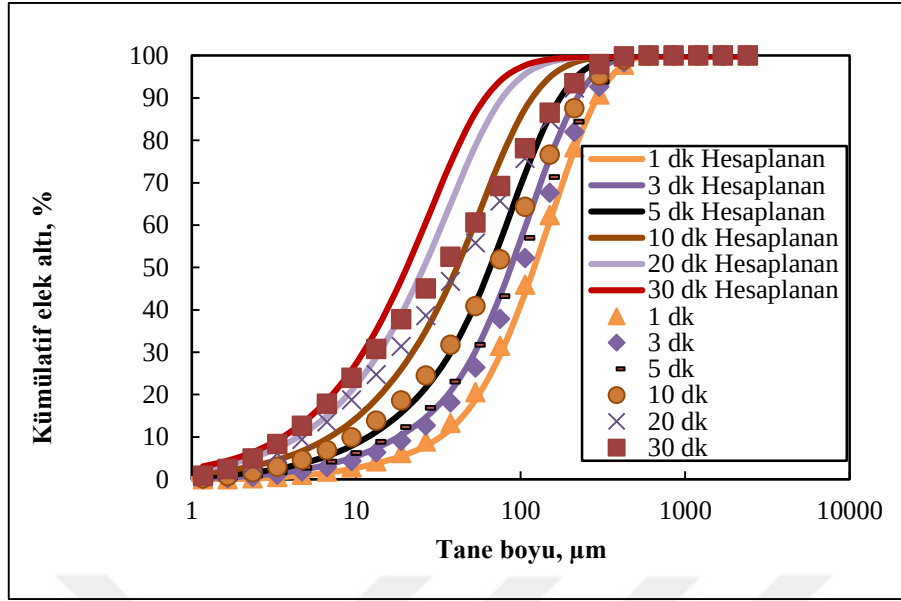
Şekil A.8. Kuru öğütme koşullarında U:1,00 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



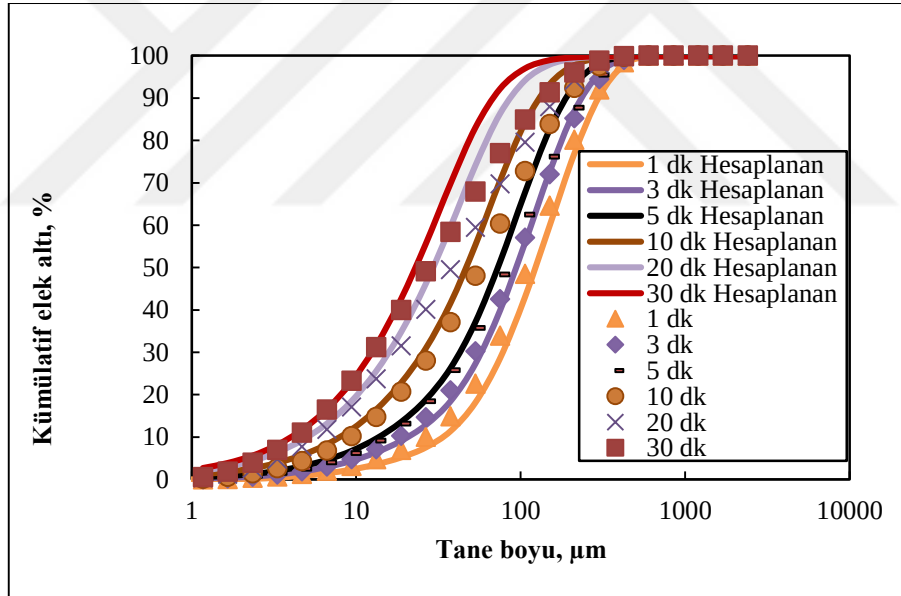
Şekil A.9. Kuru öğütme koşullarında U:0,80 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



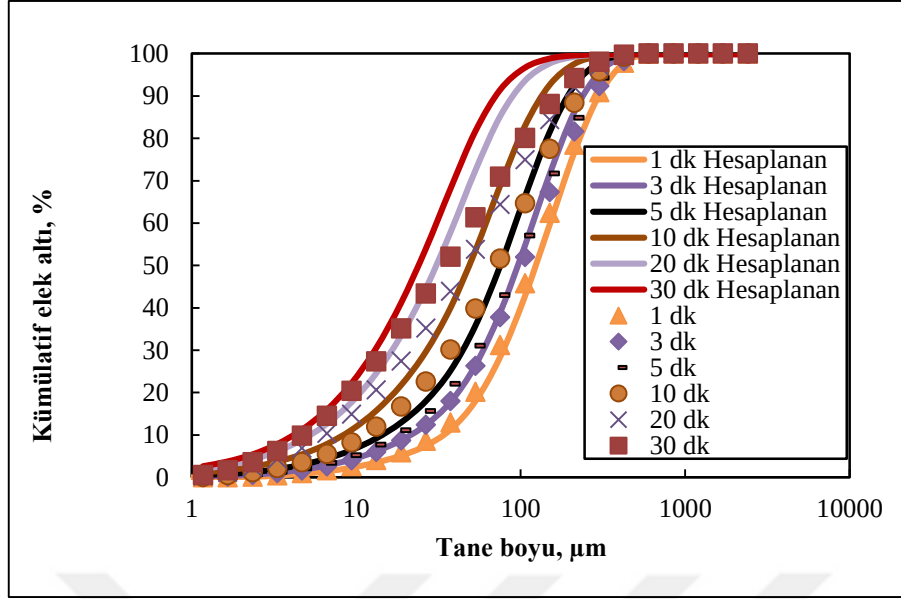
Şekil A.10. Kuru öğütme koşullarında U:1,20 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



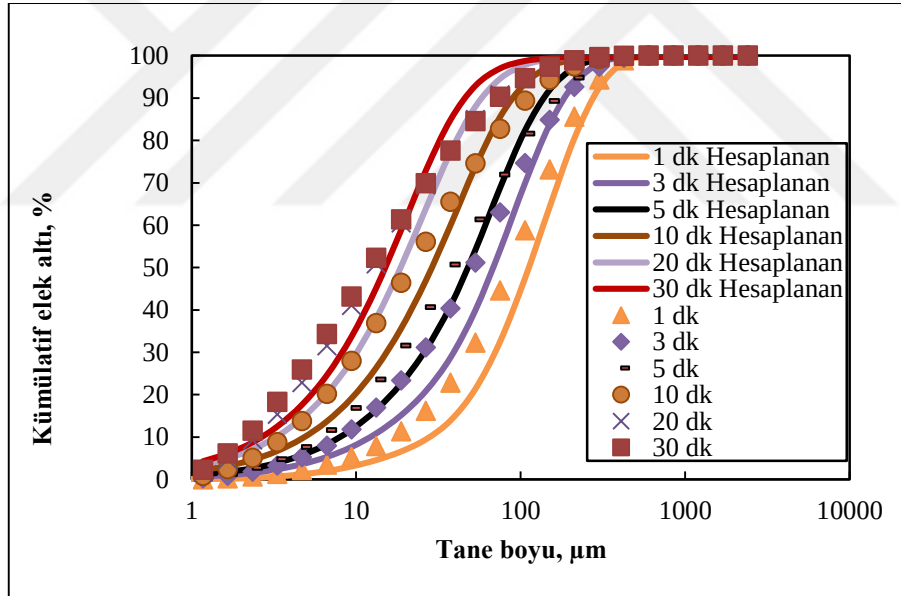
Şekil A.11. Kuru öğütme koşullarında 3 mm alumina bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



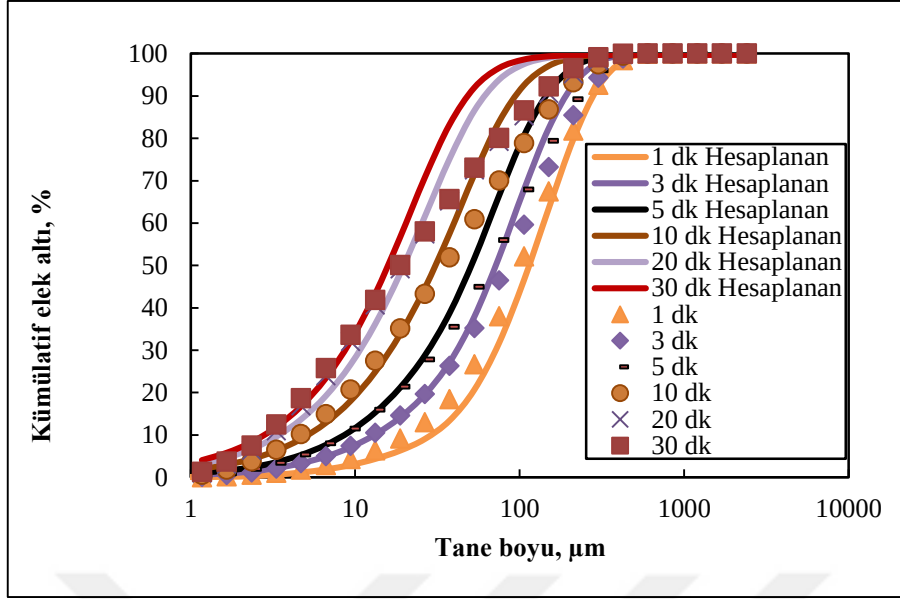
Şekil A.12. Kuru öğütme koşullarında 5 mm cam bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



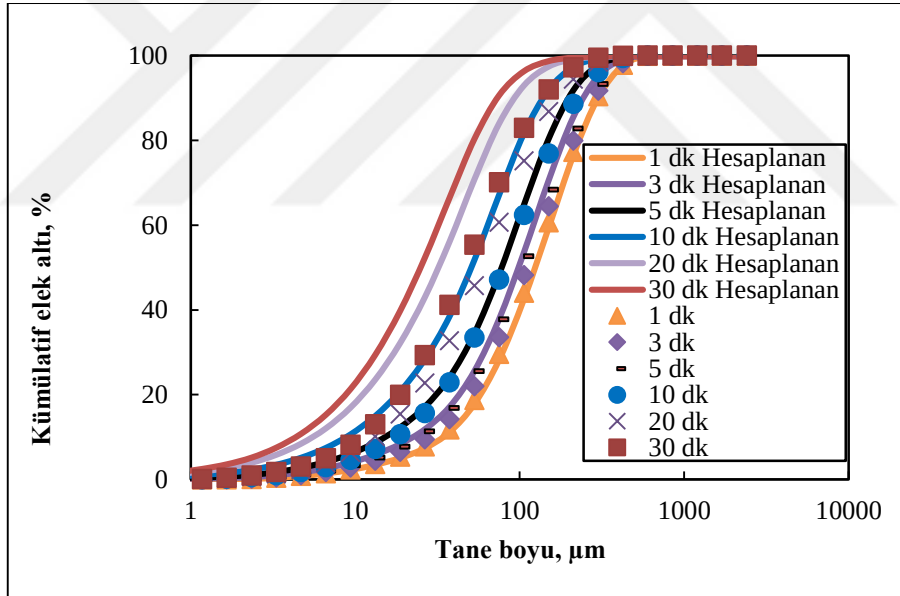
Şekil A.13. Kuru öğütme koşullarında 3,15 mm cam bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



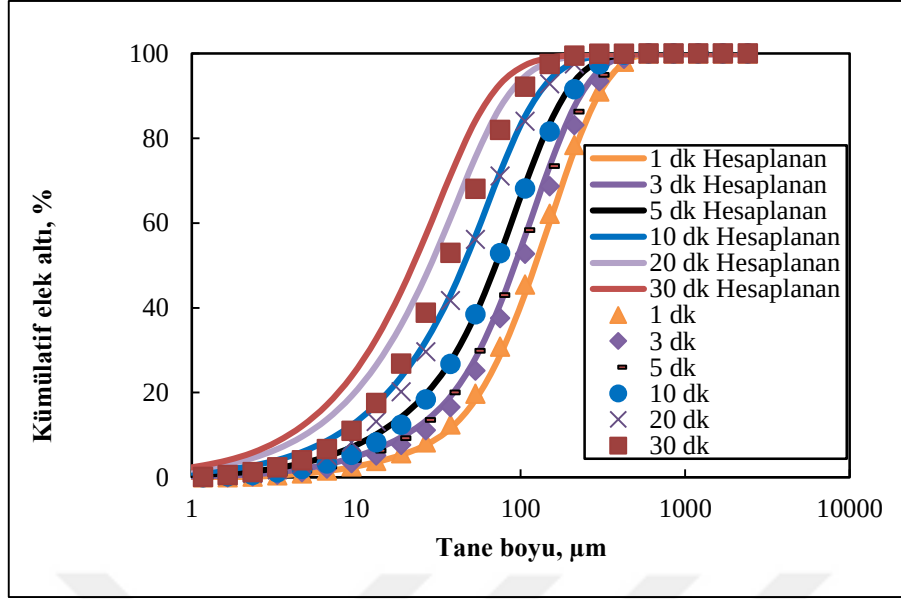
Şekil A.14. Kuru öğütme koşullarında 4,76 mm çelik bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



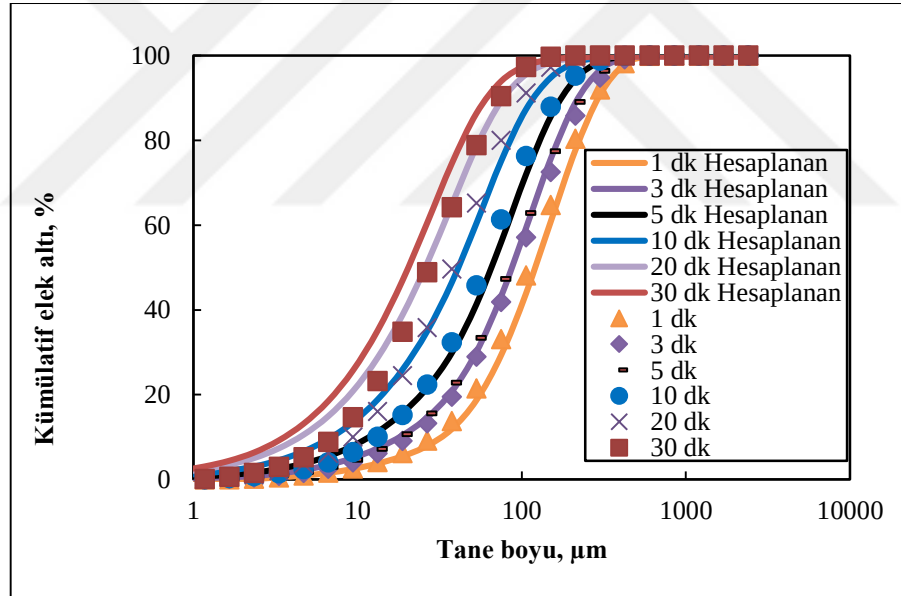
Şekil A.15. Kuru öğütme koşullarında 3,17 mm çelik bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



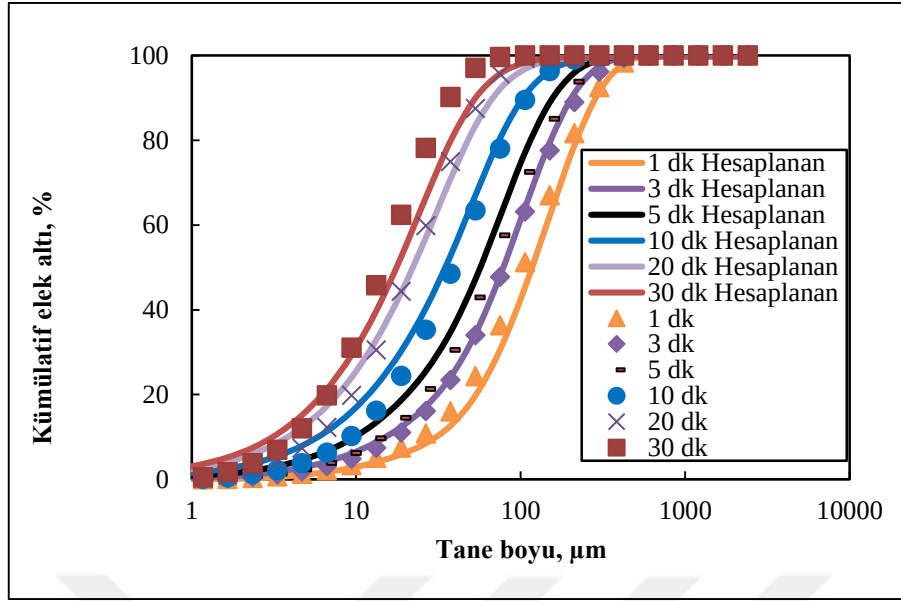
Şekil A.16. Yaş öğütme koşullarında 300 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



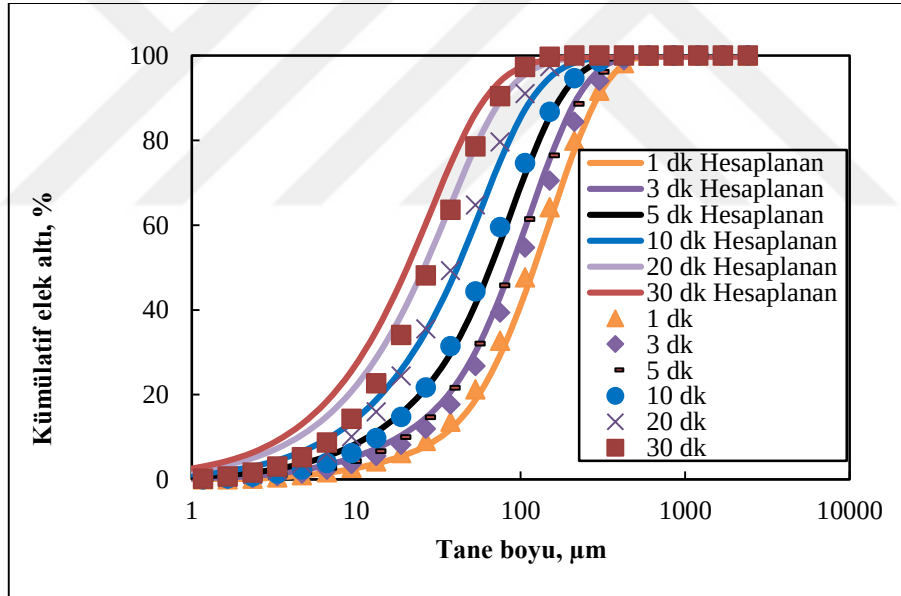
Şekil A.17. Yaş öğütme koşullarında 400 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



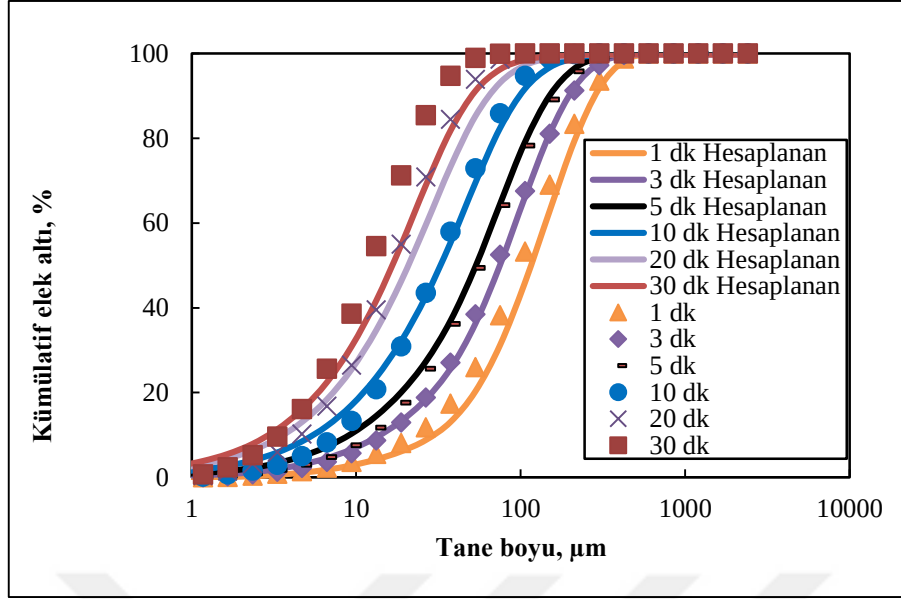
Şekil A.18. Yaş öğütme koşullarında 500 d/d için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



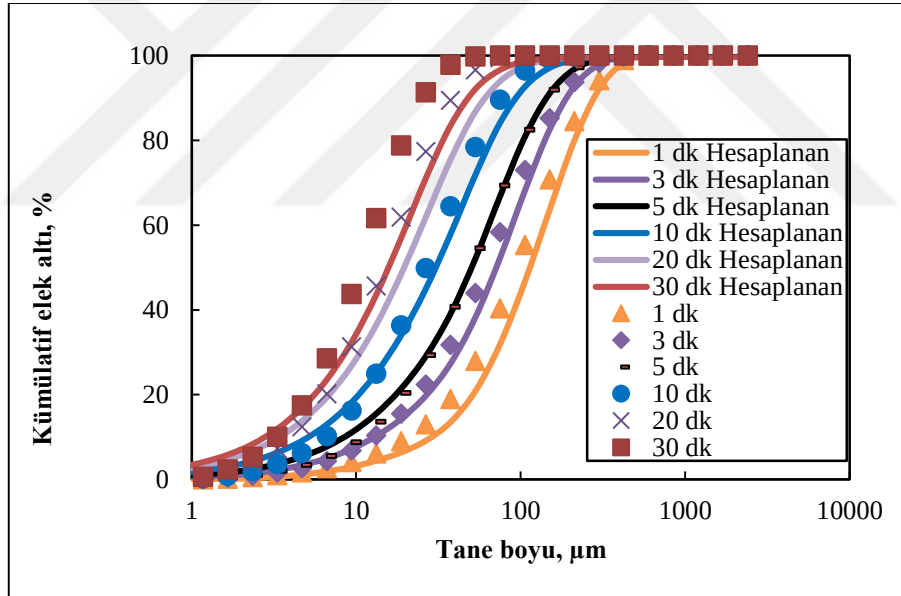
Şekil A.19. Yaş öğütme koşullarında J:0,63 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



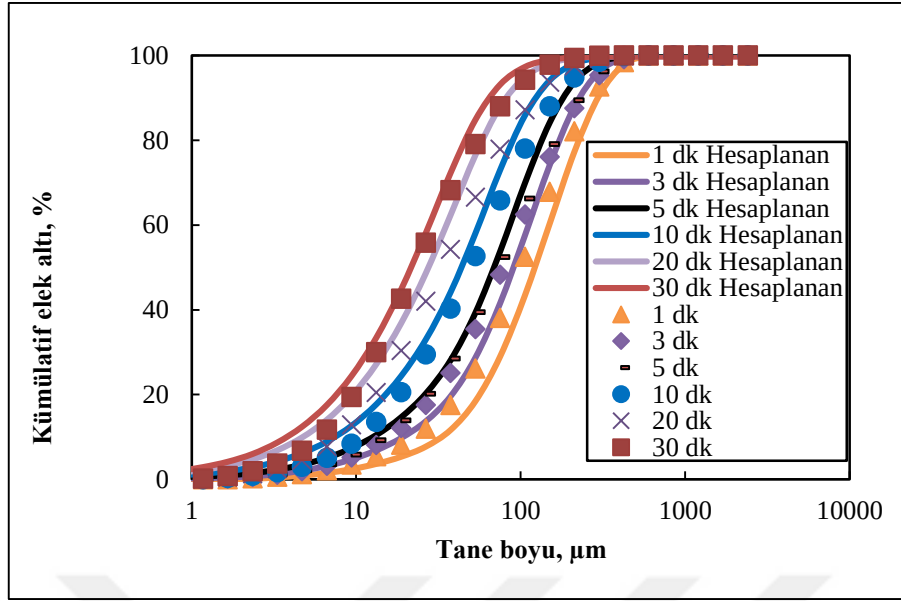
Şekil A.20. Yaş öğütme koşullarında J:0,42 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



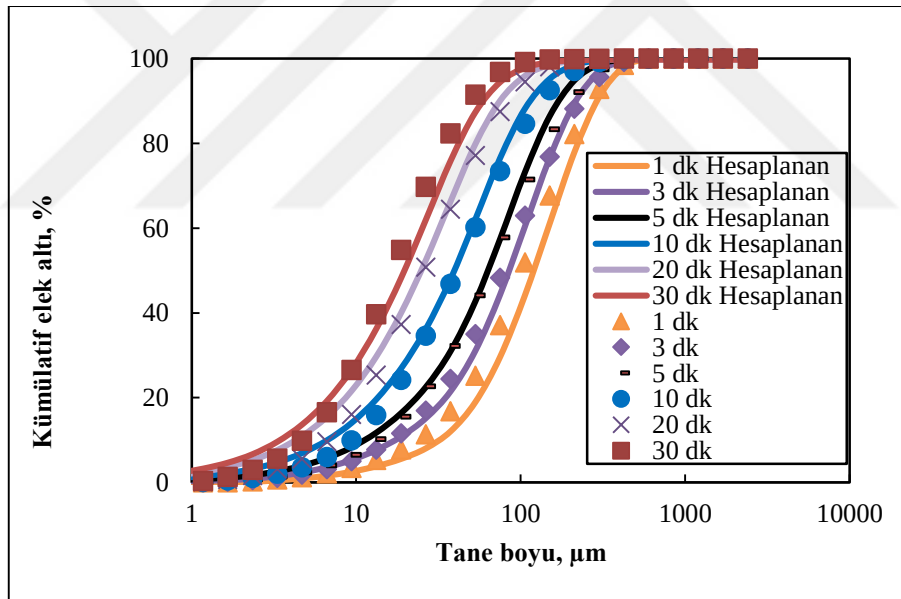
Şekil A.21. Yaş öğütme koşullarında J:0,72 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



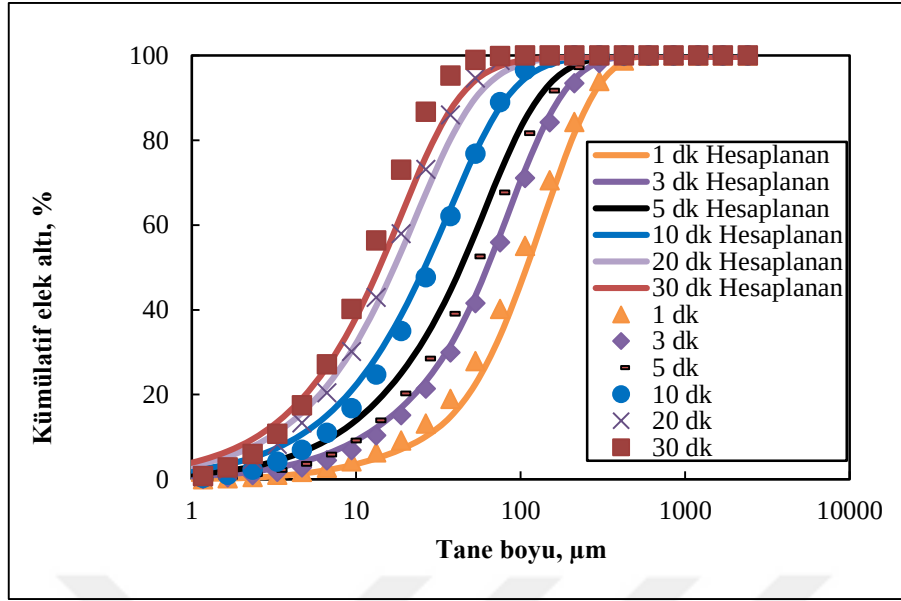
Şekil A.22. Yaş öğütme koşullarında J:0,82 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



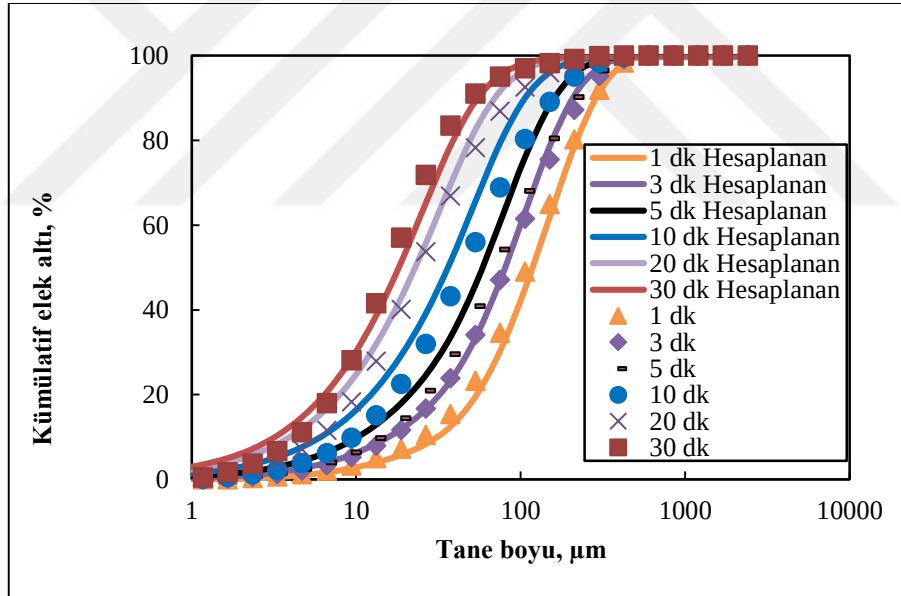
Şekil A.23. Yaş öğütme koşullarında U:1,00 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



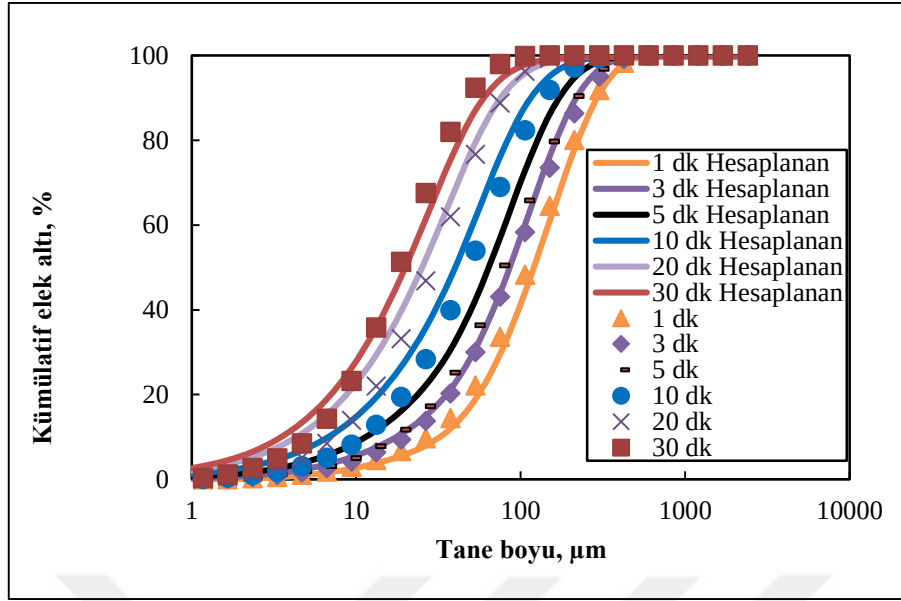
Şekil A.24. Yaş öğütme koşullarında U:0,80 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



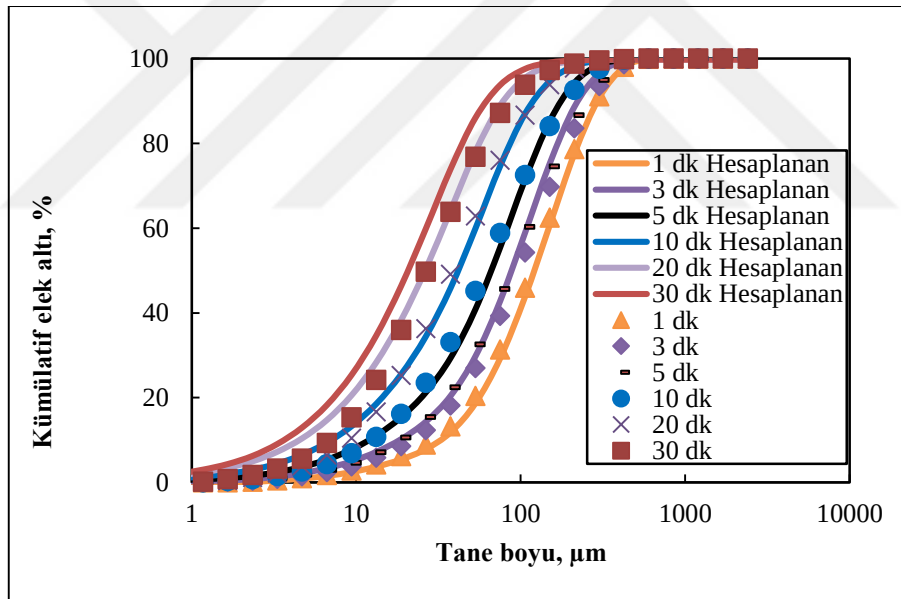
Şekil A.25. Yaş öğütme koşullarında U:0,42 için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



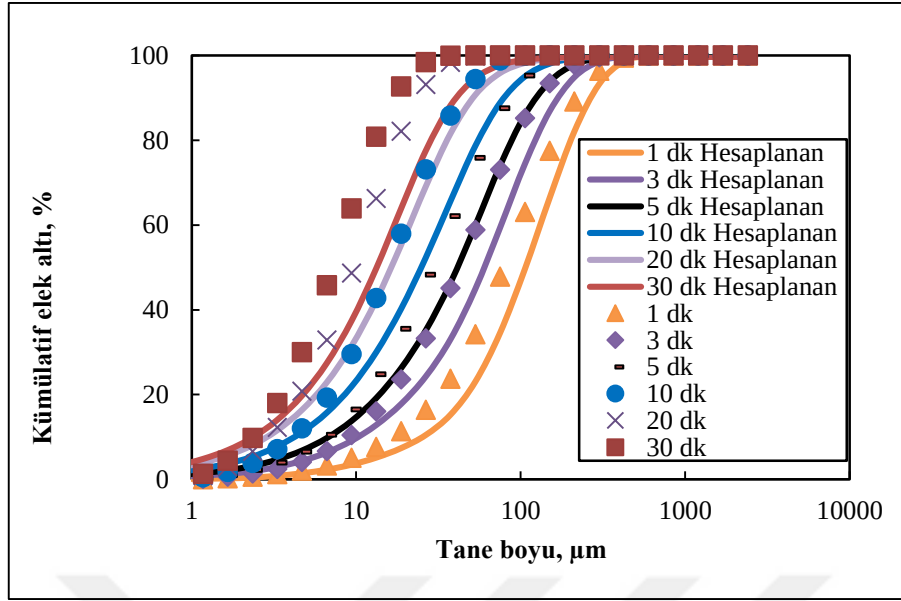
Şekil A.26. Yaş öğütme koşullarında 3 mm alumina bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



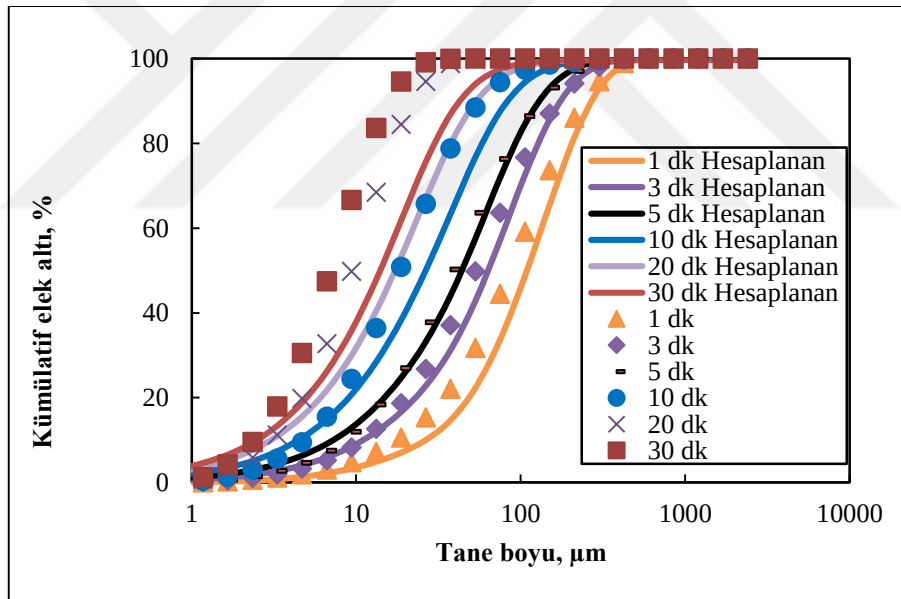
Şekil A.27. Yaş öğütme koşullarında 5 mm cam bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



Şekil A.28. Yaş öğütme koşullarında 3,15 mm cam bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



Şekil A.29. Yaş öğütme koşullarında 4,76 mm çelik bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



Şekil A.30. Yaş öğütme koşullarında 3,17 mm çelik bilya için öğütme sürelerine göre ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Altun, O., 2013, Investigation of dry horizontal stirred milling applications for cement grinding circuits, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Anonim, 2012, Özgül yüzey (spesifik yüzey) alanı ölçümü, http://www.cevher.itu.edu.tr/docs/librariesprovider82/Deney-F%3%B6yleri/Par%C3%A7a-Mekani%C4%9Fi/ozgul_yuzey_alani.pdf?sfvrsn=2.
- Arbiter, N., Bhargava, U. N., 1960, Correlation of product size, capacity and power in tumbling mills, Trans. AIME 217, 245-252.
- Ateşok, G., Mütevellioğlu, N. A., Dinçer, H., Boylu, F., 2005, Bazı dağıtıcı kimyasalların kömürlerin öğütülebilirliğine etkisi, Madencilik 44, 25-35.
- Austin, L. G., Klimpel, R. R., 1964, The theory of grinding operations, Industrial and Engineering Chemistry 56(11), 18-29.
- Austin, L. G., Weller, K. R., 1982, Simulation and scale-up of wet ball mills, XIV International Mineral Processing Congress, Toronto, Canada.
- Austin, L. G., Klimpel, R. R., Beattie, A. N., 1966, Solution of equations of grinding, Second European Symposium on Comminution, Amsterdam.
- Austin, L. G., Klimpel, R. R., Luckie, P. T., 1984, Process engineering of size reduction: Ball milling, Society of Mining Engineers of the AIME.
- Barley, R. W., Conway-Baker, J., Pascoe, R. D., Kostuch, J., McLoughlin, B., vd., 2004, Measurement of the motion of grinding media in a vertically stirred mill using positron emission particle tracking (pept) part ii, Minerals Engineering 17(11-12), 1179-1187.
- Batterham, R., 2011, Trends in comminution driven by energy, Advanced Powder Technology 22(1), 138-140.
- Belaroui, K., Pons, M. N., Vivier, H., Meijer, M., 1999, Wet grinding of gibbsite in a bead-mill, Powder Technology 105(1-3), 396-405.
- Benzer, H., 2000, Klinker öğütme prosesinin matematiksel modellemesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Bernhardt, C., Reinsch, E., Husemann, K., 1999, The influence of suspension properties on ultra-fine grinding in stirred ball mills, Powder Technology 105(1-3), 357-361.
- Blecher, L., Kwade, A., Schwedes, J., 1996, Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 1 : Energy density distribution and motion of single grinding beads, Powder Technology 86(1), 59-68.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bond, F. C., 1947, Standard grindability test tabulated, Trans. SME/AIME 183, 313-329.
- Bond, F. C., 1952, The third theory of comminution, AIME, 193-484.
- Bond, F. C., 1961, Crushing and grinding calculations part i, British Chemical Engineering 6(6), 378-385.
- Bond, F. C., 1962, Crushing and grinding with pyroprocessing, Pit and Quarry, 162-166.
- Bond, F. C., Wang, J. T., 1950, A new theory of comminution, Trans. AIME, 187-371.
- Bowdish, F. K., 1960, Theoretical and experimental studies of kinetics of grinding in a ball mill, Trans. SME/AIME 217, 194-202.
- Breitung-Faes, S., Kwade, A., 2014, Use of an enhanced stress model for the optimization of wet stirred media milling processes, Chemical Engineering and Technology 37(5), 819-826.
- Broadbent, S. R., Callcott, T. G., 1956, A matrix of processes involving particle assemblies, Phil. Trans. R. Soc. Lond. 249, 99-123.
- Büyüköztürk, Ş., 2012, Örneklemeye yöntemleri (ders notları). W3. Balıkesir. Edu. Tr/~msackes/wp/wp-content, BAY-Final-Konulari. pdf.
- Celep, O., Alp, İ., 2008, Karıştırmalı değirmenler İle İnce öğütmenin refrakter altın cevherlerine uygulanabilirliğinin İncelenmesi, Madencilik 47(3), 15-26.
- Celep, O., İbrahim, A., TÜRK, T., 2008, İnce öğütme teknolojisinde karıştırmalı ortam değirmenleri ve cevher hazırlamadaki uygulamaları, İstanbul Yerbilimleri Dergisi 21(2).
- Charles, R. J., 1957, Energy-size reduction relationships in comminution Transactions on AIME Mining Engineering Vol. 208, 80-88.
- Chevalier, D. M., 2008, Effect of microwave irradiation on the aspect ratio of treated mica, Dalhousie University, M.Sc. Thesis.
- Choi, H., Lee, W., Kim, S., 2009, Effect of grinding aids on the kinetics of fine grinding energy consumed of calcite powders by a stirred ball mill, Advanced Powder Technology 20(4), 350-354.
- Cleary, P. W., Sinnott, M., Morrison, R., 2006, Analysis of stirred mill performance using dem simulation: Part 2 – coherent flow structures, liner stress and wear, mixing and transport, Minerals Engineering 19(15), 1551-1572.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Conway-Baker, J., Barley, R. W., Williams, R. A., Clarke, A. J., Kostuch, J. A., vd., 1999, Investigation and model validation of media motion in a vertical stirred mill using positron emission particle tracking, 1st World Congress in Industrial Process Tomography, International Society for Industrial Process Tomography.
- Conway-Baker, J., Barley, R. W., Williams, R. A., Jia, X., Kostuch, J., vd., 2002, Measurement of the motion of grinding media in a vertically stirred mill using positron emission particle tracking (pept), Minerals Engineering 15(1-2), 53-59.
- Delannay, R., Louge, M., Richard, P., Taberlet, N., Valance, A., 2007, Towards a theoretical picture of dense granular flows down inclines, Nature Materials 6(2), 99-108.
- Demirci, Ö., 2010, İnce taneli zeminlerin bazı fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Deniz, V., 2004, Relationships between bond's grindability (g bg) and breakage parameters of grinding kinetic on limestone, Powder Technology 139(3), 208-213.
- Dikmen, S., 2008, Modelling of the performance of stirred media mills in regrinding circuits, Mining Engineering, Hacettepe University, Philosophy Of Doctorate.
- Dikmen, S., Ergün, Ş., 2004, Karıştırılmalı bilyalı değirmenler, Madencilik Dergisi 43(4), 3-15.
- DPT, 2001, Madencilik özel İhtisas komisyonu raporuendüstriyel hammaddeler alt komisyonu genel endüstri mineralleri, <http://www.kalkinma.gov.tr/Lists/zet%20htisas%20Komisyonu%20Raporlar/Attachments/129/oik630.pdf>.
- Ekşi, D., 2011, İnce tanelerin kırılma davranımlarının belirlenebileceği bir test yöntemi geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Epstein, B., 1947, The mathematical description of certain breakage mechanisms leading to the logarithmico-normal distribution, Journal of the Franklin Institute 244(6), 471-477.
- Epstein, B., 1948, Logarithmico-normal distribution in breakage of solids, Industrial and Engineering Chemistry 40, 2289-2291.
- Erdem, A. S., 2009, Bilya boyutunun öğütme model parametreleri üzerine etkisinin modellenmesi, Hacettepe Üniversitesi.
- Ergün, Ş. L., Benzer, A. H., Aydoğan, N. A., Dikmen, S., Erdem, A. S., vd., 2008, Çimento öğütme sınıflandırma İşlemlerinde harcanan elektrik enerjisinin minimizasyonuna yönelik mühendislik aracının geliştirilmesi, Tübitak Projesi Proje No: 104M369.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fadhel, H. B., Frances, C., 2001, Wet batch grinding of alumina hydrate in a stirred bead mill, *Powder Technology* 119(2-3), 257-268.
- Fadhel, H. B., Frances, C., Mamourian, A., 1999, Investigations on ultra-fine grinding of titanium dioxide in a stirred media mill, *Powder Technology* 105(1), 362-373.
- Feld, I. L., Mcvay, T. N., Gilmore, H. L., Clemmons, B. H., 1960, Paper coating clay from coarse georgia kaolin by a new attrition grinding process, USBM R.I.(5697).
- Fidan, B., Arol, A. İ., 1990, Küre cevherinin öğütülme özellikleri, *Madencilik Dergisi* 29, 5-9.
- Galanty, H. E., 1963, Size reduction paradox, *İnd. ENg. CHem.* 55, 46-52.
- Gao, M.-W., Forssberg, E., 1993, A study on the effect of parameters in stirred ball milling, *International Journal of Mineral Processing* 37(1-2), 45-59.
- Gao, M., Young, M. F., Cronin, B., Harbort, G., 2000, Isamill medium competency and its effect on milling performance, *SME Annual Meeting*, Slat Lake City, Utah.
- Gardner, R., Austin, L., 1962, A chemical engineering treatment of batch grinding, *Zerkleinern Symposion*. Dusseldorf: Verlag Chemie.
- Genç, Ö., 2002, Klinker ve çimento katkılarının kırılma dağılım fonksiyonlarının incelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans*.
- Genç, Ö., 2008, An investigation on the effects of design and operational parameters on grinding performance of multi-compartment ball mills used in the cement industry, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Doktora Tezi*.
- Genç, Ö., Benzer, A. H., 2008, Performance analysis, modelling and simulation of dry air-swept coal ball mill grinding circuit, *Madencilik* 47(2), 37-47.
- Graves, G. A., Boehm, T., 2007, Mill media considerations for high energy mills, *Minerals Engineering* 20(4), 342-347.
- Gupta, A., Yan, D. S., 2006, Chapter 2 - particle size estimation and distributions, *Mineral processing design and operation*, Amsterdam, Elsevier Science, 32-62.
- Hacıfazlıoğlu, H., 2009, İnce ve çok İnce öğütme için alternatif değirmen tiplerinin tanıtılması, *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*,(01), 17-30.
- Hamey, R. G., 2005, Production of organic pigment nanoparticles by stirred media milling, *University of Florida*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Herbst, J., Fuerstenau, D., 1980, Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models, *International Journal of Mineral Processing* 7(1), 1-31.
- Holmes, A., 1957, A contribution to the study of comminution - a modified form of kick's law, *Trans. Ins.Chem.Eng.* 35, 125-141.
- Hopkinson, B., 1914, A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 213, 437-456.
- Hukki, R. T., 1959, Proposal for a solomonic settlement between the theories of von rittinger, kick, and bond,, *Transactions AIME/SME* 220, 403-408.
- Hukki, R. T., 1975, The principles of comminution: An analytical summary, *E&MJ*, 106-110.
- İpek, H., Uçbaş, Y., Yekeler, M., Hoşten, Ç., 2005, Dry grinding kinetics of binary mixtures of ceramic raw materials by bond milling, *Ceramics international* 31(8), 1065-1071.
- İpek, H., 2003, Seramik hammadde karışımlarının öğütülebilirlik özelliklerinin belirlenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmangazi Üniversitesi, Doktora Tezi.*
- Jankovic, A., 1999, *Mathematical modelling of stirred mills*, University of Queensland.
- Jankovic, A., 2001, Media stress intensity analysis for vertical stirred mills, *Minerals Engineering* 14(10), 1177-1186.
- Jankovic, A., 2003, Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills, *Minerals Engineering* 16(4), 337-345.
- Jayasundara, C., Yang, R., Yu, A., Curry, D., 2006, Discrete particle simulation of particle flow in the isamill process, *Industrial & engineering chemistry research* 45(18), 6349-6359.
- Jayasundara, C. T., 2007, *Numerical and experimental studies of granular dynamics in isamill*, Faculty of Scienc, The University of New South Wales, PhD Doctorate.
- Jayasundara, C. T., Yang, R. Y., Guo, B. Y., Yu, A. B., Govender, I., vd., 2011, Cfd-dem modelling of particle flow in isamills - comparison between simulations and pept measurements, *Minerals Engineering* 24(3-4), 181-187.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jimenez, J. L. S., 1981, A detailed study on stirred ball mill grinding, Departman of Metallurgy and Metallurgical Engineering, The University of Utah, Doctor of Philosohy, 304.
- Kapur, P., 1972, Self-preserving size spectra of comminuted particles, Chemical Engineering Science 27(2), 425-431.
- Kapur, P. C., Healy, T. W., Scales, P. J., Boger, D. V., Wilson, D., 1996, Role of dispersants in kinetics and energetics of stirred ball mill grinding, International Journal of Mineral Processing 47(1-2), 141-152.
- Kavetsky, A., Whiten, W. J., S., N. S., 1982, Studies on the scale-up of ball mills, Mill Operations Conference, Sept. Australas. Inst.Min.Metall., 113-121.
- Kelly, E. G., Spottiswood, D. J., 1982, Introduction to mineral processing, Wiley.
- Kelly, E. G., Spottiswood, D. J., 1990, The breakage function; what is it really?, Minerals Engineering 3(5), 405-414.
- Kelsall, D., Reid, K., 1965, The derivation of a mathematical model for breakage in a small continuous wet ball mill, Proc. AIChE/Chem. E. Joint Meeting, London.
- Kick, F., 1885, Das gesetz der proportionalen widerstände und seine anwendungen: Nebst versuchen über das verhalten verschiedener materialien bei gleichen formänderungen sowohl unter der presse als dem schlagwerk, A. Felix.
- Kılınç, Y., Uslan, İ., 2003, Titreşimli yatay atritör İmalatı ve alumina öğütme davranışının İncelenmesi, Mühendis ve Makina 44, 25-32.
- Klimpel, R., 1999, The selection of wet grinding chemical additives based on slurry rheology control, Powder Technology 105(1), 430-435.
- Klimpel, R., Austin, L., 1970, Determination of selection-for-breakage functions in the batch grinding equation by nonlinear optimization, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals 9(2), 230-237.
- Klimpel, R., Austin, L. G., 1982, Chemical additives for wet grinding of minerals, Powder Technology 31(2), 239-253.
- Krajcinovic, D., 1996, Chapter 2 statistical models, North-holland series in applied mathematics and mechanics, K. Dusan, North-Holland, Volume 41, 33-220.
- Kwade, A., 1999a, Determination of the most important grinding mechanism in stirred media mills by calculating stress intensity and stress number, Powder Technology 105(1), 382-388.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kwade, A., 1999b, Wet comminution in stirred media mills—research and its practical application, *Powder Technology* 105(1), 14-20.
- Kwade, A., 2001, Physical model to describe and select comminution and dispersion processes, *Chemie Ingenieur Technik* 73(6), 703-703.
- Kwade, A., 2003, A stressing model for the description and optimization of grinding processes, *Chemical engineering & technology* 26(2), 199-205.
- Kwade, A., Schwedes, J., 2002, Breaking characteristics of different materials and their effect on stress intensity and stress number in stirred media mills, *Powder Technology* 122(2), 109-121.
- Kwade, A., Blecher, L., 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(1), 69-76.
- Locher, F. W., Seebach, H. M. v., 1972, Influence of adsorption on industrial grinding, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 11(2), 190-197.
- Lynch, A. J., 1977, Mineral crushing and grinding circuits, their simulation, optimization, design and control, Elsevier Scientific Publishing Co, 1-65.
- Lynch, A. J., Whiten, W. J., Narayanan, S. S., 1986, Ball mill models: Their evolution and present status, *Advances in Mineral Processing: A Half-Century of Progress in Application of Theory to Practice. Proceedings of a Symposium Honoring Nathaniel Arbiter on his 75th Birthday.*, Littleton, CO, USA New Orleans, LA, USA, Soc of Mining Engineers.
- Ma, Z., Hu, S., Zhang, S., Pan, X., 1998, Breakage behavior of quartz in a laboratory stirred ball mill, *Powder Technology* 100(1), 69-73.
- Mankosa, M. J., 1986, Investigation of operating conditions in stirred ball milling of coal, Virginia Tech.
- Marshall, V. C., 1975, Comminution: I, *engineering Chem.*, 12-14.
- Mishra, B., 2003, A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: Part ii—practical applications, *International Journal of Mineral Processing* 71(1), 95-112.
- Mishra, B., Rajamani, R. K., 1992, The discrete element method for the simulation of ball mills, *Applied Mathematical Modelling* 16(11), 598-604.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Moreno, R., Ghadiri, M., Antony, S., 2003, Effect of the impact angle on the breakage of agglomerates: A numerical study using dem, Powder Technology 130(1), 132-137.
- Napier-Munn, T. J., Lynch, A. J., 1992, The modelling and computer simulation of mineral treatment processes — current status and future trends, Minerals Engineering 5(2), 143-167.
- Napier Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., Kojovic, T., 1999, Mineral comminution circuits: Their operation and optimisation, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- Narayanan, S., Whiten, W., 1988, Determination of comminution characteristics from single-particle breakage tests and its application to ball-mill scale-up, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section C-Mineral Processing and Extractive Metallurgy 97, C115-C124.
- Orumwense, A., 2005, Effect of media type on regrinding with stirred mills, Minerals & Metallurgical Processing 23(1), 40-44.
- Ozkan, A., Yekeler, M., 2003, Fine dry grinding of zeolite in a laboratory ball mill, Particle & Particle Systems Characterization 20(4), 276-282.
- Öner, M., Wakamatsu, T., Nakahiro, Y., 1985, Çimento öğütülmesinde kullanımı öğütme İnceliği ve dayanım üzerindeki etkileri, Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 9. Kongresi.
- Özkan, A., Yekeler, M., 2001, Palp reolojisinin öğütme İşlemine etkisi ve kontrolü, Madencilik, 40, 40-47.
- Pease, J., Curry, D., Barns, K., Young, M., Rule, C., 2006, Transforming flowsheet design with inert grinding-the isamill, Proceedings of the Canadian Mineral Processors XXXVIIIth Annual Operator Conference.
- Persson, H., Forssberg, E., 1994, Fine grinding of a magnetite ore with a stirred ball mill, Aufbereitungs-Technik(Germany) 35(6), 307-312.
- Pilevneli, C. C., 2003, Bilyalı bir karıştırmalı değirmende İnce boyutlu klinker öğütmesinin İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Rebhinder, P., Kalinkovskaya, N., 1932, Reduction in stability of the surface layer of a soud by the adsorption of surface acting substances, J. Tech. Phys., USSR 2, 726-755.
- Rittinger, P., 1867, Lehrbuch der aufbereitungskunde, 1867, Berlin.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Roberts, E. J., 1950, The probability theory of wet ball milling and its applications, Trans. SME/AIME 187, 1267-1272.
- Rose, H. E., 1964, Private communication.
- Rumph, H., 1962, Dechama Zerkleinern Symposion.
- Sadler, L. Y., Stanley, D. A., Brooks, D. R., 1975, Attrition mill operating characteristics, Powder Technology 12(1), 19-28.
- Samanli, S., 2008, Zonguldak-çatalağzı termik santralı katı fosil yakıtı öğütme kinetiğinin araştırılması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Samanlı, S., 2010, Çatalağzı termik santral katı fosil yakıtı kırılma davranışının karıştırılma değirmen ve bilyalı değirmende karşılaştırılması, Madencilik Dergisi 49, 31-44.
- Schönert, K., 1991, Advances in comminution fundamentals and impacts on technology, Aufbereitungs-Technik 32(9), 487-494.
- Sinnott, M., Cleary, P. W., Morrison, R., 2006, Analysis of stirred mill performance using dem simulation: Part 1– media motion, energy consumption and collisional environment, Minerals Engineering 19(15), 1537-1550.
- Sivamohan, R., Vachot, P., 1990, A comparative study of stirred and vibratory mills for the fine grinding of muscovite, wollastonite and kaolinite, Powder Technology 61(2), 119-129.
- Stehr, N., 1988, Recent developments in stirred ball milling, International Journal of Mineral Processing 22(1), 431-444.
- Stewart, P., Restarick, C., 1971, A comparison of the mechanism of breakage in full scale and laboratory scale grinding mills, Proc. Australas. Inst. Min. Metall.
- Szegvari, A., 1994, The fine grinding of ceramics with attritors, Interceram 43(2), 97-98.
- Szegvari, A., Yang, M., 1989, Fine grinding of high-value-added industrial minerals by attrition milling, Les Mineraux Industriels Matériaux des Années 90.
- Tanaka, T., 1954, A new concept applying a final fineness value to grinding mechanism—grinding tests with frictional and impulsive force, Kagaku kogaku 18, 160-171.
- Tavares, L. M., 2007, Chapter 1 breakage of single particles: Quasi-static, Handbook of powder technology, M. G. Agba D. Salman ve J. H. Michael, Elsevier Science B.V., Volume 12, 3-68.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tavares, L. M., King, R. P., 1998, Single-particle fracture under impact loading, *International Journal of Mineral Processing* 54(1), 1-28.
- Teke, E., 1998, Kalsitin ve baritin İnce öğütme kinetiğinin analizi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Cumhuriyet Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Tjakra, J. D., 2013, Modeling and analysis of particulate system collective dynamical features, The University of New South Wales Sydney, Australia.
- Tuzcu, E., Dhawan, N., Rajamani, R. K., 2011, Coarse particle fracture with the ultrafast load cell, *Minerals & Metallurgical Processing* 28(4).
- Tuzcu, E. T., 2016, Particle internal fracture energy measurement by ultrafast load cell, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 20(3), 428-433.
- Tüzün, M., Loveday, B., 1994, Fine milling of chromite sand in a 5-litre stirred ball mill, *Minerals Engineering* 7(5-6), 551-560.
- Tüzün, M. A., 1993, A detailed study on comminution in a vertical stirred ball mill, Department of Chemical Engineering, South Africa, University of Natal, Ph. D Thesis.
- U.S.G.S., 2010, U.S. Geological survey publications - mineral yearbook annual. .
- Ulusoy, U., Yekeler, M., Hiçyılmaz, C., 2004, Kalsit mineralinin şekli, pürüzlülük ve işlanabilirliğinin karakterizasyonu, Madencilik.
- Uzundurukan, S., 2006, Zeminlerin şişme özelliklerine etkiyen temel parametrelerin belirlenmesi ve modellenmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- van der Westhuizen, A. P., Govender, I., Mainza, A. N., Rubenstein, J., 2011, Tracking the motion of media particles inside an isamill™ using pept, *Minerals Engineering* 24(3-4), 195-204.
- Walker, W. H., Lewis, W. K., McAdams, W. H., Gilliland, E. R., 1937, Principles of chemical engineering, New York, London,, McGraw-Hill Book Company, inc.
- Wang, M. H., Yang, R. Y., Yu, A. B., 2012, Dem investigation of energy distribution and particle breakage in tumbling ball mills, *Powder Technology* 223, 83-91.
- Wang, Y., Forssberg, E., Sachweh, J., 2004, Dry fine comminution in a stirred media mill—maxxmill®, *International Journal of Mineral Processing* 74, S65-S74.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Weerasekara, N. S., Powell, M. S., Cleary, P. W., Tavares, L. M., Evertsson, M., vd., 2013, The contribution of dem to the science of comminution, Powder Technology 248, 3-4.
- Weichert, R., Herbst, J., 1986, An ultra fast load cell device for measuring particle breakage, 1st World Congress of Particle Technology. Nürnberg.
- Weller, K. R., Gao, M., 1999, Ultrafine grinding, AJM Crushing and Grinding Conference, Kalgoorlie.
- Westwood, A., Stoloff, N., 1966, Environment-sensitive mechanical behavior gordon and breach, New York.
- Whiten, W. J., 1974, A matrix theory of comminution machines, Chemical Engineering Science 29(2), 589-599.
- Whiten, W. J., 1976, Ball mill simulation using small calculators, Proceedings, Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Yang, R., Zou, R., Yu, A., 2000, Computer simulation of the packing of fine particles, Physical Review E 62(3), 3900.
- Yang, R., Yu, A., McElroy, L., Bao, J., 2008, Numerical simulation of particle dynamics in different flow regimes in a rotating drum, Powder Technology 188(2), 170-177.
- Yerlikaya, A., 1994, Bilyalı değirmenlerde bilya dağılımının matematiksel model yardımıyla belirlenmesi, Fen bilimleri Entitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Yılmaz, H., 2016, Madencilik bülteni, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 119.
- Yu, A., 2004, Discrete element method: An effective way for particle scale research of particulate matter, Engineering Computations 21(2/3/4), 205-214.
- Zheng, J., Harris, C. C., Somasundaran, P., 1996, A study on grinding and energy input in stirred media mills., Powder Technology 86, 171-178.
- Zheng, J., Harris, C. C., Somasundaran, P., 1997, The effect of additives on stirred media milling of limestone, Powder Technology 91(3), 173-179.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Hasan Serkan Gökçen
Doğum Yeri ve Yılı :Ankara, 1984
Medeni Hali :Bekar
Uyruğu :T.C.
Yabancı Dili :İngilizce
e-posta :sgokcen@ogu.edu.tr

Eğitim Durumu:

Lise :
Sakarya Mithatpaşa Lisesi, 1998-1999
Ankara Anıttepe Lisesi, 1999-2001
Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Maden
Mühendisliği Bölümü, 2001-2007
Yüksek Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Maden
Mühendisliği Bölümü, 2007-2010
Doktora : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Maden
Mühendisliği Bölümü, 2010-2017

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Maden Mühendisliği Bölümü,
2009 -2017