

MİNERALLERİN KIRILGANLIKLARI, ISLANMA
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE
KORELASYONU

Alper ÖZKAN
DOKTORA TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2001 114194

114194

MİNERALLERİN KIRILGANLIKLARI, ISLANMA ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ VE KORELASYONU

Alper ÖZKAN
DOKTORA TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma Fon Saymanlığı tarafından M-146
nolu Doktora Tez Projesi olarak desteklenmiştir.

Danışman: Doç.Dr. Meftuni YEKELER

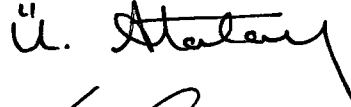
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE

Bu çalışma, jürimiz tarafından, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr. Gülhan ÖZBAYOĞLU



Üye : Prof.Dr. Ümit ATALAY



Üye : Doç.Dr. Meftuni YEKELER



Üye : Doç.Dr. Ünal AKDEMİR



Üye : Yrd.Doç.Dr. Orhan CERİT



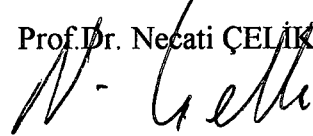
ONAY


Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

...../...../2001

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Prof.Dr. Necati ÇELİK





Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosunun 05.01.1984 tarihli toplantısında kabul edilen ve daha sonra 30.12.1993 tarihinde C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğünce hazırlanan ve yayınlanan “Yüksek Lisans ve Doktora Tez Yazım Kılavuzu” adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ	xix
SİMGELER DİZİNİ	xx
EKLER DİZİNİ	xxii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	4
1.2. Genel Bilgiler	5
1.2.1. Öğütme Kinetiği ve Kırılma Parametreleri	5
1.2.1.1. Birinci derece öğütme hipotezi	5
1.2.1.2. Birinci derece olmayan öğütme hipotezi	11
1.2.1.3. Kırılma dağılım fonksiyonu parametreleri	14
1.2.1.4. Öğütmenin boyut-kütle dengesi modeliyle açıklanması	18
1.2.1.5. Minerallerin öğütülmesinde fiziko-kimyasal ortamın etkileri	20
1.2.1.5.1. Su ve organik sıvılarda öğütme	22
1.2.1.5.2. Öğütmeye ilave edilen inorganik elektrolitlerin etkileri	24
1.2.1.5.3. Öğütmeye ilave edilen yüzey aktif maddelerin etkileri	26
1.2.1.6. Kimyasal maddelerin öğütmeye etki mekanizmaları	29
1.2.2. Minerallerin İslanma Özellikleri ve Kritik İslanma Yüzey Gerilimleri	32
1.2.2.1. Ara yüzey enerjileri ve temas açısı	32
1.2.2.2. Hidrofobik ve hidrofilik katılar	36
1.2.2.3. Kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) ve belirleme teknikleri	37

1.2.2.3.1. Zisman temas açısı ölçüm yöntemi	38
1.2.2.3.2. Flotasyon yöntemi	40
1.2.2.3.3. Diğer yöntemler	41
2. MALZEME VE YÖNTEM	46
2.1. Mineraller	48
2.2. Öğütme Deneyleri	49
2.2.1. Değirmen özellikleri ve öğütme koşulları	49
2.2.2. Elek analizleri	52
2.3. Simülasyon	53
2.4. Islanma Deneyleri	53
2.4.1. Kullanılan çözeltiler ve yüzey gerilimleri	54
2.4.2. Temas açısı ölçümleri	57
2.4.3. Mikroflotasyon testleri	58
3. BULGULAR	61
3.1. Minerallerin Kırılma Parametrelerinin Belirlenmesi ve Ürünlerin Tane Boyut Dağılımlarının Simülasyonu	61
3.1.1. Kalsit	61
3.1.1.1. Özgül kırılma hızları (S_i) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametrelerinin belirlenmesi	61
3.1.1.2. Ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	79
3.1.2. Barit	94
3.1.2.1. Özgül kırılma hızları (S_i) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametrelerinin belirlenmesi	94
3.1.2.2. Ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	101
3.1.3. Kömür	113
3.1.3.1. Özgül kırılma hızları (S_i) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametrelerinin belirlenmesi	113
3.1.3.2. Ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	120

3.2. Öğütme ve Simülasyon Bulgularının Değerlendirilmesi ve Tartışılması	132
3.3. Minerallerin İslanma Parametresinin (Kritik İslanma Yüzey Gerilimi, γ_c) Belirlenmesi	144
3.3.1. Kalsit	144
3.3.1.1. Temas açısı ölçüm yöntemiyle γ_c 'nin belirlenmesi	144
3.3.1.2. Mikroflotasyon testleriyle γ_c 'nin belirlenmesi	148
3.3.2. Barit	153
3.3.2.1. Temas açısı ölçüm yöntemiyle γ_c 'nin belirlenmesi	153
3.3.2.2. Mikroflotasyon testleriyle γ_c 'nin belirlenmesi	156
3.3.3. Kömür	160
3.3.3.1. Temas açısı ölçüm yöntemiyle γ_c 'nin belirlenmesi	160
3.3.3.2. Mikroflotasyon testleriyle γ_c 'nin belirlenmesi	166
3.4. İslanma Deney Bulgularının Değerlendirilmesi ve Tartışılması	173
3.5. Kırılma Parametreleri ile İslanma Parametresinin Korelasyonu	176
3.5.1. Kalsit için korelasyonlar	176
3.5.2. Barit için korelasyonlar	181
3.5.3. Kömür için korelasyonlar	184
3.6. Korelasyon Bulgularının Değerlendirilmesi ve Tartışılması	193
4. SONUÇLAR	195
5. KAYNAKLAR	200
6. ÖZGEÇMİŞ	207
EKLER	208

ÖZET
Doktora Tezi

MİNERALLERİN KIRILGANLIKLARI, ISLANMA ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ VE KORELASYONU

Alper ÖZKAN
Cumhuriyet Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Meftuni YEKELER

Bu tez çalışması üç aşamadan oluşmaktadır: İlk olarak, kalsit, barit ve linyit kömürünün laboratuvar ölçekli porselen bilyalı değirmende kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülmesiyle kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$) belirlenmiş ve öğütme ürünlerinin tane boyu dağılımları elde edilmiş ve bu boyut dağılımlarının kendilerinin PSUSIM adlı program kullanılarak simülasyonları yapılmıştır. İkinci aşamada, değirmende kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülen farklı besleme boyutu fraksiyonu ürünlerinin ıslanmayı karakterize eden kritik ıslanma yüzey gerilimi değerleri (γ_c) temas açısı ölçümü ve flotasyon tekniği ile belirlenmiştir. Son aşamada ise, öğütme testlerinden elde edilen kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ parametresi olan γ) ile temas açısı ölçümleri ve flotasyon testlerinden elde edilen kritik ıslanma yüzey gerilimi parametresinin (γ_c) olabilecek korelasyonları araştırılmıştır.

Öğütmeye yardımcı kimyasal maddeler, kalsit ve barit minerali için daha yüksek kırılma hızları ve nispeten daha ince malzeme üretiminde etkili olmuştur. Fakat, kömürün yaş öğütülmesinde kullanılan kimyasal madde, kırılma hızlarını ve ince malzeme üretimini azaltmıştır. Elde edilen kırılma parametreleri ile birinci derece ve birinci derece olmayan kırılma bölgeleri için ürün tane boyu dağılımlarının simülasyonları yapıldığında, simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla benzer dağılımları vererek uyumlu olduğu görülmüştür. Bu minerallerin öğütülmüş ürünlerinin bir goniometre kullanılarak temas açısı ölçüm yöntemiyle belirlenen γ_c değerleri, yeni dizayn edilen mikroflotasyon hücresi kullanılarak flotasyon yöntemiyle belirlenen değerlere yakındır.

Bu minerallerin kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ parametresi olan γ) ile ıslanma parametresinin (γ_c) anlamlı korelasyonlarının olduğu belirlenmiştir. Kalsit ve barit minerallerinden elde edilen veriler ışığında; daha yüksek temas açıları ve daha yüksek flotasyon verimlerinin eldesine dayanarak daha da hidrofobluğu belirten düşük γ_c değeri verirken, S_i değerinin de arttığını göstermektedir. Barit minerali için diğer bir ilişki $B_{i,j}$ 'nin incelik parametresi olan γ ile γ_c arasında bulunmuştur; yani γ_c artarken $B_{i,j}$ parametresi olan γ 'da artmaktadır, fakat kalsit için benzer bir ilişki bulunamamıştır. Buna ilaveten, kömürün kırılma parametreleri ile ıslanma parametresi arasında bazı anlamlı korelasyonlar da belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Öğütme, Flotasyon, Temas açısı ölçümleri, Kırılma parametreleri, Islanma parametresi

SUMMARY
Ph.D. Thesis

DETERMINATION OF THE BREAKAGE AND WETTING CHARACTERISTICS
OF MINERALS AND THEIR CORRELATIONS

Alper ÖZKAN
Cumhuriyet University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mining Engineering

Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Meftuni YEKELER

This study is made of three stages: Firstly, the breakage parameters (S_i and $B_{i,j}$) of calcite, barite and lignite were determined by a laboratory size porcelain ball mill as dry, wet and wet with chemical aids and particle size distributions were plotted for each minerals and each feed size fractions as the grinding time proceeded. Then, the simulations of the product size distributions obtained from grinding experiments were made by using PSUSIM program. Secondly, the critical surface tension of wetting (γ_c) values of those solids were determined by contact angle measurement and flotation technique for the products of ground minerals fed as different size fractions to the porcelain mill. Lastly, the correlations of those breakage parameters (S_i and γ of $B_{i,j}$) obtained from the grinding tests, with the critical surface tension of wetting (γ_c) values, obtained from the contact angle measurements and flotation tests, were made for possible relationships.

The grinding aids are effective to obtain higher breakage rates and relatively fine material for the case of calcite and barite minerals. But, the chemical used in the wet grinding of coal was lowered breakage rates and fine material. When the breakage parameters were used to simulate the product size distributions for both first-order and non-first order breakage regions, the simulated results were in good agreement with the experimental data. The determined γ_c values of the ground products of these minerals by contact angle measurement technique using a goniometer are close to the values obtained by the flotation technique using a new designed microflotation cell.

The correlations of the breakage parameters (S_i and γ of $B_{i,j}$) with the wettability parameter (γ_c) of these minerals were established. From the data obtained for calcite and barite mineral, it is stated that the S_i values increase as γ_c values decrease, emphasizing more hydrophobicity in terms of obtaining higher contact angle values and higher flotation recoveries. Another relationship was found for barite between the γ value of $B_{i,j}$ and γ_c , indicating that when γ increased, γ_c increased as well, but similar relationship was not found for the case of calcite. In addition, there are some significant relationships for lignite were found between the breakage parameters and the wettability parameter.

Key words: Grinding, Flotation, Contact angle measurements, Breakage parameters, Wetting parameter

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aőamasında büyük ilgi ve desteğini gördüğüm, değerli öneri ve yorumlarıyla beni yönlendiren Danışman Hocam Sayın Doç.Dr. Meftuni YEKELER'e teőekkürlerimi sunarım.

Bu alıőma sırasında, desteklerini esirgemeyen Maden Mühendisliği Bölüm Baőkanı Sayın Prof.Dr. Mehmet CANBAZOğLU'na, Tez İzleme Komitesinde bulunan Sayın Doç.Dr. nal AKDEMİR'e ve Sayın Yrd.Doç.Dr. Orhan Cerit'e teşekkür ederim.

Tez çalışmasında kullanılan numunelerin teminindeki yardımlarından dolayı Barit Maden Türk A.ő.'nin Sivas Selestit İőletmesi Mdrt Sayın Dr. Emin TEKE'ye, mineral numunelerinin kimyasal analizlerini yapan Sayın Uzman İbrahim KULAKSIZ ve Uzman Dr. Deniz BİNGL'e, maddi katkılarından dolayı C.. Araştırma Fon Saymanlığı'na ve çalıőmam sırasındaki tüm desteklerinden dolayı Maden Mühendisliği Bölümü personeline teőekkürlerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1. Birinci derece kırılma hızı eğrisi	7
Şekil 2. Klinkerin öğütülmesinde birinci derece kırılma hızı eğrileri	8
Şekil 3. Özgül kırılma hızının besleme tane boyutu ile değişimi	9
Şekil 4. -300+250 µm besleme boyutundaki kömürün yaş öğütülmesi	11
Şekil 5. Belirli bir boyuttaki tanenin daha ince boyutlara kırılması	14
Şekil 6. Kırılma dağılım fonksiyonunun çubuk diyagramı	15
Şekil 7. Toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri	17
Şekil 8. Tam karışmış kesikli öğütmede boyut-kütle dengesi işlevinin şematik gösterimi	19
Şekil 9. Sulu ortamda katı ve kabarcık arasındaki temas açısı	33
Şekil 10. Üçlü faz sistemi (katı-sıvı-hava) için adhezyon ve kohezyon işleri	34
Şekil 11. Katının γ_c değerinin temas açısı ölçüm yöntemiyle belirlenmesi ..	39
Şekil 12. Katının γ_c değerinin flotasyon yöntemiyle belirlenmesi	40
Şekil 13. Katının γ_c değerinin ıslanma süresi yöntemiyle belirlenmesi	41
Şekil 14. Katının γ_c değerinin hava kabarcığı toplama yöntemiyle belirlenmesi	42
Şekil 15. Katının γ_c değerinin film flotasyonu yöntemiyle belirlenmesi	43
Şekil 16. Tez çalışmasında izlenen akım şeması	47
Şekil 17. Kullanılan metil alkol çözeltilerinin konsantrasyonlarına karşı yüzey gerilimi değerleri	56
Şekil 18. Kullanılan sodyum klorür çözeltilerinin konsantrasyonlarına karşı yüzey gerilimi değerleri	57
Şekil 19. Mikroflotasyon hücresi ve yan sistemleri	59
Şekil 20. -1180+850 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	62
Şekil 21. -1180+850 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	62
Şekil 22. -1180+850 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	63
Şekil 23. -1180+850 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	63

Şekil 24.	-850+600 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	64
Şekil 25.	-850+600 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	64
Şekil 26.	-850+600 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	65
Şekil 27.	-850+600 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	65
Şekil 28.	-600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	66
Şekil 29.	-600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	66
Şekil 30.	-600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	67
Şekil 31.	-600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	67
Şekil 32.	-425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	68
Şekil 33.	-425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	68
Şekil 34.	-425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	69
Şekil 35.	-425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	69
Şekil 36.	-300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	70
Şekil 37.	-300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	70

Şekil 38.	-300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	71
Şekil 39.	Kalsit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi	72
Şekil 40.	Kalsit mineralinin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi	72
Şekil 41.	Kalsit mineralinin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi	73
Şekil 42.	Kalsit mineralinin kuru, yaş ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi	73
Şekil 43.	Kalsit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri	75
Şekil 44.	Kalsit mineralinin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri	75
Şekil 45.	Kalsit mineralinin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri	76
Şekil 46.	Kalsit mineralinin kuru, yaş ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri	76
Şekil 47.	-600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	79
Şekil 48.	-425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	80
Şekil 49.	-300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	80
Şekil 50.	-600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	81
Şekil 51.	-425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	81
Şekil 52.	-300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	82

Şekil 53. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	82
Şekil 54. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	83
Şekil 55. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	83
Şekil 56. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	84
Şekil 57. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	84
Şekil 58. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	85
Şekil 59. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	85
Şekil 60. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	86
Şekil 61. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	86
Şekil 62. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	87
Şekil 63. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	87
Şekil 64. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki	89
Şekil 65. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki	89

Şekil 66.	-300+212 µm besleme boyutundaki kalsit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki	90
Şekil 67.	-600+425 µm besleme boyutundaki kalsit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi	90
Şekil 68.	-425+300 µm besleme boyutundaki kalsit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi	91
Şekil 69.	-300+212 µm besleme boyutundaki kalsit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi	91
Şekil 70.	-600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yağ ve kimyasal maddeler (SDDS, sodyum-oleat, Aero 845 ve oleik asit) ile yağ öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları	92
Şekil 71.	-425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yağ ve kimyasal maddeler (SDDS, sodyum-oleat, Aero 845 ve oleik asit) ile yağ öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları	93
Şekil 72.	-300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yağ ve kimyasal maddeler (SDDS, sodyum-oleat, Aero 845 ve oleik asit) ile yağ öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları	93
Şekil 73.	-1700+1180 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yağ ve sodyum dodesil sülfat ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	95
Şekil 74.	-1180+850 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yağ ve sodyum dodesil sülfat ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	95
Şekil 75.	-850+600 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yağ ve sodyum dodesil sülfat ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	96
Şekil 76.	-600+425 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yağ ve sodyum dodesil sülfat ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	96
Şekil 77.	-425+300 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yağ ve sodyum dodesil sülfat ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	97

Şekil 78.	-300+212 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları	97
Şekil 79.	Barit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi	98
Şekil 80.	Barit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri	99
Şekil 81.	-600+425 µm besleme boyutundaki baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	102
Şekil 82.	-425+300 µm besleme boyutundaki baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	102
Şekil 83.	-300+212 µm besleme boyutundaki baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	103
Şekil 84.	-600+425 µm besleme boyutundaki baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	103
Şekil 85.	-425+300 µm besleme boyutundaki baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	104
Şekil 86.	-300+212 µm besleme boyutundaki baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	104
Şekil 87.	-600+425 µm besleme boyutundaki baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	105
Şekil 88.	-425+300 µm besleme boyutundaki baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	105
Şekil 89.	-300+212 µm besleme boyutundaki baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	106
Şekil 90.	-600+425 µm besleme boyutundaki barit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki	107
Şekil 91.	-425+300 µm besleme boyutundaki barit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki	108
Şekil 92.	-300+212 µm besleme boyutundaki barit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki	108

Şekil 93.	-600+425 µm besleme boyutundaki barit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi	109
Şekil 94.	-425+300 µm besleme boyutundaki barit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi	109
Şekil 95.	-300+212 µm besleme boyutundaki barit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi	110
Şekil 96.	-600+425 µm besleme boyutundaki baritin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve SDDS ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları	111
Şekil 97.	-425+300 µm besleme boyutundaki baritin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve SDDS ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları	111
Şekil 98.	-300+212 µm besleme boyutundaki baritin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve SDDS ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları	112
Şekil 99.	-1700+1180 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları ..	114
Şekil 100.	-1180+850 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları ..	114
Şekil 101.	-850+600 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları ..	115
Şekil 102.	-600+425 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları ..	115
Şekil 103.	-425+300 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları ..	116
Şekil 104.	-300+212 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları ..	116
Şekil 105.	Kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi	117
Şekil 106.	Kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri	118
Şekil 107.	-600+425 µm besleme boyutundaki kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	121
Şekil 108.	-425+300 µm besleme boyutundaki kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	121

Şekil 109.	-300+212 μm besleme boyutundaki kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	122
Şekil 110.	-600+425 μm besleme boyutundaki kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	122
Şekil 111.	-425+300 μm besleme boyutundaki kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	123
Şekil 112.	-300+212 μm besleme boyutundaki kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	123
Şekil 113.	-600+425 μm besleme boyutundaki kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	124
Şekil 114.	-425+300 μm besleme boyutundaki kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	124
Şekil 115.	-300+212 μm besleme boyutundaki kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu	125
Şekil 116.	-600+425 μm besleme boyutundaki kömür için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki	126
Şekil 117.	-425+300 μm besleme boyutundaki kömür için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki	126
Şekil 118.	-300+212 μm besleme boyutundaki kömür için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki	127
Şekil 119.	-600+425 μm besleme boyutundaki kömür için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi	128
Şekil 120.	-425+300 μm besleme boyutundaki kömür için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi	128
Şekil 121.	-300+212 μm besleme boyutundaki kömür için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi	129
Şekil 122.	-600+425 μm besleme boyutundaki kömürün öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesi sonucu -38 μm boyutuna geçen üretim miktarları	130
Şekil 123.	-425+300 μm besleme boyutundaki kömürün öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesi sonucu -38 μm boyutuna geçen üretim miktarları	130

Şekil 124.	-300+212 μm besleme boyutundaki kömürün öğütme süresine bağlı olarak kuru, yağ ve gazyağı ile yağ öğütülmesi sonucu -38 μm boyutuna geçen üretim miktarları	131
Şekil 125.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kalsit ürününün ıslanma diyagramı (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)	146
Şekil 126.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kalsit ürününün ıslanma diyagramı (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)	146
Şekil 127.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kalsit ürününün ıslanma diyagramı (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)	147
Şekil 128.	Kalsit minerali için temas açısı ölçümleri ile belirlenen m_c değerleri ile x_i arasındaki ilişki (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)	147
Şekil 129.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: SDDS)	149
Şekil 130.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: SDDS)	149
Şekil 131.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: SDDS)	150
Şekil 132.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)	150
Şekil 133.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)	151
Şekil 134.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)	151
Şekil 135.	Kalsit minerali için flotasyon testleri ile belirlenen m_f değerleri ile x_i arasındaki ilişki (Kimyasal madde: SDDS)	152

Şekil 136.	Kalsit minerali için flotasyon testleri ile belirlenen m_f değerleri ile x_i arasındaki ilişki (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)	152
Şekil 137.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -600+425 μm besleme boyutu barit ürününün ıslanma diyagramı	154
Şekil 138.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -425+300 μm besleme boyutu barit ürününün ıslanma diyagramı	155
Şekil 139.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -300+212 μm besleme boyutu barit ürününün ıslanma diyagramı	155
Şekil 140.	Barit minerali için temas açısı ölçümleri ile belirlenen m_c değerleri ile x_i arasındaki ilişki	156
Şekil 141.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -600+425 μm besleme boyutu barit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	157
Şekil 142.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -425+300 μm besleme boyutu barit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	158
Şekil 143.	γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -300+212 μm besleme boyutu barit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	158
Şekil 144.	Barit minerali için flotasyon testleri ile belirlenen m_f değerleri ile x_i arasındaki ilişki	159
Şekil 145.	γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı	161
Şekil 146.	γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı	161
Şekil 147.	γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı	162
Şekil 148.	γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı	162
Şekil 149.	γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı	163
Şekil 150.	γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı	163
Şekil 151.	γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı	164

Şekil 152. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı	164
Şekil 153. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı	165
Şekil 154. Kömür için temas açısı ölçümleri ile belirlenen m_c değerleri ile x_i arasındaki ilişki	166
Şekil 155. γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	167
Şekil 156. γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	167
Şekil 157. γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	168
Şekil 158. γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	168
Şekil 159. γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	169
Şekil 160. γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	169
Şekil 161. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	170
Şekil 162. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	170
Şekil 163. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi	171

Şekil 164. Kömür için flotasyon testleri ile belirlenen m_f değerleri ile x_i arasındaki ilişki	172
Şekil 165. Kalsit minerali için S_i ile γ_c arasındaki ilişki (SDDS ile)	177
Şekil 166. Kalsit minerali için S_i ile γ_c arasındaki ilişki (Sodyum-oleat ile)	177
Şekil 167. Kalsit minerali için S_i ile m_c arasındaki ilişki (Sodyum-oleat ile)	178
Şekil 168. Kalsit minerali için S_i ile m_f arasındaki ilişki (Sodyum-oleat ile)	179
Şekil 169. Kalsit minerali için S_i ile m_f arasındaki ilişki (SDDS ile)	179
Şekil 170. Kalsit minerali için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki (SDDS ile)	180
Şekil 171. Kalsit minerali için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki (Sodyum-oleat ile)	180
Şekil 172. Barit minerali için S_i ile γ_c arasındaki ilişki	181
Şekil 173. Barit minerali için S_i ile m_c arasındaki ilişki	182
Şekil 174. Barit minerali için S_i ile m_f arasındaki ilişki	183
Şekil 175. Barit minerali için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki	184
Şekil 176. Kömürün kuru öğütülmesi için S_i ile γ_c arasındaki ilişki	185
Şekil 177. Kömürün yaş öğütülmesi için S_i ile γ_c arasındaki ilişki	186
Şekil 178. Kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesi için S_i ile γ_c arasındaki ilişki	186
Şekil 179. Kömürün kuru öğütülmesi için S_i ile m_c arasındaki ilişki	187
Şekil 180. Kömürün yaş öğütülmesi için S_i ile m_c arasındaki ilişki	188
Şekil 181. Kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesi için S_i ile m_c arasındaki ilişki	188
Şekil 182. Kömürün kuru öğütülmesi için S_i ile m_f arasındaki ilişki	189
Şekil 183. Kömürün yaş öğütülmesi için S_i ile m_f arasındaki ilişki	190
Şekil 184. Kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesi için S_i ile m_f arasındaki ilişki	190
Şekil 185. Kömürün kuru öğütülmesi için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki	191
Şekil 186. Kömürün yaş öğütülmesi için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki	192
Şekil 187. Kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesi için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki	192

TABLOLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1. Öğütme işleminde kullanılan yardımcı maddeler	21
Tablo 2. Kuvars ve kalsitin öğütülmesinde yüzey aktif maddelerin etkileri	26
Tablo 3. Kalsit numunesinin kimyasal analiz sonuçları	48
Tablo 4. Barit numunesinin kimyasal analiz sonuçları	48
Tablo 5. Kömür numunesinin kimyasal analiz sonuçları	48
Tablo 6. Öğütme deneylerinde kullanılan porselen bilyalı değirmen özellikleri ve deney koşulları	50
Tablo 7. Temas açısı ölçümleri ve flotasyon testlerinde kullanılan çözeltilerin konsantrasyonlarına karşılık yüzey gerilimi değerleri	56
Tablo 8. Kalsit mineralinin öğütülmesi sonucu elde edilen kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ değerleri)	77
Tablo 9. Barit mineralinin öğütülmesi sonucu elde edilen kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ değerleri)	100
Tablo 10. Kömürün öğütülmesi sonucu elde edilen kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ değerleri)	119
Tablo 11. Barit, kalsit ve kömürün kırılma parametreleri ile kırılma özelliklerinin karşılaştırılması	132
Tablo 12. Bazı malzemelere ait kırılma dağılım parametreleri	135
Tablo 13. Değirmen besleme boyutuna bağlı olarak $S_{i-yaş}/S_{i-kuru}$ oranları	136
Tablo 14. Değirmen besleme boyutuna bağlı olarak $S_{i-kimyasal}/S_{i-yaş}$ oranları	137
Tablo 15. Kalsit mineralinin temas açısı ölçüm ve flotasyon yöntemi ile belirlenen γ_c değerleri	145
Tablo 16. Barit mineralinin temas açısı ölçüm ve flotasyon yöntemi ile belirlenen γ_c değerleri	153
Tablo 17. Kömürün temas açısı ölçüm ve flotasyon yöntemi ile belirlenen γ_c değerleri	160

SİMGELER DİZİNİ

Öğütme ile İlgili Simgeler

i	: Tane boyut aralığı
x_i	: Tane boyutu, mm
t	: Öğütme süresi, dak
$w_i(t)$: Değirmende i boyutu aralığındaki malzeme oranı
W	: Değirmendeki toplam malzeme miktarı (gr)
S_i	: Özgül kırılma hızı, dak^{-1}
$B_{i,j}$: Toplam kırılma dağılım fonksiyonu
a_T	: Karakteristik sabit, dak^{-1} (Eşitlik 6)
α	: Karakteristik sabit (Eşitlik 6)
x_0	: Standart boyut, 1 mm
Q	: Düzeltme faktörü
μ	: Karakteristik sabit, mm (Eşitlik 8)
Λ	: Karakteristik sabit (Eşitlik 8)
γ	: Karakteristik sabit (Eşitlik 17)
ϕ	: Karakteristik sabit (Eşitlik 17)
β	: Karakteristik sabit (Eşitlik 17)
θ	: Hesaplanan süre, dak
κ	: Yavaşlama faktörü
$P_i(0)$: Değirmene beslenen malzemede i boyutundan geçen fraksiyon
$P_i(t)$: i boyutundan geçen fraksiyon
N_k	: Kritik hız (dev/dak)
D	: Değirmenin çapı (m)
d	: Bilya çapı (m)
J	: Bilya şarj oranı
U	: Bilyalar arasındaki boşluk oranı
f_c	: Malzeme şarj oranı
c	: Pülpün hacimce katı oranı
w_K	: Katı ağırlığı, gr
w_s	: Sıvı ağırlığı, gr
ρ_K	: Katı yoğunluğu, gr/cm^3
ρ_s	: Sıvı yoğunluğu, gr/cm^3

Islanma ile İlgili Simgeler

γ_{SH}	: Sıvı-hava arayüzey gerilimi, mN/m
γ_{KH}	: Katı-hava arayüzey gerilimi, mN/m
γ_{KS}	: Katı-sıvı arayüzey gerilimi, mN/m
γ_c	: Kritik ıslanma yüzey gerilimi, mN/m
θ	: Temas açısı
W_K	: Kohezyon işi
W_A	: Adhezyon işi
S	: Katı yüzeyinde sıvı için yayılma katsayısı
G	: Serbest enerji değişimi
P	: Basınç, N/m ²
T	: Sıcaklık, °C
n	: Mol sayısı
θ_i	: İleriye giden temas açısı
θ_g	: Geriye giden temas açısı
θ_r	: Pürüzlü yüzey üzerindeki temas açısı
r	: Yüzey pürüzlülük faktörü
$(\Sigma F)^s$: Polimerik moleküldeki bir bölümün dispersiyon kuvveti
V_m^s	: Polimerik moleküldeki bir bölümün molar hacmi
n_s	: Polimerik molekülün bir bölümündeki atom sayısı
ΣM	: Toplam çözelti ağırlığı, gr
m	: Bir damlanın ağırlığı, gr
v	: Bir damlanın hacmi, cm ³
r	: Büret çapı, mm
F	: Düzeltme faktörü
f	: Karakteristik değer (Eşitlik 43)
m_c	: Zisman temas açısı ölçüm eğrisinin ($\cos \theta - \gamma_{SH}$ eğrisi) eğimi
m_f	: Flotasyon verimi-yüzey gerilimi (γ_{SH}) eğrisinin eğimi

EKLER DİZİNİ

EK 1.A.	Kalsit Mineralinin Kuru Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	209
EK 1.B.	Kalsit Mineralinin Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	211
EK 1.C.	Kalsit Mineralinin Sodyum Dodesil Sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	213
EK 1.D.	Kalsit Mineralinin Sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	215
EK 1.E.	Kalsit Mineralinin Aero 845 (55 mg/L) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	217
EK 1.F.	Kalsit Mineralinin Oleik Asit (2×10^{-4} M) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	219
EK 2.A.	Kalsit Mineralinin Kuru Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	221
EK 2.B.	Kalsit Mineralinin Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	222
EK 2.C.	Kalsit Mineralinin Sodyum Dodesil Sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	223
EK 2.D.	Kalsit Mineralinin Sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	224
EK 2.E.	Kalsit Mineralinin Aero 845 (55 mg/L) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	225
EK 2.F.	Kalsit Mineralinin Oleik Asit (2×10^{-4} M) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	226
EK 3.A.	Barit Mineralinin Kuru Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	227
EK 3.B.	Barit Mineralinin Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	229
EK 3.C.	Barit Mineralinin Sodyum Dodesil Sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	231

EK 4.A. Barit Mineralinin Kuru Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	233
EK 4.B. Barit Mineralinin Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	234
EK 4.C. Barit Mineralinin Sodyum Dodesil Sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	235
EK 5.A. Kömürün Kuru Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	236
EK 5.B. Kömürün Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	238
EK 5.C. Kömürün Gazyağı (485 mg/L) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları	240
EK 6.A. Kömürün Kuru Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	242
EK 6.B. Kömürün Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	243
EK 6.C. Kömürün Gazyağı (485 mg/L) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları	244
EK 7.A. Kalsit Mineralinin Kuru, Yaş ve Kimyasal Maddeler ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Temas Açısı Ölçüm Sonuçları	245
EK 7.B. Kalsit Mineralinin Kuru, Yaş ve Kimyasal Maddeler ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Flotasyon Deney Sonuçları	246
EK 8.A. Barit Mineralinin Kuru, Yaş ve Kimyasal Madde ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Temas Açısı Ölçüm Sonuçları	247
EK 8.B. Barit Mineralinin Kuru, Yaş ve Kimyasal Madde ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Flotasyon Deney Sonuçları	248
EK 9.A. Kömürün Kuru, Yaş ve Kimyasal Madde ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Temas Açısı Ölçüm Sonuçları	249
EK 9.B. Kömürün Kuru, Yaş ve Kimyasal Madde ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Flotasyon Deney Sonuçları	250

1. GİRİŞ

Mineral hammaddelerin öğütülmesi cevher hazırlama ve metalurjik işlemlerde önemli bir rol oynar ve maliyeti artıran bir faktör olarak karşıya çıkar. Yapılmakta olan araştırmalar bu maliyetleri azaltmayı amaçlamaktadır (Ryncarz ve Laskowski, 1977; Austin ve Ark., 1984; El-Shall ve Somasundaran, 1984).

Boyut küçültme işlemlerinde enerji tüketimi, öğütücü ortam ve astar aşınma masrafları önemli işletme maliyetlerini oluşturur. Ufalama cihazlarında kullanılan enerjinin %98-99'una varan bölümü iletim kaybı, sürtünme, ısı, ses vb. şekilde harcanarak kaybolmaktadır. Düşük tenörlü ve ince boyutlarda serbestleşen cevherlerin değerlendirilme gerekliliği nedeniyle özellikle ince öğütme işlemi önemini artırmaktadır. Bununla beraber enerji tüketimleri artacak ve öğütme maliyetleri toplam cevher hazırlama maliyetlerinin daha yüksek bir bölümünü oluşturacaktır (El-Shall ve Somasundaran, 1984; Wills, 1985).

Sülfürlü cevherlerin ince boyutlara öğütülmesi (köpük flotasyonuna uygun tane boyutu), cevherin zenginleştirme tesisine beslenmesinden konsantre eldesine kadar olan toplam hazırlama maliyetinin genellikle %20-60'ı kadardır. Dünyada en az bir kaç milyar ton sülfürlü cevherin bu şekilde hazırlanması düşündürücüdür. Karşılaşılan bu yüksek öğütme maliyetleri nedeniyle, süregelen çalışmalar bu gideri azaltmak yönünde olmaktadır. Son 30 yılı aşkın sürede toplam maliyetin azaltılması bir çok yolla başarılmıştır. Bunlar; daha düşük maliyetli (yani daha etkili) öğütme ekipmanı kullanımı (otojen öğütme gibi), öğütücü ortam ve astar yapımında daha ekonomik malzemelerin kullanımı, istenilen öğütme ürünü boyutu korunurken kapasiteyi yükseltmek amacıyla daha iyi kontrol sistemleri kullanımı, öğütme cihazı boyutlarının ekonomik bakımdan avantajlı hale getirilmesi (daha büyük çaplı değirmenlerin gelişimi) ve öğütme koşullarının optimizasyonu (malzeme tane boyutuna uygun öğütücü ortam boyutu seçimi, optimum öğütücü ortam şarj miktarının belirlenmesi, daha yüksek değirmen dönüş hızları, optimum katı oranı seçimi vs.). Pek çok başarılı endüstriyel uygulama, yukarıda verilen maliyet azaltıcı yöntemlerin çoğunu kullanmaktadır (Klimpel, 1997a).

A.B.D. Enerji Bakanlığı tarafından yayınlanan bir raporda; ufalama cihazlarının dizaynı ile %3-16, sınıflandırma cihazlarının dizaynı ile %9-13, proses kontrolü ile %9, öğütmeye yardımcı maddeler ile %3-6 ve diğer teknikler

ile %3 oranında ufalama işlemlerinde enerji tasarrufu bakımından iyileştirmelerin sağlanabileceği bildirilmiştir (Herbst ve Chairman, 1981).

Laboratuvar ve endüstriyel boyutta yapılan öğütme testleri, ufalama cihazlarına ilave edilen kimyasal maddeler ile öğütme işleminin etkilendiğini göstermiştir. “Öğütmeye yardımcı madde” (*grinding aid* veya *grinding additive*) ifadesi ile değirmene ilave edilerek öğütme verimliliğini artıran kimyasal maddeler tanımlanmaktadır. Bu konuda bir çok araştırma yapılmasına rağmen, öğütmeye yardımcı maddelerin etki mekanizmaları tam olarak anlaşılammıştır (Tucker, 1984; Fuerstenau ve Ark., 1985). Ancak, etkileri ile ilgili bir kaç mekanizma bildirilmiştir: Bunlardan ilki, yüzey enerjisindeki azalmaya dayanan ve “Rehbinder etkisi” olarak bilinen mekanizma (Rehbinder, 1931), yüzey sertliğinin değişimine dayanan mekanizma (*surface hardness modification*) (Westwood ve Ark., 1967) ve değirmendeki tanelerin akışının değişimine dayanan mekanizma (Locher ve Seebach,1972; Klimpel, 1982a; 1982b; 1983; 1997a). Öğütme, aynı anda meydana gelen ve birbiri ile ilgili fiziksel ve kimyasal işlemleri içeren kompleks bir işlemdir. Bu nedenle, öğütmeye yardımcı maddelerin etkisinin bir tek mekanizmayla açıklanması beklenmemelidir (El-Shall ve Ark., 1979a, El-Shall ve Somasundaran, 1984; Atlı ve Somasundaran, 1986).

Herhangi bir mineralin veya malzemenin öğütülme kinetiğinin incelenmesinde iki önemli model çoğunlukla kullanılır; enerji-boyut ilişkisi modeli (*energy-size relationship model*) ve populasyon-denge modeli (*population-balance model*). Populasyon-denge modeli öğütme hızlarını oldukça ayrıntılı olarak açıkladığı için enerji-boyut ilişkisini gözardı eder. Kesikli öğütme işleminde değirmene giren malzemenin süreye bağlı olarak tane boyut dağılımını belirlemek için, populasyon-denge modeli kinetik yaklaşımda iki önemli kinetik fonksiyon kullanır. Bunlar; özgül kırılma hızı (S) (*specific rate of breakage*) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu (B) (*primary breakage distribution function*) (Austin ve Ark., 1984; Rajamani ve Guo, 1992). Bu model parametreler yardımıyla, değirmen tasarımı ve öğütme koşullarının bir fonksiyonu olarak ürün tane boyut dağılımları önceden belirlenebilir. Kırılma parametrelerinin (S ve B) belirlenmesinde ise iki genel teknik vardır: Birincisi, kesikli öğütme koşulları altında çalıştırılan laboratuvar veya pilot ölçekli bir değirmende S ve B fonksiyonlarının doğrudan deneysel olarak tespiti, ikincisi ise geri-hesaplama

teknikiği (*back-calculation technique*) olup, besleme ve ürün tane boyut dağılımları tesis ölçekli bir değirmen üzerinde tespit edildikten sonra, bu veriler kullanılarak S ve B fonksiyonlarının geri-hesaplama ile belirlenmesidir (Sönmez ve Demirel, 1996; Klimpel, 1997b). Belirtilen ilk teknik, tek-boyut fraksiyon tekniği (*one-size fraction technique*) (Austin ve Ark., 1984) olarak bilinir ve laboratuvar düzeyinde bir çok farklı besleme boyutu malzemenin öğütülmesinde yaygın olarak kullanılır. İkinci teknik ise laboratuvar verileriyle de kullanılabilir, ancak en sık uygulaması endüstriyel veriler üzerinedir.

Katıların veya mineral tanelerinin ıslanabilirliği, köpük flotasyonu, yağ aglomerasyonu, katı-sıvı ayırımı ve tozun bastırılması gibi bir çok teknolojik işlemi etkileyen önemli bir etken olarak bilinir (Fuerstenau ve Ark., 1991). Benzer şekilde, ıslanma özellikleri bazı işlemlerin performansını ve davranışını da etkiler. Temas açısı ölçümleri, katıların veya minerallerin ıslanma davranışını değerlendirmek için kullanılmıştır (Horsley ve Smith, 1951). Flotasyon yöntemi, katıların ıslanma farklılıklarından yararlanarak minerallerin ayrılmasında kullanılan ve yüzey kimyasına dayanan bir işlemdir. Bu nedenle, mineral yüzeylerinin ıslanma özellikleri, yüzey kimyasına dayanan işlemlerde seçimliliği sağlamak için onların kritik ıslanma yüzey gerilimi (*critical surface tension of wetting*, γ_c) değerleri ile tanımlanabilir (Yarar ve Kaoma, 1984; Kelebek, 1987; Yarar, 1988; Yekeler ve Yarar, 1994a).

Katıların veya minerallerin kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c), herhangi bir yüzey gerilimine (γ_{SH}) sahip sıvı tarafından katıların ıslanma koşulunu tarif eder. $\gamma_c < \gamma_{SH}$ olduğunda sıvı katı yüzeyinde bir temas açısı oluştururken ($\theta > 0$), $\gamma_c \geq \gamma_{SH}$ olduğunda sıvı katı yüzeyinde yayılır (Shafrin ve Zisman, 1960; Zisman, 1964; Parekh ve Aplan 1974; Yarar ve Kaoma, 1984; Williams ve Fuerstenau, 1987; Kelebek, 1987; Yarar ve Aksu, 1997).

Öğütmenin ve özellikle bilyalı değirmenlerle kuru ve yaş öğütmenin cevher hazırlama operasyonları içinde gerek hazırlama işlemleri, gerekse yarı-ürün, son ürün elde etme açısından çok önemli bir yere sahip olduğu çok iyi bilinmektedir. Çünkü öğütmeden elde edilen ürünün zenginleştirme işlemleri sırasında davranışı ve piyasada aranan özelliklere sahip olmasını doğrudan etkileyen parametreler öğütmenin cinsi, şekli ve kontrolü ile ilgilidir.

Konvansiyonel öğütme teknikleri olan kuru ve yaş öğütmeden belirli bir dereceye kadar ince malzeme elde edilebileceği ve öğütme ilerledikçe tozların sıvı gibi davranıp aglomerasyon problemine karşı bazı kimyasal maddelerin öğütme sırasında kullanımı hissedilir avantajlar sağlayacaktır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Minerallerin kırılıp öğütülmesinde etkili olan bağ enerjisinin kimyasal maddelerle yenilmesiyle ince öğütmede ya da uygun serbestleşme derecesine kadar öğütmede harcanan spesifik enerji daha az olacaktır. Yüzey aktif maddelerin kullanılması suretiyle minerallerin yüzey enerjilerinin (γ_{KH} ; katı-hava fazı arasındaki yüzey enerjisi; γ_{KS} ; katı-sıvı fazı arasındaki yüzey enerjisi) değerleri azalacağından hem kırılma enerjileri azalacak, hem de flotasyon ile zenginleştirme öncesi iyi bir karıştırıcı olan değirmenlerde kimyasal madde kullanarak öğütme, minerallerin kırılması için gerekli kırılma enerjilerini -yüzey enerjisini düşürerek- azaltmakla birlikte iyi bir kimyasal adsorpsiyon mekanizması sağlayarak hidrofobluk özelliğini kazandırmaya yardımcı olacaktır.

Bu tez çalışmasının amacı, öğütme işleminde kimyasal madde ilave edilmeden ve ilave edilerek öğütmeyle elde edilen kırılma parametrelerinin (S_i ; özgül kırılma hızı ve $B_{i,j}$; toplam kırılma dağılım fonksiyonu değerleri) nasıl etkilendiğini belirlemek ve tane boyut dağılımlarının simülasyonlarını yaparak deneysel sonuçlarla uyumlu olup olmadığını görmektir. Ayrıca, kırılma parametreleri belirlenen öğütme ürünlerinin ıslanma farklılıklarını ortaya koyan deneylerle (temas açısı ölçümleri ve mikroflotasyon testleri), elde edilen sonuçların kırılma parametreleri ile korelasyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

Araştırmanın birbiriyle tamamen ayrı işlemler olan öğütme ile flotasyon arasındaki ilişkiyi belirlemesiyle, pek çok bilinmeyen olan flotasyon metoduna ışık tutarak, bilime katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

Belirtilen bu amaçlara ulaşılmasında, kalsit, barit ve linyit kömürü numuneleri kullanılmıştır. Öğütme testlerinde porselen bilyalı değirmen, öğütme sonrası ürünlerinin tane boyut dağılımlarının simülasyonunda PSUSIM adlı paket program, ıslanma özelliklerinin tespitinde goniometre ve mikroflotasyon hücresi kullanılmıştır.

1.2. Genel Bilgiler

1.2.1. Öğütme Kinetiği ve Kırılma Parametreleri

Ufalama işlemi bir kimyasal bozunma reaksiyonuna benzetilerek, reaktör (öğütme cihazı), reaktant (değirmene beslenen farklı tane boyutları), reaksiyon kinetiği (tane boyutu fraksiyonlarının kırılma hızları), öğütme cihazındaki kalış zamanı dağılımı ve reaksiyon termodinamiği (malzemenin kırılma özellikleri) kavramları ile izah edilebilir. Taneler öğütme cihazında boyutlarına bağlı olarak belirli bir hızla kırılırlar. Değirmenler, $A \rightarrow B$ 'ye çeviren basit bir kimyasal reaktörden farklı olarak, beslemedeki tüm boyutlar üzerinde işlem yaparlar ve sonuçta nihai malzeme boyutunu oluştururlar. Yine kimyasal bir reaktöre benzer olarak, her bir boyutun kırılma hızlarının bilgisi, bu tanelerin nasıl kaybolduğunun (kırıldığıının) önceden bilinmesi ile mümkün olur. Ancak, basit bir kimyasal reaksiyonun aksine, sabit bir tane boyutunun parçalanması bile tüm tane boyutu dizisine sahip bir ürün oluşturur. Bir boyuttan kırılarak daha ince bir boyut aralığına geçen malzeme ürün olarak değerlendirilir. Öğütme işleminin ayrıntılı olarak izahının, toplam kırılma dağılım fonksiyonu kavramını gerektirdiği açıktır.

Bir boyutun ne kadar hızlı kırıldığıının ve onun kırılması ile oluşan parçaların hangi boyutlarda olduğunun bilinmesi, reaktörün yani değirmenin boyut-kütle dengesi (*size-mass balance*) veya populasyon dengesinin (*population balance*) esas tanımıdır (Austin ve Ark., 1984; Klimpel, 1997b).

1.2.1.1. Birinci derece öğütme hipotezi

Küçük ve büyük ekipmanlarla yapılan ayrıntılı çalışmalar, tanelerin ufalanmasının birinci derece kırılma kinetiği izlediğini göstermiştir (Klimpel, 1997b). Birinci derece ifadesi, herhangi bir reaktörde reaksiyonun yavaşlamadan devam etmesi anlamına gelmektedir. Reaksiyonun yani kırılmanın yavaşlaması durumunda ise birinci derece olmayan kırılma hızları söz konusudur.

Birinci derece kırılma hipotezinin daha iyi anlaşılabilmesi için W miktarındaki malzemenin bir değirmene konulduğu düşünülebilir. Değirmen içindeki malzemenin boyut aralıkları ise bir geometrik elek serisi ile ($\sqrt{2}$ veya $^4\sqrt{2}$) ve üst boyuttan başlayarak boyut aralıkları 1, 2, 3, ... şeklinde tanımlanmış olsun. Bu boyut aralıklarından en üst boyut aralığı değirmene beslenirse $t=0$ anında $w_1(0)=1$ olacaktır. Yani malzemenin tamamı anlaşılır. Bu malzeme artan sürelerle ($t=1, 2, 4, 8, \dots$ dakika gibi) değirmende öğütülerek, orijinal tane boyutunda kalan miktar $w_1(t)$ elek analizi ile tespit edilir. $w_1(t)$ öğütme süresine bağlı olarak lineer şekilde azalıyorsa, malzemenin birinci derece kırılma hipotezine uygun olarak kırıldığı ifade edilir. Buna göre,

$$1 \text{ nolu boyutun veya boyut aralığının kırılmadan ileri gelen kaybolma hızı} \\ \propto w_1(t)W \quad (1)$$

Eşitlik 1 analitik olarak ifade edilirse;

$$-\frac{d[w_1(t)W]}{dt} \propto w_1(t)W \quad (2)$$

W sabit olduğu için,

$$dw_1(t) / dt = -S_1 w_1(t) , \text{ olur.} \quad (3)$$

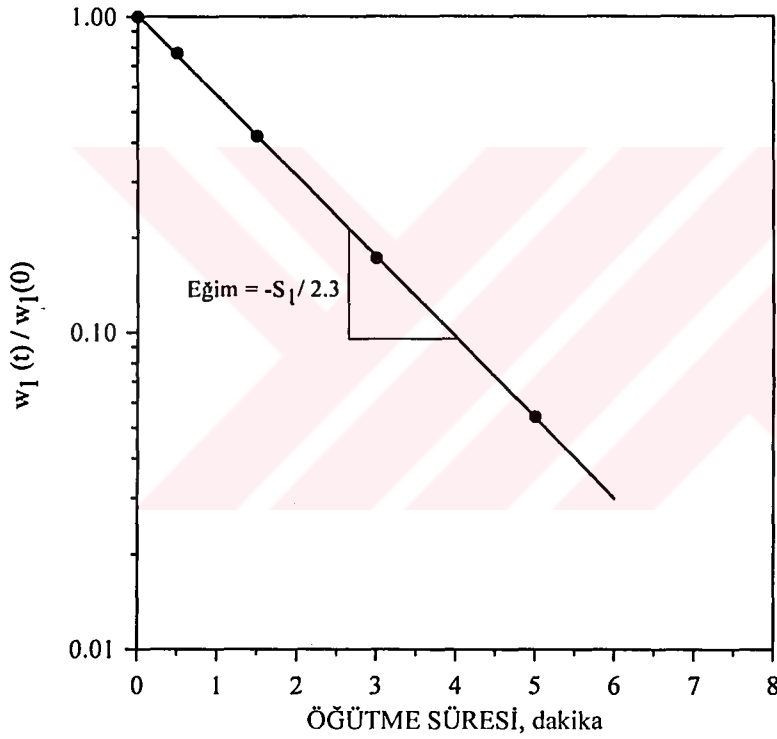
Burada, S_1 eşitlik sabitidir ve özgül kırılma hızı (dak^{-1}) (*specific rate of breakage*) olarak isimlendirilir. Eğer S_1 zamana bağlı olarak değişmiyor ise, bu integrasyonla;

$$w_1(t) = w_1(0)\exp(-S_1 t) \quad (4)$$

veya

$$\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_1 t / 2.3 \text{ olarak ifade edilir.} \quad (5)$$

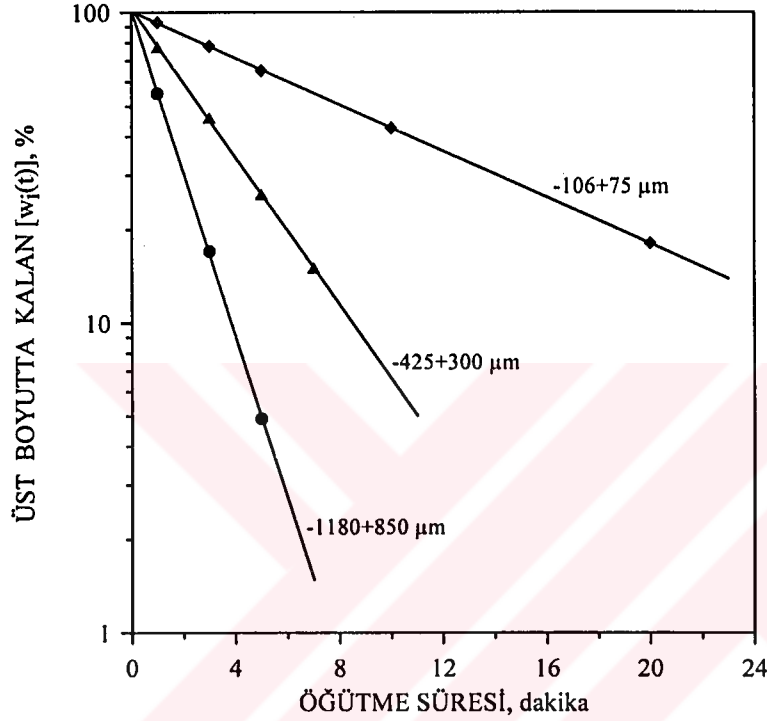
Öğütme süresinin 1 nolu boyutun elek üstünde kalan oranına karşı değişimi çizilirse, elde edilen doğrunun eğimi $-S_1/2.3$ olacaktır (Şekil 1). Birinci derece kırılma hipotezi ve diğer ilgili varsayımların kanıtlanması, bir i boyutu fraksiyonunun kırılmasının radyoaktif izlenmesi ile başarılmıştır. Sonrasında, daha ayrıntılı bilgiler öğütme sırasında bu fraksiyondan radyoaktivitenin kaybolması ve i boyutundan daha ince boyut fraksiyonlarına izli malzemenin geçişinin takibiyle sağlanmıştır (Gardner ve Austin, 1962).



Şekil 1. Birinci derece kırılma hızı eğrisi (Austin ve Ark., 1984)

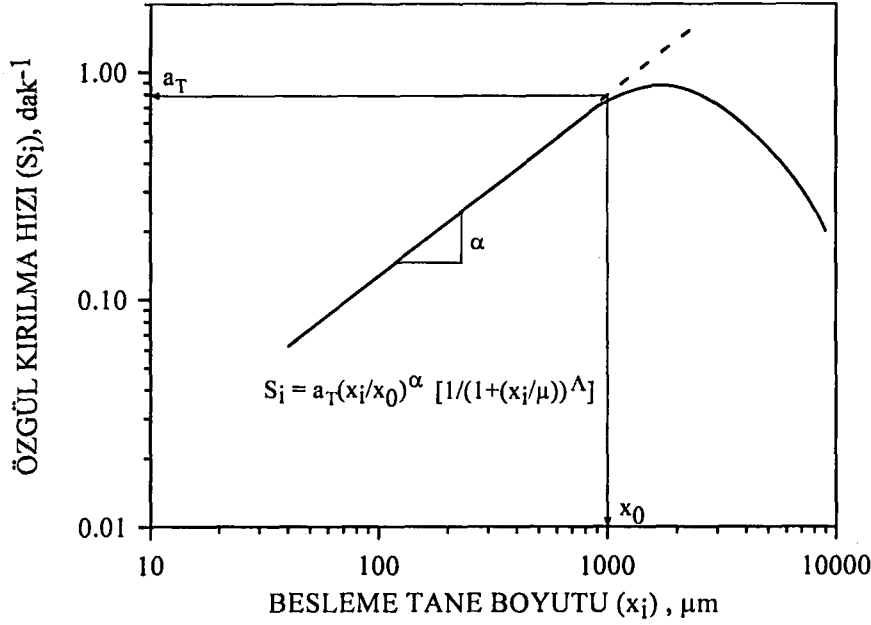
Şekil 2'de gösterilen tane boyutu fraksiyonlarında kırılma hızlarının birinci derece olduğu ve tane boyutunun küçülmesiyle özgül kırılma hızının (S_i) azaldığı görülmektedir. Bu şekilde, özgül kırılma hızlarının tespitine "tek-boyut fraksiyon tekniği (*one-size-fraction technique*)" adı verilir. Tane boyutunun küçülmesi ile kırılma hızlarının azalması tüm boyut küçültme cihazları için tipiktir, yani iri

boyutlu tanelerin kırılması ince boyutlu tanelerin kırılmasından daha kolaydır. Bu durum, tane boyutu küçüldükçe “Griffith” türü çatlakların azalmasıyla açıklanmıştır.



Şekil 2. Klinkerin öğütülmesinde birinci derece kırılma hızı eğrileri (Austin ve Ark., 1984)

Özgül kırılma hızının besleme tane boyutu ile değişimi Şekil 3’de verilmiştir. Sabit değirmen koşulları altında tanelerin kırılma hızının büyük ölçüde tane boyutuna bağlı olduğu görülmektedir. Yaklaşık olarak 1 mm tane boyutunun üzerinde görülen S_i değerindeki azalma, öğütücü ortam olarak kullanılan bilyalar tarafından tanelerin yakalanıp kırılmasının zorlaşması nedeniyle.



Şekil 3. Özgül kırılma hızının besleme tane boyutu ile değişimi (Austin ve Ark., 1984)

Normal kırılma bölgesinde özgül kırılma hızı;

$$S_i = a_T(x_i/x_0)^\alpha \text{ ile tanımlanır.} \quad (6)$$

Burada, α değeri pozitif bir sayı olup, kırılma hızı eğrisinin eğimidir (Şekil 3). Bu değer, normal olarak 0.5-1.0 arasında değişmekte ve test koşullarının normal çalışma aralığında olması koşuluyla malzemenin bir karakteristiğidir. a_T değeri ise öğütme koşullarına bağlı olarak değişir. Standart test koşulları altında α değerinin malzemenin malzemeye değişimiyle a_T değeri de (dak^{-1}) değişecektir. x_0 standart bir boyut olup, a_T değeri ise $x_0=1$ mm tane boyutundaki özgül kırılma hızıdır.

İri boyutlu taneler için, çoğunlukla birinci derece olmayan kırılma kinetiğinin gözlemlendiği ve başlangıçta hızlı olan kırılmanın daha sonra yavaşladığı tespit edilmiştir. Bazı çok büyük ve sağlam taneler düşük bir kırılma hızı ile bilyalar tarafından kırılırlar. Sonuç olarak, normal kırılma bölgesinde ince tanelerin birinci derece kırılması ve anormal kırılma bölgesinde ise iri tanelerin birinci derece olmayan kırılma kinetiği söz konusudur. Anormal kırılma

bölgesinde, ortalama kırılma hızı, malzemenin %95'inin kırılması için gerekli süre ile tanımlanabilir. İri boyutların ortalama kırılma hızı belirli bir tane boyutundan sonra azalmaya başlar. x_m boyutunda S_i değeri maksimum olur ve x_m malzemenin malzemeye değişen bir tane boyutudur. x_m , μ değeriyle ilişkili olup, her ikisi de tane boyutuna karşı çizilen kırılma hızı eğrisinin kıvrılmaya başladığı konumla ilgilidir. Değirmende anormal kırılmanın varlığı verimsizliğe neden olur. Taneler, bilyaların enerjisinin aktarılması için çok büyüktür. Ancak, verimlilikteki kayıpla beraber istenilen ürün kalitesine bağlı olarak çentme ve aşındırma ile ince ürün verebilirler. Anormal kırılma bölgesinde Q düzeltme faktörü kullanılarak özgül kırılma hızı aşağıdaki Eşitlik 7 ile verilebilir:

$$S_i = a_T(x_i/x_0)^\alpha Q \quad (7)$$

$$Q = 1/[1+(x_i/\mu)^\alpha] \quad (8)$$

Q fonksiyonu, tane boyutunun bir fonksiyonu olarak kırılma hızı eğrisinde mevcut olan eğriliği düzeltmek için bir katsayıdır. İnce boyutlar için $Q=1$ 'dir ve iri boyutlar için bu değer azalır. μ değeri düzeltme faktörünün (Q) 1/2 olduğu tane boyutudur ve değirmen koşullarıyla değişir. Değirmendeki astarlar ve yüksek dönüş hızları katarakt etki sonucu düşme hareketini artıracığından büyük tanelerin kırılma hızını artıracaktır, yani daha büyük μ değerleri alınabilecektir. Ancak, bu etkileri değerlendirebilecek ilişkiler henüz tespit edilememiştir. Λ ise pozitif bir sayı olup, boyut artarken kırılma hızının nasıl azaldığını gösterir ve malzemenin karakteristiğine bağlıdır.

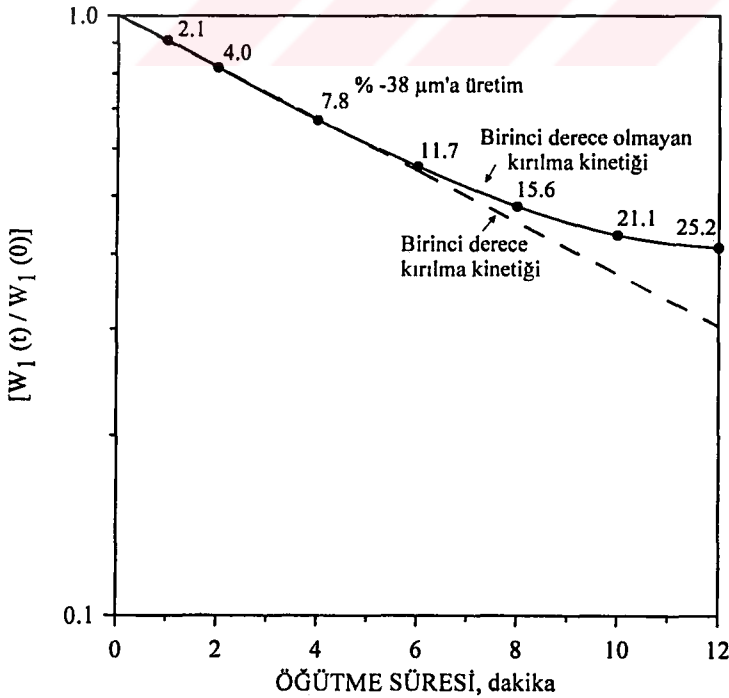
Λ daima α 'dan büyüktür. Maksimum kırılma hızı noktasından sonra kırılma hızının azalması nedeniyle negatif bir eğim oluşur ve bu durumda $\Lambda > \alpha$ olur.

Küçük öğütücü ortam boyutları, değirmene beslenen ince tane boyutlarının kırılmasında daha etkindirler, ancak her ortam boyutu için bir tane boyutu vardır ki öğütme hızı belirgin bir şekilde azalır. Buna karşılık, büyük öğütücü ortamlar da değirmene beslenen iri tanelerin kırılmasında küçük ortamlara göre daha

etkinlerken, ince tanelerin kırılmasında daha etkisizdirler. Bu nedenle, endüstride çoğunlukla ortam boyutu seçimi (ortam boyutu karışımının seçimi) cihaz verimliliği ve daha düşük maliyet sağlamak bakımından önemlidir. Besleme boyut dağılımı aralığı genişledikçe, öğütücü ortam boyut dağılımı aralığını da genişletmek gerekir (Klimpel, 1997b).

1.2.1.2. Birinci derece olmayan öğütme hipotezi

Öğütme süresinin ilerlemesi ile değirmende ince boyutlu malzeme miktarının artması sonucu, kuru öğütmede tanelerin aglomerasyonu ve yaş öğütmede ise viskoziteden ileri gelen pülp reolojisi değirmenlerde problemlere sebep olmaktadır. Bu etkilerin sonucunda özgül kırılma hızı birinci derece öğütme kinetiğinden uzaklaşmaktadır (Şekil 4). Öğütme ilerledikçe ince malzeme artarak öğütme zorlaşacak ve “yavaşlama etkisi (*slowing-down effect*)” olarak bilinen bu durum belirginleşecektir (Klimpel, 1997b).



Şekil 4. -300+250 µm besleme boyutundaki kömürün yaş öğütülmesi (Klimpel, 1997b)

Kuru olarak çok ince tane boyutlarına öğütme yapılması, tüm öğütme işleminin yavaşlamasına neden olabilir. Yavaşlama etkisi, bilyaların ince malzemeye kaplanması şeklinde gözükabilir. Bununla birlikte, ince tanelerin oluşturduğu yatak akışkana benzer özellikler gösterir. Böylece, taneler bilyaların çarpışma bölgesinden kaçarak parçalanma için gereken darbeye maruz kalmazlar. Öğütülen farklı malzemeler yavaşlama etkisini, taneler arasındaki çekim kuvvetlerindeki farklılıklar nedeniyle farklı özellikte gösterirler.

Yumuşak malzemelerin bilyalı değirmende uzun süre kuru olarak öğütülmesi sonucunda ince tanelerin peletlenerek daha büyük taneler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yavaşlama etkisi kısa öğütme sürelerinde de meydana gelebilir ve ince tanelerin birleşerek daha büyük taneler oluşturması gözlenmeyebilir.

İnce boyutlara yapılan öğütme işlemlerinde, öğütmeye yardımcı bazı kimyasal maddeler kullanılarak tanelerin yüzey özellikleri ve çekim kuvvetleri değiştirilebilir. Böylece, ince kuru öğütme işleminde gözlenen yavaşlama etkisi yok edilebilir veya azaltılabilir. İnce malzemenin kimyasal madde ile muamelesi sonucunda gözlenen en dikkate değer fiziksel değişim, malzemenin akışkanlık özelliğinin artmasıdır (Locher ve Seebach, 1972).

Yavaşlama etkisinin, değirmen şarjındaki tüm tane boyutlarına eşit derecede uygulandığı varsayılır. Toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri değişmezse, yavaşlama etkisi altında değişmeyen ürün tane boyut dağılımıdır. Ancak, belirli bir boyut dağılımına ulaşmak için gereken öğütme süresi daha uzun olacaktır. Bu nedenle;

$$S'_i(t) = KS_i(0) \quad (9)$$

Burada; $S_i(0)$ normal kırılma hızı, $S'_i(t)$ ortalama S_i değeri (öğütme süresi sıfırdan t anına kadar) ve K ise yavaşlama faktörü ($0 \leq K \leq 1$) olup, değirmendeki ince tane miktarı arttıkça bu değer küçülür.

Gerçek öğütme süresine (değirmende kalma süresi, t), hesaplanan süre (tahmin edilen süre, θ) birinci derece kırılma bölgesinde eşit olup, yavaşlama bölgesindeki bir boyut dağılımına ulaşmak için;

$$w_1(t)/w_1(0) = \exp[-S_1(0)\theta] = \exp[-KS_1(0)t] \text{ ile izah edilir.} \quad (10)$$

$$\text{Bu nedenle, } K = \theta/t \quad (11)$$

t zamanındaki S_i değeri ise,

$$S_i(t) = \kappa S_i(0) \text{ ile ifade edilir.} \quad (12)$$

κ yine yavaşlama faktörü olup ($0 \leq \kappa \leq 1$), değirmendeki malzemenin inceliğinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle t 'nin de bir fonksiyonudur.

$$dw_1(t) = -S_1(0)w_1(t)d\theta \text{ ve } dw_1(t) = -S_i(t)w_1(t)dt \text{ olduğu için,}$$

$$\kappa = d\theta/dt' \text{ dir.} \quad (13)$$

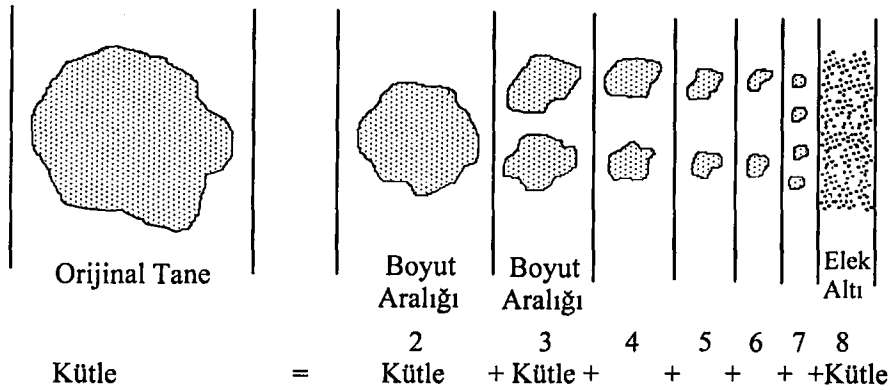
K ve κ arasındaki ilişki ise;

$$Kt = \int_0^t \kappa dt \quad (14)$$

Yaş öğütme işleminde çok yüksek pülp yoğunluklarında oluşan yavaşlama etkisi, değirmen torkundaki azalmayla açıklanabilir. Fakat, normal pülp yoğunluklarında gözlenen yavaşlama etkisi değirmen torkundaki bir azalmayla ilişkili değildir.

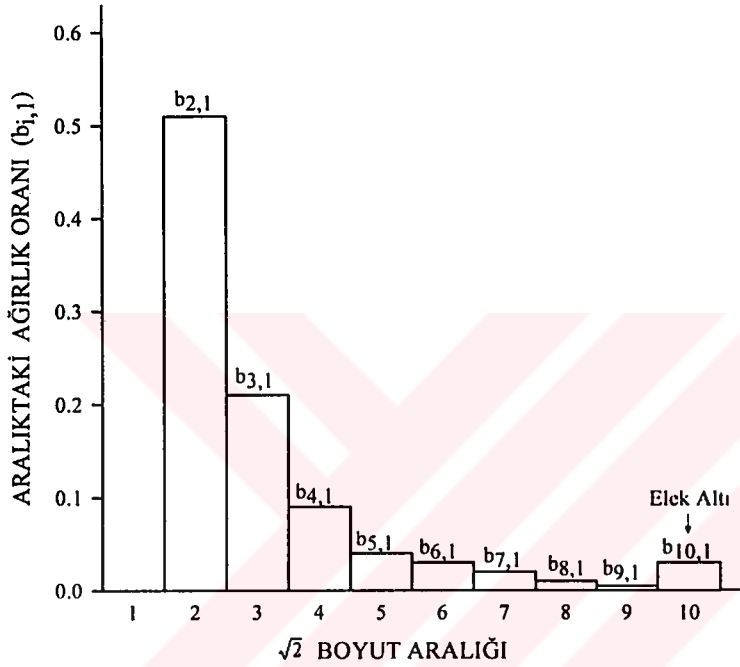
1.2.1.3. Kırılma dağılım fonksiyonu parametreleri

Belirli bir boyuttaki tanelerin (veya dar bir tane boyut aralığının) kırılması ile daha ince tane boyutları oluşmaktadır (Şekil 5). Bu durum yine bir kimyasal bozunma reaksiyonu olarak düşünülebilir. Yani, orijinal tanenin daha ince boyutlara (2, 3, 4,... n) kırılması söz konusudur. Kimyasal bir reaksiyona benzetilerek işleme devam edildiğinde, bir tanenin bozunması yani kırılması bir zaman-miktar işlemi (*time-rate process*) olarak incelenebilir (yani kinetik olarak tanımlanan yöntem). Kırılma olduğu zaman üretilen farklı boyuttaki malzeme miktarları, termodinamik orijinli özellik (yani kırılan malzemenin bir fonksiyonu) olarak kabul edilebilir. Böylece, ekipman ve işletme koşullarındaki değişimin bir fonksiyonu olarak deneysel hız sabitlerinin ölçülmesi dahil, hız işleminin yapısı tamamıyla ve mantıklı bir şekilde tanımlanabilir. Ayrıca, kırılma dağılım fonksiyonunun deneysel olarak belirlenmesi ile boyut küçültme işlemi üzerinde malzeme orijinli özelliklerin etkisi eşsiz bir şekilde karakterize edilebilir ve böylelikle farklı malzemelerin kırılma karakterlerinin karşılaştırılmasında bu değerler anahtar bir rol oynarlar (Klimpel, 1997b).



Şekil 5. Belirli bir boyuttaki tanenin daha ince boyutlara kırılması

Tanenin değirmende ilk anda oluşan kırılmayla parçalara ayrılması ile ilk kırılma meydana gelir ve değirmen içinde parçalanmış tanelerin karışımından meydana gelen bir ürün oluşur. Eğer, parçalanma daha ileri bir kırılmaya uğramadan ölçülürse, bu ilk kırılma dağılımı (*primary breakage distribution*) olur (Şekil 6).



Şekil 6. Kırılma dağılım fonksiyonunun çubuk diyagramı

Kırılma dağılımını karakterize etmede iki uygun sembolleme vardır: Birincisi, 1 nolu boyut aralığındaki malzemenin kırılmasıyla oluşan ürün içindeki i boyutu aralığındaki malzemenin ağırlık oranı $b_{i,1}$ sembolü ile ifade edilir. $b_{i,1}$ sembolündeki i 2'den n 'e kadar bir değer alır ve böylece 1 boyutu aralığından üretilen parçaların dağılımı tanımlanabilir. Genelde, $b_{i,j}$ matriksi ilgili tüm boyutların kırılmasının tanımlanmasını gerektirir, yani $b_{i,1}$ serisinde $n \geq i \geq 2$ ve $b_{i,2}$ serisinde $n \geq i \geq 3$, vs. Yaygın olarak kullanılan ikinci sembolleme ise b değerinin en alt boyut aralığından itibaren toplanması ile elde edilir ve $B_{i,1}$ sembolü ile ifade edilir. $B_{i,1}$ sembolü, 1 nolu boyut aralığından kırılan malzemenin i boyutu aralığındaki toplam ağırlık miktarını ifade etmektedir (Eşitlik 15 ve 16).

$$B_{i,j} = b_{n,j} + b_{n-1,j} + \dots + b_{i,j} \quad (15)$$

$$\text{Daha genel bir ifadeyle, } B_{i,j} = \sum_{k=n}^i b_{k,j} \quad (16)$$

$B_{i,j}$ formu tek boyut fraksiyon tekniği kullanılarak, en kısa süreli öğütme ürününün tane boyut dağılımından belirlenir. $B_{i,j}$ değerlerinin öğütme süresiyle değişmediği ifade edilir ve bu yine radyoaktif izleme yöntemiyle Gardner ve Austin (1962) tarafından kanıtlanmıştır.

Bütün malzemeler için tüm değirmen koşulları altında B değerleri matrisini belirlemek imkansız gözükmemektedir. Ancak, B değerlerinin normal öğütme koşulları altında çoğunlukla değirmen şartlarına bağlı olmadığı bulunmuştur (Austin ve Ark., 1984).

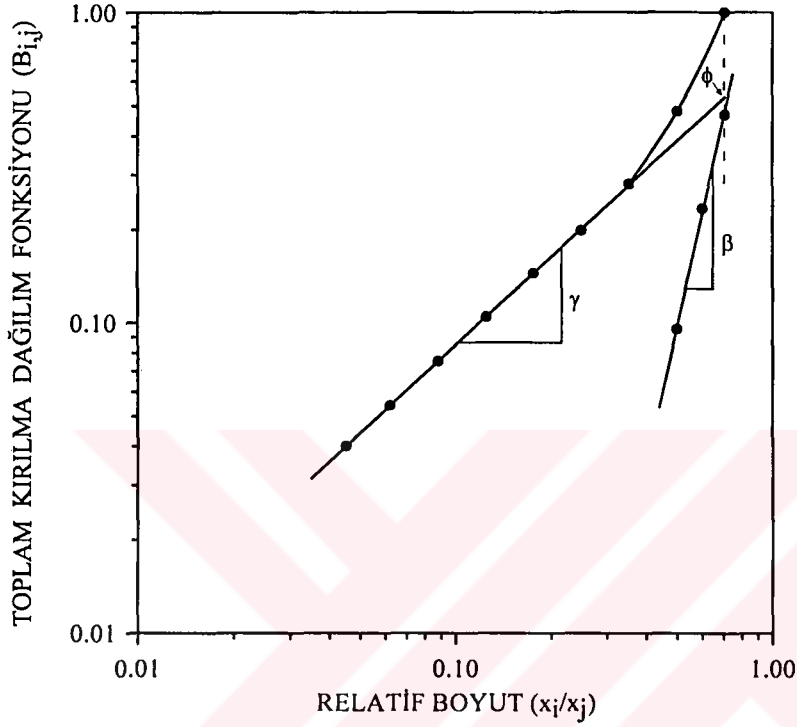
B değerleri tüm malzemeler için benzer genel bir formda sunulabilir. Ayrıca, B değerleri boyutsal olarak normalize edilebilir. B değerleri normalize edildiğinde, B matrisi bir vektöre indirgenir ve $b_{i,j}$ yerine $b_{i,j}$ ile ifade edilir.

Sonuç olarak; toplam kırılma dağılım fonksiyonunda ($B_{i,j}$) üç önemli husus söz konusudur: Birincisi, B değerleri normal değirmen koşulları altında malzeme miktarı, bilya yükü, değirmen çapı, öğütme süresine vs. bağlı değildir. Bu gerçeği yeterince izah edecek bir açıklama yoktur. Ancak, bir çok testle bu doğrulanmıştır.

İkincisi, $B_{i,j}$ değerleri normalize edilerek logaritmik bir formda sunulabilir. Böylece, tüm taneler boyutsal olarak benzer bir parça dağılımı gösterirler.

Üçüncüsü ise, $B_{i,j}$ değerlerinin logaritmik formda çizilen iki doğrunun ampirik bir fonksiyonuyla (Eşitlik 17) sunulabilmesidir (Şekil 7). Burada γ , β ve ϕ değerleri malzemenin kırılma dağılımını tanımlayan karakteristik değerlerdir. Bu fonksiyon, toplam kırılma dağılım fonksiyonu (*primary breakage distribution function*) ve her malzeme için ayrı ayrı hesaplanır.

$$B_{i,j} = \phi_j \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\gamma + (1 - \phi_j) \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\beta, \quad 0 \leq \phi_j \leq 1 \quad (17)$$



Şekil 7. Toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri (Austin ve Ark., 1984)

γ değeri, boyut dağılımındaki ince malzeme miktarının az veya çok olması ile ilgili bir faktördür. γ değerinin azalması daha yüksek oranda ince malzeme üretildiğini gösterir. γ değeri boyut dağılım eğrisinin eğimi olup, genel olarak 0.5-1.5 arasında değişir. ϕ ve β değerleri ise besleme boyutuna yakın olan fraksiyonların ne kadarının alt boyuta dağıldığını veya geçtiğini temsil eden fonksiyon değerleridir. Genel olarak β değeri 2.5-5 arasında, ϕ değeri ise 0.5-1 arasında değişir. Değirmenden alınan ürünün boyut dağılımı özellikle γ değerine duyarlıdır.

Toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri, Austin ve Ark. (1984) tarafından sunulan BI, BII ve BIII hesaplama yaklaşımlarından biriyle

belirlenebilir. Bunlardan BII yaklaşımında en kısa öğütme süresi esas alınarak $B_{i,j}$ değerleri bulunabilir. BII yaklaşımının ifadesi, Eşitlik 18'de verilmiştir:

$$B_{i,i} = \frac{\log\left[\frac{(1 - P_i(0))}{(1 - P_i(t))}\right]}{\log\left[\frac{(1 - P_2(0))}{(1 - P_2(t))}\right]}, \quad i > 1 \quad (18)$$

Burada; $P_i(t)$ t zamanında i boyutundan geçen toplam fraksiyon, $P_i(0)$ beslenen malzemede i boyutundan geçen toplam fraksiyondur.

1.2.1.4. Öğütmenin boyut-kütle dengesi modeliyle açıklanması

Öğütme işleminin izahında önemli bir matematiksel yaklaşım boyut-kütle dengesidir (*size-mass balance*). Öğütme işleminde kütle korunması ve tanelerin sayısı bilinmediği için kütle bazında çalışmak daha uygundur.

Şekil 8'de öğütme sırasında küçük boyutlu tanelerin oluşumu şematize edilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, 1 nolu boyuttan tüm boyutlara, 2 nolu boyuttan daha alt boyutlara vb. malzeme geçmektedir. Bu olay, tüm fraksiyonların özgül kırılma hızları ve kırılma dağılım fonksiyonları dikkate alınarak matematiksel olarak incelenirse;

1. j boyutlu malzemenin kırılması ile daha ince boyutlara kaybolma hızı;

$$= S_j w_j(t) W \quad (19)$$

2. j boyutlu malzemenin kırılması ile üretilen i boyutlu malzemenin oluşma hızı;

$$= b_{i,j} S_j w_j(t) W \quad (20)$$

3. i boyutlu malzemenin kırılması ile daha ince boyutlara kaybolma hızı;

$$= S_i w_i(t) W \quad (21)$$

4. i boyutlu malzemenin net üretim hızı = Tüm daha iri boyutların kırılması ile toplam oluşma hızı - i boyutunun kaybolma hızı

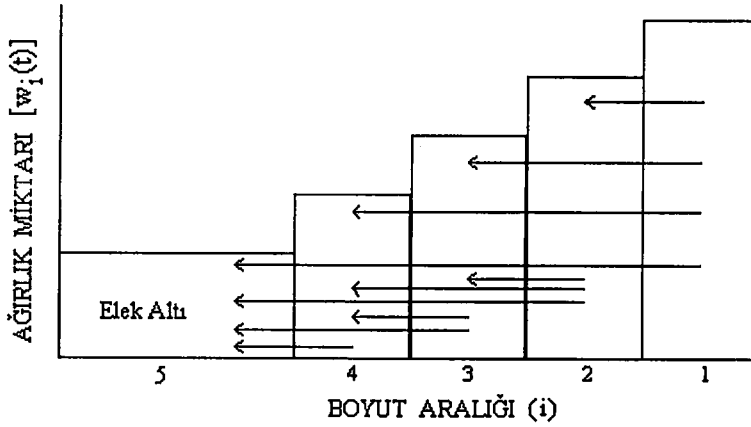
Sembolik olarak, Şekil 8’de gösterilen nihai denge;

$$\frac{d[w_i(t)W]}{dt} = [b_{i,1}S_1w_1(t)W + b_{i,2}S_2w_2(t)W + \dots + b_{i,i-1}S_{i-1}w_{i-1}(t)W] - S_iw_i(t)W$$

Bu eşitlik daha genel bir ifade ile;

$$dw_i(t)/dt = -S_iw_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ i>1}}^{i-1} b_{i,j}S_jw_j(t), \quad n \geq i \geq 1 \quad (22)$$

Bu eşitlik, tam karışmış kesikli öğütme işlemi için boyut-kütle dengesi ifadesidir (Austin ve Ark., 1984). Bu ifade de $i=1$ olduğunda, yani daha üst boyuttan kırılarak malzeme gelmiyorsa doğal olarak Eşitlik 3 elde edilecektir.



Şekil 8. Tam karışmış kesikli öğütmede boyut-kütle dengesi işlevinin şematik gösterimi

1.2.1.5. Minerallerin öğütülmesinde fiziko-kimyasal ortamın etkileri

Öğütme işleminde katıların boyutunun küçültülmesi, onların farklı gerilmelere maruz kalması ile sağlanır. Kırılma tane içerisinde ilerleyebilir (intragranular kırılma) ya da tane sınırları boyunca olabilir (intergranular kırılma). Intragranular kırılma boyut küçültme işlemi için yeterliyken, tane serbestleşmesi için intergranular kırılma gereklidir. Genel olarak, kırılma işlemi yeni yüzeylerin oluşumu için kimyasal bağların kopmasını gerektirir. Kimyasal bağların kırılmasına yardım eden ve kopan yüzeylerin yeniden birleşmesini geciktiren herhangi bir olayın öğütme işlemine yardımcı olması beklenebilir (Somasundaran ve Lin, 1972).

Geçmişte, öğütme işleminin çoğunlukla sadece mekanik koşullarla kontrol edilen fiziksel bir işlem olduğu düşünülürdü. Araştırmacılar, öğütme verimliliği üzerinde öğütme ortamının fiziko-kimyasal parametrelerinin etkilerini yeterince dikkate almamışlardır. Ancak, Rehbinder (1931) malzemelerin mekanik olarak kırılmasının artırılmasında kimyasal maddelerin etkisini açıkladığında bu konuya yönelinmiştir.

Mukavemet özelliklerine ilaveten, malzemelerin kırılabilirliğinin onları çevreleyen ortama da bağlı olduğu bilinmektedir. Rehbinder (1931) mukavemet azaltıcı maddeleri iki grupta toplamıştır: Birinci grupta inorganik tuzlar (NaCl , NaOH , Na_2CO_3 , MgCl_2 , CaCl_2 ve AlCl_3) ve ikinci grupta ise polar moleküllü organik kimyasal maddeler yer almaktadır. Birinci gruptaki maddelerin etkisinin maksimum bir noktaya kadar, ilave miktarıyla arttığı bulunmuştur. Örneğin, %0.01-0.05 AlCl_3 konsantrasyonunun kuvarslı kayalar üzerinde maksimum etki sağladığı Rehbinder (1931) tarafından bildirilmiştir. Diğer taraftan, organik kimyasal maddelerin etkisinin büyük ölçüde moleküler ağırlığına bağlı olduğu bulunmuştur. Örneğin, benzer organik asitler değerlendirildiğinde artan moleküler ağırlıkla malzemelerin mukavemetinin azaldığı ifade edilmiştir.

Lowrison (1979) öğütme araştırmalarında kullanılan kimyasal maddelerin etkileriyle birlikte bir listesini vermiştir (Tablo 1). Veriler, öğütmeye yardımcı kimyasal maddeler kullanılarak öğütme oranında %20'lere kadar bir artış elde edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 1. Öğütme işleminde kullanılan yardımcı maddeler (Lowrison, 1979)

Öğütmeye Yardımcı Madde	% Miktar	Öğütülen Malzeme	Yağ veya Kuru	Öğütme Oranı Faktörü*			
Su	0.06	Seramik	K	-			
	0.06	Mermer	K	1.6			
	0.04	Klinker	K	1.3			
Alkol ve fenoller	-	Kuvars	K	-			
		Kuvars		1.29			
	Izopentanol	Demir tozu		20.0			
	s-Octanol	Kuvars		1.4			
	Alkoller	Soda		20.0			
	Gliserol	Demir tozu		0.5			
	Fenol ve polifenoller	Çimento		-			
	-	Alçıtaşı	-				
Ketonlar	0.2	Klinker	K	1.37			
					Aseton		
Aminler	-	-		2.2			
		Trietolamin					
	Flotigam ((C ₁₂ -C ₁₄) amin)	0.02			Kuvars	1.7	
	0.02	Kireçtaşı					
Sülfonik asit	0.06	Grafit		-			
					Arilalkil sülfonik asit	Çimento	1.3
Yağ asitleri	0.003	Kireçtaşı		1.1			
					Oleik asit		
	-	Çinko		-			
	Butirik asit	Kuvars		1.27			
	Stearik asit	Pomza		-			
	-	Kireçtaşı		-			
	Sodyum-oleat	Kuvars		2.0			
	0.1	Kireçtaşı		2.0			
	Kalsiyum stearat	0.05-0.10		Kireçtaşı	-		
	Sodyum stearat	-		Dolomit	-		
	0.15	Klinker		1.2			
	Alüminyum stearat	-		Çimento	-		
	Kaprilik asit	0.5		Krom-manyezit	K	1.2	
	Marin yağı	0.5		Krom-manyezit	K	1.1	
Diğer karboksilik asitler	0.1	Klinker	K	1.33			
					Naptenik asit		
					Sodyum naptanet	Y	1.40
					Sodyum sulfonaptanet	Y	1.80

Öğütmeye Yardımcı Madde	% Miktar	Öğütülen Malzeme	Yaş veya Kuru	Öğütme Oranı Faktörü*
Hidrokarbonlar n-alkanes	-	Soda	K	10.0
Esterler Amilasetat	-	Kuvars		1.23
Diğerleri				
Sodyum silikat	1.16	Kil		-
Sodyum hidroksit	-	Manezit		-
	0.008	Kireçtaşı		1.5
Sodyum karbonat	0.02	Kireçtaşı		2.0
Sodyum klorit	0.08	Kuvars		1.2
Karbon dioksit	-	Manezit		-
	-	Dolomit		-
	0.03	Kuvars	Y	1.55
Alüminyum klorit	-	Grafit		-
	-	Talk		-
Amonyum karbonat	-	Mika		-
	-	Vermikulit		-
Sert ağaç zifti	-	Pomza		-
Kalgon	0.01-0.04	Kurşun-çinko		1.3
Kaolin	10.0	Kükürt	D	-
Thalium klorit	0.02	Kuvars	Y	1.65

* Öğütme oranı faktörü = $\frac{\text{Öğütmeye yardımcı ilavesi ile elde edilen yeni yüzeyler}}{\text{Öğütmeye yardımcı ilavesi olmadan elde edilen yeni yüzeyler}}$

1.2.1.5.1. Su ve organik sıvılarda öğütme

Yaş öğütmenin kuru öğütmeden daha etkili olduğu bilinmektedir. Bond (1960) benzer koşullar altında yapılan endüstriyel boyuttaki yaş öğütmenin kuru öğütmeye göre 1.3 kat daha fazla kapasite sağladığını ifade etmiştir. Austin ve Ark. (1984) ise bir akışkanda (çoğunlukla su) öğütmenin yapılması ile aynı ekipmanla yapılan kuru öğütmeye göre genellikle 1.1-2.0 kat daha hızlı olduğunu bildirmişlerdir. Nihayetinde, yaş öğütme işlemi, pülpün katı-su oranının (pülp yoğunluğu) viskoz olmayacak kadar koyu olması koşuluyla kuru öğütmeye göre daha yüksek değirmen kapasiteleri vermektedir. Ayrıca, çoğu malzemeler yaş öğütme işlemi ile kuru öğütmeye oranla daha ince boyutlara öğütülebilirler.

Su, ince tanelerin aglomerasyonunu ve bilyaların kaplanmasını önleyerek yavaşlama etkisini önlemekle beraber, başlıca faydası bilyaların mekanik etkisinin tanelere daha iyi nakledilmesini sağlamasıdır ve böylece daha yüksek kırılma hızları elde edilir (Austin ve Ark., 1984). Ayrıca, kırılma hızlarının artmasına,

suda iri katıların çökmesine bağlı olarak değirmende öğütme işlevinin başlıca üst boyuta uygulanması da gösterilmektedir. Değirmendeki ince malzeme miktarı arttıkça, pülöp daha viskoz olur ve kırılma birinci dereceden olur (Klimpel, 1982a; Klimpel ve Austin, 1982). Ancak, pülöpte giderek artan yüksek viskozite kırılma hızlarının yavaşlamasına neden olur (Tangsathikulchai ve Austin, 1985).

Organik sıvılarda yapılan öğütme işleminin suya göre daha etkili olduğunu bildiren çeşitli araştırmalar vardır. Örneğin, Kiesskalt (1949) isoamil alkol gibi organik sıvılarda öğütme işlemi sonucu malzemenin yüzey alanında suya göre 12 katlık bir artış elde etmiştir. Engelhardt (1942, 1946) kuvarsın öğütülmesinde alkolün etkisini araştırmış ve aynı yüzey alanını üretmek için suda gerekenden daha az enerji gerektiğini ifade etmiştir. Ziegler (1956) çimento öğütülen değirmenlerin kapasitesinde %40'lara varan bir artışın etilen glikol, propilen glikol, butilen glikol ve trietanol amin gibi organik sıvıların kullanımıyla sağlanabileceğini bildirmiş ve bundan sonra endüstriyel olarak çimento öğütülmesinde organik sıvıların kullanımı başlamıştır. Öğütme verimliliği artışına, organik sıvıların buharlarının taneler arasındaki adhezyon kuvvetlerini azaltarak aglomerasyonu azaltması ve değirmendeki malzeme akışını artırmaları ile neden oldukları öne sürülmektedir (Locher ve Seebach, 1972).

Lin ve Metzger (1968) farklı ortamlarda kuvarı öğütmüşlerdir. Karbon tetraklorit ve metil cycloheksan içinde yapılan öğütme ile nitrojene göre öğütme oranında %25 kadar bir artış sağlamışlardır. Ancak, su da öğütmenin çalıştıkları diğer ortamlardan daha etkili olduğunu bildirmişlerdir. İlginç olarak, organik sıvılara su ilave edildiğinde, öğütme verimliliğinin sadece su kullanılan durumdaki değerini geri kazandığını bildirmişlerdir.

Savage ve Ark. (1974) tarafından ise bazı organik sıvılar, silikon karpitin laboratuvar tipi bir titreşimli değirmende öğütülmesinde kullanılmıştır. Benzen kullanılarak, öğütme oranında suya göre %100'lük bir artış elde ettiklerini, etil alkolün ise daha az etkili olduğunu bildirmişlerdir.

1.2.1.5.2. Öğütmeye ilave edilen inorganik elektrolitlerin etkileri

Minerallerin öğütülmesi üzerine inorganik elektrolitlerin etkisi, çeşitli araştırmalar ile bildirilmiştir (Szantho, 1949; Kukolev ve Melnishenko, 1948). Her ne kadar literatürde bildirilen sonuçlar birbiriyle çelişse de, inorganik elektrolitlerin varlığında öğütmenin daha etkili olduğu bulunmuştur (El-Shall ve Somasundaran, 1984).

Kukolev ve Melnishenko (1948) tarafından magnezit ve dolomitin bilyalı değirmende öğütülmesinde kostik soda ve sabunların etkisi araştırılmıştır. Kostik sodanın magnezitin öğütülmesinde faydalı, ancak dolomitin öğütülmesinde etkisinin olmadığını bulmuşlardır. Diğer taraftan, sabunların dolomitin öğütülmesine yardımcı olduğu, ancak magnezit üzerinde etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Yazarlar iki mineral üzerinde gözlenen bu etkileri, sodyum hidroksitin adsorpsiyonundaki farka bağlamışlardır. Ancak, Somasundaran ve Lin (1972) her iki mineral üzerinde sodyum hidroksitin aynı adsorpsiyon kapasitesine sahip olamayacağı için bunun bir neden olamayacağını belirtmişler ve bu ifadelerini kimyasal olarak dolomite benzer bir mineral olan kireçtaşının öğütülmesinde adı geçen kimyasal maddelerin yararlı etkilerini bildiren çalışmaları (Frangiskos ve Smith, 1957; Ghosh ve Ark., 1960) göstererek desteklemişlerdir

Frangiskos ve Smith (1957) kireçtaşı üzerinde sodyum hidroksit ve sodyum karbonatın etkisini araştırmışlar ve bu kimyasal maddelerin varlığında öğütme verimliliğinin arttığını bulmuşlardır. Ghosh ve Ark. (1960) ise bu deneyleri tekrarlamışlar ve %0.02 kimyasal madde konsantrasyonunda yararlı etkilerin olduğunu, ancak konsantrasyonun %0.04'e artırılmasıyla yararlı etkilerin azaldığını bildirmişlerdir.

Mallikarjunan ve Ark. (1965) tarafından, pH 4-8 aralığında azalan pH ile kalsitin yüzey alanında artış olduğu ve aynı pH aralığında kuvarsın yüzey alanında ise azalma olduğu bildirilmiştir. Bu sonuç, kuvars ve kalsitin sıfır şarj noktasından (yaklaşık olarak sırasıyla 2.0 ve 10.5) uzaklaşmakla tanelerin daha iyi dispersiyonunun sağlanması yüzünden ileri geldiğini belirtmişlerdir.

Savage ve Ark. (1974), öğütme akışkanı olarak su ve etil alkol kullanarak silikon karpitin öğütülmesinde sodyum klorit ve çeşitli multivalent iyonların tuzlarının etkisini araştırmışlar ve tuzları iki sınıfa ayırmışlardır: flokülantlar ($MgCl_2$, $CaCl_2$, $FeCl_2$ ve $FeCl_3$) ve dispersantlar ($NaCl$ ve $Na_4P_2O_7$). Hem su ve hem de etil alkolde dispersantların öğütme oranını önemli ölçüde artırdığını bulmuşlardır.

Frangiskos ve Smith (1957), kuvarsın öğütülmesinde 2 mol/L konsantrasyonunda $AlCl_3$ ve $CuSO_4$ ilavesiyle yüzey alanında sırasıyla %50 ve %15 kadar bir artış elde etmişlerdir.

Hartley ve Ark. (1978) takonit cevherinin bilyalı değirmende yaş öğütülmesi üzerine sodyum hidroksitinin etkisini araştırmışlardır. Değirmen beslemesi dar bir boyut aralığında yapıldığında yüzey alanında artış elde etmişlerdir, ancak besleme tüm boyut dağılımına sahip şekilde yapıldığında bir etki elde edememişlerdir. Bunu, beslemedeki ince tane varlığından kaynaklanan viskozitedeki değişimin bir sonucu olabileceğine bağlamışlardır.

Bhima ve Ark. (1991), kuvars içeren manyetit cevherinin öğütülmesinde kalsiyum oksit, kalsiyum klorit ve sodyum heksameta fosfatın etkisini araştırmışlar ve en uygun öğütmeye yardımcı kimyasal maddenin kalsiyum oksit olup, pülp katı oranı %75'te 200 gr/ton kullanım miktarında en iyi sonuçları verdiğini bildirmişlerdir.

Pollmanns ve Ark. (1993) kalsit ve çinkooksidin öğütülmesinde sodyum klorürün etkisini incelemişler ve çinkooksidin öğütülmesinde yüzey alanında dikkate değer ölçüde artış olduğunu, ancak kalsitte ise nispeten etkisiz olduğunu bildirmişlerdir.

Akdoğan ve Johns (1998) ise kuvarsın yaş öğütülmesinde ferrik nitratın pH 6.5'te ve 5×10^{-5} M konsantrasyonda -68 μm boyutuna geçen malzeme miktarını azalttığını, ancak pH 5'te ve 5×10^{-3} M konsantrasyonda ise artırdığını bildirmişlerdir.

1.2.1.5.3. Öğütmeye ilave edilen yüzey aktif maddelerin etkileri

Yüzey aktif maddelerin değirmene ilavesi ile öğütme verimliliğinin etkilendiği çeşitli araştırmalar tarafından geçmişte bildirilmiştir. Örneğin, Szantho (1949) tarafından, Flotigam P ((C₁₂-C₁₄) amin) ile kuvars ve kireçtaşının öğütülmesinde %0.005-0.02 konsantrasyonda yüzey alanında sırasıyla %100 ve %75'e varan artışlar sağlanabildiği ifade etmiştir (Tablo 2). Ancak, %0.02 kimyasal madde konsantrasyonunun üzerinde elde edilen yüzey alanındaki artış azalmaktadır. Benzer sonuçlar, oleik asit ile kalsit üzerinde de elde edilmiş olup, %0.003 oleik asit konsantrasyonunun üzerinde olumsuz etkiler belirlenmiştir. Diğer taraftan, sodyum-oleat ise kullanılan tüm konsantrasyonlarda kireçtaşının öğütme oranını azaltmıştır.

Tablo 2. Kuvars ve kalsitin öğütülmesinde yüzey aktif maddelerin etkileri (Gilbert ve Hughes, 1962)

Malzeme	Öğütmeye Yardımcı Madde	İlave Miktarı, %	Yüzey Alanındaki Artış, %
Kuvars	Flotigam P	0	0
		0.005	+103.2
		0.01	+114.7
		0.03	+123.4
		0.05	+71.4
		0.1	+65.8
		1.0	+58.3
Kireçtaşı	Oleik asit	0	0
		0.008	0
		0.0017	+7.3
		0.003	+10.6
		0.006	-17.2
		0.06	-61.3
		1.33	-99.9
Kireçtaşı	Sodyum-oleat	0	0
		0.04	-35.7
		0.08	-1.8
		0.5	-84.5
		1.0	-92.4
Kireçtaşı	Flotigam P	0	0
		0.005	+29.2
		0.01	+56.4
		0.02	+74.6
		0.05	+9.6

Benzer bir çalışma da Gilbert ve Hughes (1962) tarafından kuvarsın bilyalı değirmende öğütülmesi üzerinde Armac T'nin (doymuş ve doymamış amin asetat karışımı) etkisi araştırılmıştır. pH 2-5 aralığında -75 µm'ye geçen malzeme miktarının %0.01'lik konsantrasyonda %4-12 oranında azaldığını bulmuşlardır. Kimyasal madde konsantrasyonunun %0.01'den %0.1'e artırılması tüm pH değerlerinde öğütme verimini azaltmıştır. Örneğin, pH 5'te %0.1'lik konsantrasyonda yapılan ilave -75 µm'ye geçen malzeme miktarını su ile karşılaştırıldığında %36 kadar azaltmıştır. Somasundaran ve Lin (1972) bu durumu, kuvars yüzeyi üzerinde (pH 2'nin üzerinde yüzey negatif) Armac T'nin (katyonik yüzey aktif madde) fiziksel adsorpsiyonu sonucu taneler üzerindeki şarjı azalttığı ve bu nedenle tanelerin flokülasyonunu artırdığı sonucu ile izah etmişlerdir.

Ryncarz ve Laskowski (1977) tarafından kuvarsın porselen bilyalı değirmende öğütülmesinde dodesil amonyum kloritinin etkisi araştırılmıştır. Kimyasal maddenin etkisinin ortamın pH ve ilave konsantrasyonuna bağlı olduğu ve öğütülebilirliğin kuvarsın sıfır zeta potansiyel koşulları altında minimum olduğunu bulmuşlardır.

El-Shall ve Ark. (1979a), paslanmaz çelik bir bilyalı değirmen ile kuvarsın öğütülmesinde dodesil amonyum klorit ilavesi ile nötr ve alkali pH aralığında daha ince ürünlerin elde edildiğini bulmuşlardır. Asidik koşullarda ise zararlı etkiler elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada ise, hematitin yaş öğütülmesinde oleik asit ilavesi ile daha ince ürün elde edilebildiği ifade edilmiştir (El-Shall ve Ark., 1979b).

Laapas ve Ark. (1984) laboratuvar tipi titreşimli ve aşındırıcı değirmenlerde kuvars, kalsit ve talkın öğütmeye yardımcı maddeler ile kuru ve yaş öğütülmesini araştırmışlardır. Kuvars için sodyum-oleat, kalsit için trietanolamin ve talk için ise polikarboksilat kullanmışlardır. Öğütmeye yardımcı maddeler ile malzemelerin dispersiyon halinin kontrol edilmesi ile başarılı sonuçlar elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Öner ve Ark. (1985 ve 1986) çimento klinkerinin öğütülmesinde ε-caprolaktam, trietanolamin, dietilenglikol, akrilamid ve stearamid gibi kimyasal

maddelerin etkisini araştırmışlardır. ϵ -caprolaktamın, klinkerin öğütülmesinde uzun süredir kullanılan trietanolamin ve dietilenglikol kadar olumlu etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Atlı ve Somasundaran (1986) inorganik ve yüzey aktif maddelerin kuvarsın öğütülmesine olan etkilerini incelemişler ve meydana gelen etkilerin pH, katı oranı ve kimyasal madde konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiğini açıklamışlardır. Yüzey aktif maddelerin bazı oranlarında pülp viskozitesinin önemli ölçüde arttığını ve öğütmenin de bundan olumsuz yönde etkilendiğini ifade etmişlerdir.

Sohoni ve Ark. (1991) ise trietanolamin, mono ve dietilenglikol, oleik asit, sodyum-oleat ve dodesilbenzen sülfonik asitin çimento klinkeri, kireçtaşı ve kuvars üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kuvars üzerindeki etkilerin marjinal olduğunu, trietanolamin, mono ve dietilenglikol, oleik asitin kireçtaşının öğütülmesinde ürün inceliğini artırdığını bildirmişlerdir. Trietanolamin, mono ve dietilenglikol ve dodesilbenzen sülfonik asitin ise jips içeren çimento klinkerinin öğütülmesinde faydalı olduğunu, ancak trietanolaminin daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Öğütmeye yardımcı maddelerin aglomerasyonu ve malzeme tarafından bilyaların kaplanmasını önlediğinde çimento klinkeri üzerinde daha etkili olduğunu, kireçtaşı üzerinde bu etkinin daha az olduğunu ifade etmişler, ancak kuvars üzerinde etkisiz olduğunu açıklayamamışlardır.

Akdoğan ve Johns (1998) kuvarsın yaş öğütülmesinde potasyum amil ksantatın etkisini araştırmışlar ve pH 8'de -68 μ m boyutuna geçen malzeme miktarının arttığını bildirmişlerdir.

Pülp viskozitesinin kontrolü amacıyla çeşitli organik, inorganik ve polimerik dispersantlar öğütme verimi artırmak için kullanılmıştır. Viskozitenin kontrolü ile yüksek pülp yoğunluklarında oluşan pülpün kayma gerilmesi (*yield value*) değerinin en aza indirilmesi veya yok edilmesi amaçlanmaktadır. Böylelikle, pülpün psodoplastik akış rejiminde kalması sağlanır. Pülpde yüksek katı oranı korunurken pülp reolojisinin kontrolü amacıyla öğütmeye yardımcı kimyasal maddeler olarak sodyum silikat, tripolifosfatlar gibi inorganik

dispersantlar ve lignon sülfonatlar gibi organik dispersantlar kullanılmıştır. Ancak, geliştirilen polimerik dispersantların diğer kimyasal maddelerle karşılaştırıldıklarında daha etkili ve ekonomik oldukları bildirilmiştir (Klimpel, 1982a; 1982b; 1983; 1997a; Wang ve Forssberg, 1997; Zheng ve Ark., 1997).

1.2.1.6. Kimyasal maddelerin öğütmeye etki mekanizmaları

Öğütmeye yardımcı kimyasal maddeler ile bir çok araştırma yapılmasına rağmen, tam olarak etki mekanizmaları açıklanamamıştır (El-Shall ve Somasundaran, 1984; Tucker, 1984; Fuerstenau ve Ark., 1985)

Kimyasal maddelerin malzemelerin ufalanması üzerindeki etkileri çeşitli mekanizmalarla izah edilmeye çalışılmıştır: Bunlardan ilki “Rehbinder etkisi” olarak bilinir (Rehbinder, 1931). Bu mekanizma, yüzey aktif maddelerin adsorpsiyonu sonucu katıların yüzey serbest enerjisinin azalması esasına dayanır. Ufalama işlemlerinde malzemelerin kırılması demek yeni yüzeylerin oluşturulması demektir, bunun için gerekli enerji miktarı oluşturulan yüzeylerin yüzey serbest enerjisiyle orantılıdır. Yüzey serbest enerjisi nasıl olursa olsun azaldığı takdirde, aynı yüzey alanını oluşturmak için gerekli enerji miktarının da daha az olacağı beklenilebilir. Bu kaide üzerine, öğütme sırasında yüzey aktif maddelerin adsorpsiyonunun öğütme etkinliğini artıracığı umut edilir. Ancak, yeni yüzey oluşturmak için harcanan enerji ufalama sistemlerine verilen enerjinin yaklaşık %1’ine tekabül eder, geri kalan %99 ise iletim kayıpları, sürtünme, ısı, ses vb. şekilde harcanır. Buna ilaveten, kimyasal maddelerin plastik deformasyon, çatlak başlangıcı ve/veya yayılması, flokülasyon ve dispersiyon vb. gibi sistemin diğer önemli parametreleri ve özellikleri üzerindeki etkisi bu mekanizmada ihmal edilmektedir (Ryncarz ve Laskowski, 1977; El-Shall ve Somasundaran, 1984).

Aslında, çatlakların mevcudiyeti veya başlangıcı kırılmanın oluşması için önceden gerekli olan bir faktördür. Buna ilaveten, çatlak uzunluğu, çatlak uç yarıçapı (*crack tip radius*), çatlak ucunda plastik akış, çatlakların yayılması vs. gibi parametreler malzemelerin mukavemetini belirleyecektir. Bu parametreler

üzerine kimyasal maddelerin etkileri, yüzey serbest enerjisine olan etkilerine ilaveten ayrıca dikkate alınmalıdır.

Westwood ve Ark. (1967) tarafından açıklanan ikinci mekanizmada ise katı yüzeylerine adsorplanan yüzey aktif madde moleküllerinin, yüzeye yakın dislokasyonları bir tür çivileyerek (*pinning*), bunların hareketini zorlaştırdığı öne sürülmektedir. Dislokasyonların hareket kolaylığı, plastik özelliğin fazlalığı anlamına gelir. Bu hareket azaldığında katılar daha elastik, yani daha kırılğan bir özelliğe sahip olurlar. Ancak, bu mekanizma öğütme ortamının etkisini açıklamak için tek başına kullanılamaz, çünkü pulp akışkanlığı, flokülasyon ve dispersiyon vs. gibi önemli özellikler gözönüne alınmamıştır (El-Shall ve Somasundaran, 1984).

Kimyasal adsorpsiyon ya da çatlak yüzeyleri ve kimyasal madde molekülleri arasında faal hale gelen komplekslerin teşekkülü, bazı araştırmacılar tarafından dikkate alınmış ve kırılma işleminde önemli oldukları belirtilmiştir (Somasundaran ve Lin, 1972).

Tarjan (1981) tarafından yapılan diğer bir açıklama, yine öğütmeye yardımcı maddelerin adsorpsiyonuyla yüzey serbest enerjisinin azalmasıyla ilgilidir. Taneler kırıldığında yeni yüzeyler oluşur. Üretilen yeni yüzeyler şekilsiz yapıları ve aralarında güçlü bağ kuvvetleri gösteren ince kristal yapıları sebebiyle çok aktiftirler. Öğütmeye yardımcı maddelerin ilavesi tanelerin yüzey serbest enerjisini azaltarak, bu bağ kuvvetlerini nötralize eder ve tanelerin kırılması için gereken enerji miktarını azaltır.

Düşünülen bir diğer mekanizma ise dispersiyonda kimyasal maddelerin rolü, yani ufalama sırasında değirmende tanelerin akışı esasına dayanır. Locher ve Seebach (1972) yüzey aktif maddelerin malzemenin öğütme ortamındaki akışkanlığını artırdığı ve öğütmeyi bu yolla da etkilediğini ileri sürmüşlerdir. Klimpel (1982a; 1982b), Klimpel ve Austin (1982) de bu tezi destekleyen sonuçlar yayınlamışlardır. Bu araştırmacılara göre, yüzey aktif madde molekülleri öğütülen malzeme, öğütme elemanları ve astar yüzeylerine adsorplanmakta ve bu birimler arasındaki dinamik sürtünmeyi azaltmaktadır. Böylece, öğütme ortamının

(bilya-malzeme) değirmende akışı ve tanelerin bilyalar tarafından yakalanıp öğütülmesi kolaylaşmaktadır.

Sonuç olarak, öğütme aynı anda olan birkaç alt-işlemin birleşimi olan bir bütündür ve kimyasal maddeler yukarıda belirtilen bir ya da tüm mekanizmalardan dolayı bu alt-işlemleri etkileyebilirler. Her bir mekanizmanın rolünün teşhisi, kırılma sırasında katı ile onunla temastaki çözeltinin özelliklerinin aynı anda tespit edilmesiyle mümkündür. Deneysel olarak bulunabilir özellikler yani zeta potansiyeli, yüzey gerilimi, pH, iyonik kuvvet, sıcaklık, çözeltinin kimyasal yapısı, sistemin köpürme ve flokülasyon özellikleri bunlara dahildir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında, kimyasal maddelerin öğütmeyi çeşitli nedenlerden dolayı etkiledikleri açıktır. Bunlar özetlenecek olursa;

1. Değirmendeki pülp akışını değiştirmeleri,
2. Yeni üretilen ince tanelerin yeniden aglomerasyonu üzerindeki etkileri,
3. Öğütme sırasında pülpün köpürme özelliklerini değiştirmeleri,
4. Mineral taneleri, bilyalar ve değirmen astarı arasında ve tanelerin kendi aralarındaki etkileşimleri üzerine olan etkileri (sürtünme özelliklerindeki değişikliklerden ileri gelen)
5. Çatlak başlangıcı (yüzey dislokasyonlarına adsorplanan kimyasal maddelerin etkileşimleri ile) ve çatlak genişleme enerjisi (yüzey enerjisinde veya çatlak ucundaki plastik deformasyon için gerekli enerjideki bir azalma ile) üzerindeki etkileri ve yeni oluşan çatlakların kimyasal maddeler tarafından doldurulması veya yeniden birleşmesinin geciktirilmesi sonucu malzemelerin mukavemeti üzerindeki etkileri.

Öğütme işlemi üzerinde ortamın etkilerini yöneten mekanizmaların açıklanması, yukarıda verilen faktörlerin hepsinin ve kendi aralarındaki etkileşimlerin belirlenmesi esasına dayanır (El-Shall ve Ark, 1979a; El-Shall ve Somasundaran, 1984).

1.2.2. Minerallerin İslanma Özellikleri ve Kritik İslanma Yüzey Gerilimleri

Katıların veya mineral tanelerinin ıslanabilmesi, flotasyon, aglomerasyon ve katı-sıvı ayırımı gibi pek çok teknolojik işlemi etkileyen önemli parametrelerden biridir (Fuerstenau ve Ark., 1991). Katıların ıslanabilirliği/hidrofilikliğı ve yüzebilirliğı/hidrofobluğı katı-sıvı ve katı-hava arayüzeyleri, kimyasal bağlar, bulk özellikleri, katıların kristal yapısı ve katıların su ile reaksiyona girebilmesi gibi özellikler bakımından incelenmiştir. Hidrofobluk her ne kadar katı-sıvı-hava sistemindeki ilişkiden kaynaklansa da, hidrofobluğı ve yüzebilirliğı basit eşitliklerle ve kurullarla ifade etmek için çok uzun zamandan beri çalışmalar yapılmaktadır (Gaudin ve Ark., 1957; Drzymala, 1994).

1.2.2.1. Ara yüzey enerjileri ve temas açısı

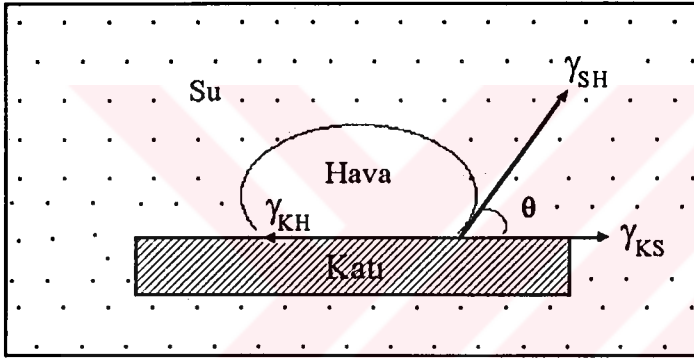
Cevher hazırlamada temas açısından, teori ve uygulamada yaygın olarak kullanılıp yararlanılmaktadır. Temas açısının termodinamik olarak kökeni ve yüzey enerjileri ile bağlantısı ilk defa Young (1805) tarafından açıklanmıştır. Sonrasında, Gibbs (1878) tarafından ıslanma işleminin termodinamiğı açık olarak izah edilmiştir. Statik ve dinamik temas açısı üzerine son 20 yılı aşkın sürede çok sayıda araştırma yapılmış olup, arayüzey enerjilerinin modern teorileri, ıslanabilirliğıın ışığı altında açıklanmıştır. Temas açısı flotasyon işleminde mineral kazanımından sorumlu tek bir kriter değildir, ancak oldukça önemli faktörlerden birisidir (Ralston ve Newcombe, 1992).

Bir kabarcık veya damlacık küresel bir şekle bürünmekle yerçekimi altındaki serbest enerjisini en aza indirir. Kabarcık veya damlacık bir katı ya da sıvı alt tabakasıyla temas halindedir ve Gibbs tarafından belirtildiğı gibi serbest enerjisini en aza indirmek isteyecektir.

Katı yüzeyinde bir damla, ince bir sıvı filmi halinde yayılabilir veya bir damlacık olarak kalabilir. İlk durum tam ıslanma olarak adlandırılırken, ikinci durum ise kısmi ıslanma olarak tanımlanır. Benzer davranış bir kabarcıkla temas halindeki bir alt tabaka içinde geçerlidir.

Sıvı ve altındaki katı madde arasında bazı etkileşimler mevcuttur. Bunlar sadece Van der Waals kuvvetleri olmayıp, adsorpsiyon veya yüzey gruplarının iyonizasyonu gibi etkenler de söz konusudur (Ralston ve Newcombe, 1992).

Flotasyon sisteminde üç faz mevcuttur: Katı, sıvı ve hava fazı. Bu üç fazın dengede olması hali “Young eşitliği” ile açıklanır. Bu üç fazın dengede olması halinde arayüzey gerilimlerinin cebirsel toplamı sıfırdır (Eşitlik 23). Şekil 9’da görüldüğü gibi katı yüzeyi ile sıvı-hava arayüzeyi arasındaki açıya temas açısı (θ) adı verilir.



Şekil 9. Sulu ortamda katı ve kabarcık arasındaki temas açısı

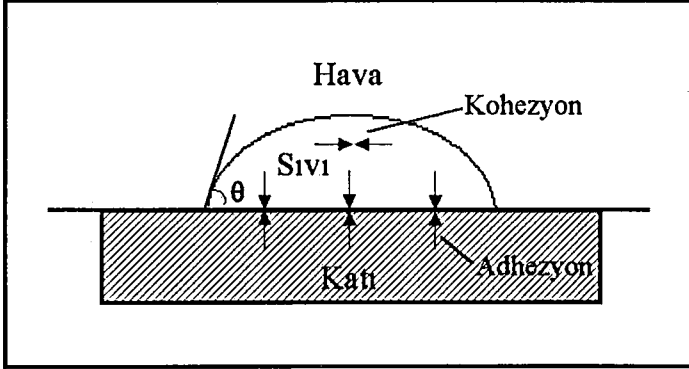
$$\gamma_{SH} + \gamma_{KH} + \gamma_{KS} = 0 \quad (23)$$

Burada; γ_{SH} = Sıvı-hava arayüzey gerilimi, γ_{KH} = Katı-hava arayüzey gerilimi ve γ_{KS} = Katı-sıvı arayüzey gerilimidir.

$$\cos \theta = (\gamma_{KH} - \gamma_{KS}) / \gamma_{SH} \quad (24)$$

Temas açısı büyüdükçe, katı ile hava kabarcığı arasındaki adhezyon kuvveti büyümekte ve katının yüzebilirliliği artmaktadır (Wills, 1985).

Şekil 10'da verilen sistem için;



Şekil 10. Üçlü faz sistemi (katı-sıvı-hava) için kohezyon ve adhezyon işleri (Laskowski, 1986)

$$\text{Kohezyon işi; } W_{\text{kohezyon}} = 2\gamma_{SH} \quad (25)$$

$$\text{Adhezyon işi; } W_{\text{adhezyon}} = \gamma_{KH} + \gamma_{SH} - \gamma_{KS} \quad (26)$$

ve temas açısıyla ilişkilendirilirse;

$$W_{\text{Adhezyon}} = \gamma_{SH} (1 + \cos \theta) \text{ olur.} \quad (27)$$

Katı yüzeyinde sıvı için yayılma katsayısı (S);

$$S = W_A - W_K > 0 \text{ ise sıvı katı yüzeyinde yayılır.} \quad (28)$$

Bu durumda, $\theta = 0^\circ$ olacaktır. Yüzebilirlik koşulu ise $W_A < W_K$, $\theta \neq 0^\circ$ 'dir.

Katı-hava teması için termodinamik koşul olarak serbest enerji değişimi;

$$\Delta G = G_2 - G_1 < 0 \text{ (P, T ve n sabit) olmalıdır.} \quad (29)$$

Burada; G_1 katı ile havanın yapışmasından önceki Gibbs serbest enerji değişimi, G_2 yapışmadan sonraki Gibbs serbest enerji değişimi, P basınç, T sıcaklık ve n ise mol sayısıdır.

Young eşitliğinin uygulanmasıyla flotasyonun gerçekleşebilmesi için;

$$\Delta G = \gamma_{SH} (\cos \theta - 1) \quad (30)$$

Burada, $\theta = 0^\circ$ için $\Delta G = 0$ ve $\theta > 0^\circ$ için $\Delta G < 0$ olduğu açıktır ve $\Delta G < 0$ olması flotasyonun gerçekleşmesi için termodinamik kriterdir.

Statik temas açıları, sıvının ön tarafına ilerleyen “ileri giden temas açısı (*advancing*) (θ_i)” ve sıvının geri tarafına ilerleyen temas açısı “geriye giden temas açısı (*receding*) (θ_g)” olmak üzere iki şekilde belirlenir. Genel olarak $\theta_i \geq \theta_g$ olup, bu durum hata (*hysteresis*) olarak ifade edilir. Pratikte katı yüzeyleri her zaman pürüzlü ve heterojen bir yapı gösterir. Kimyasal yüzey heterojenitesi, çeşitli kimyasal kısımlardan kaynaklanan karmaşık bir temas açısını meydana getirirken, pürüzlülük ya ıslanmayı azaltır ya da artırır. Hata, yani ileriye giden ve geriye giden temas açıları arasındaki farklılık heterojenite ve pürüzlülüğün bir yansıması sonucudur. Sıvı ıslanmayan katı yüzeyler üzerine ilerlediğinde hata gözlenir. Heterojenite genellikle pürüzlülüğten daha yüksek bir hataya neden olur. Hata statik durumlardaki farklılıkları ifade etmede kullanılır (Andrade ve Ark., 1985; Ralston ve Newcombe, 1992). Bir sıvı damlacığı için ölçülebilen temas açısı (θ) Eşitlik 24’de verilmiştir. Venzel (1936) bu ifadeyi pürüzlülüğü dikkate alarak aşağıdaki eşitlik ile ifade etmiştir.

$$\cos \theta_r = r(\gamma_{KH} - \gamma_{KS}) / \gamma_{SH} \quad (31)$$

$$r = (\text{gerçek yüzey alanı}) / (\text{geometrik yüzey alanı}) \quad (32)$$

θ_r pürüzlü bir yüzey üzerinde oluşan temas açısıdır. r 'nin artması pürüzlülüğünün artması demektir. Düz yüzeyler üzerinde ölçülen 90° 'nin altındaki bir temas açısı, pürüzlülük arttıkça azalmaktadır. Bu açının üzerindeki temas açılarında ise pürüzlülük arttıkça temas açısı da artmaktadır. 90° 'de ise pürüzlülükle temas açısı değişmemektedir (Adamson, 1990). Ayrıca, Yarar ve Aksu (1997) tarafından yapılan çalışmada ise pürüzlülüğün ıslanmayı artırdığı belirtilmiştir. Yani, pürüzlülük mineralin kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerini artırarak, hidrofobluğunu azaltacaktır.

1.2.2.2. Hidrofobik ve hidrofilik katılar

Bir kaç istisna dışında, inorganik katıların yüzeyleri suda tamamen ıslanır. ıslanmayı meydana getiren sebep, katı yüzeyindeki iyonların su içindeki hidrate iyonlarla bağlantı kurmalarıdır. Bu hidrate iyonlar, suyu teşkil eden hidrojen ve hidroksil iyonu olabildiği gibi su içinde bulunan diğer elektrolitler de olabilir.

Laskowski (1986), polar ya da iyonik grupları taşımamaları halinde, tüm katıların hidrofobik olacaklarını belirtmiştir.

Gaudin ve Ark. (1957) doğal yüzeyliliğe etki eden faktörleri katıların kristal yapıları bakımından incelemiştir. Katıların yüzeyliliği yüzeylerinde hidrokarbon taşıyan iyonlar ve moleküller tarafından artırılmaktadır. Ancak, doğal yüzeyliliğin atomlar arasındaki bağların kırılmadan en azından bazı klivaj yüzeyleri oluşmakla meydana geldiğini vurgulamışlardır. Kristal yapısı, iyonik bağları teşkil eden katılar için yüzeyliliği menfi yönde etkilemektedir.

Katıların veya minerallerin yüzeylenme ya da ıslanma karakterleri bir çok deneysel ve ampirik tekniklerle nicel olarak tahmin edilebilir. Bunlardan biri katıların veya minerallerin kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeridir (Shafrin ve Zisman, 1960; Parekh ve Aplan, 1974; Yarar ve Kaoma, 1984). Bu değer veya daha az yüzey gerilimine sahip sıvılar, katı madde veya mineral yüzeyine tamamıyla yayılmak suretiyle ıslatırlar. Saf suyun yüzey gerilimi (~ 72 mN/m) baz

alınarak, γ_c değeri 72 mN/m'den büyük olan mineraller "hidrofilik", düşük olanlar ise "hidrofobik" veya "doğal hidrofobik" olarak tanımlanırlar.

1.2.2.3. Kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) ve belirleme teknikleri

Shafrin ve Zisman (1960) ve Zisman (1964) düşük yüzey enerjili katılarla temas halindeki saf sıvılar tarafından oluşturulan denge temas açılarını araştırarak, katıların kritik ıslanma yüzey gerilimi kavramını geliştirmişlerdir. Düz ve homojen polimerik bir katı yüzeyinde sıvı damlasının oluşturduğu temas açısının (θ) kullanılan sıvıların yüzey geriliminin azalmasıyla azaldığını bulmuşlardır. Sıvının katı yüzeyini yayılma sonucu tamamıyla ıslattığı andaki yüzey gerilimi değerini, katının "kritik ıslanma yüzey gerilimi (*critical surface tension of wetting, γ_c*)" olarak tanımlamışlardır. Adsorplanan organik filmlerle kaplanan yüksek enerjili yüzeyleri ve organik katıların ıslanabilirliğini karakterize etmede bunu genelleştirmişler ve böylelikle, katıların ıslanma özellikleriyle organik yüzeylerdeki atomlar ve organik köklerin doğal ve sıkışmasını ilişkilendirebilmişlerdir.

Zisman'ın yaklaşımı, diğer araştırmacılar tarafından polimerik olmayan katılara doğru genişletilmiştir. Karboksilik asit ve aminlerle kaplanan metaller, temiz cam ve parlatılmış metaller gibi yüksek yüzey enerjili katılar (Zisman, 1964; Olsen ve Osteras, 1964) ve çeşitli yüzey aktif maddelerle kaplanan farklı mineraller (Parekh ve Aplan, 1974, 1980) kullanmışlar ve hem de $\cos \theta$ ile γ_{SH} arasında doğrusal bir ilişki kurmuşlardır.

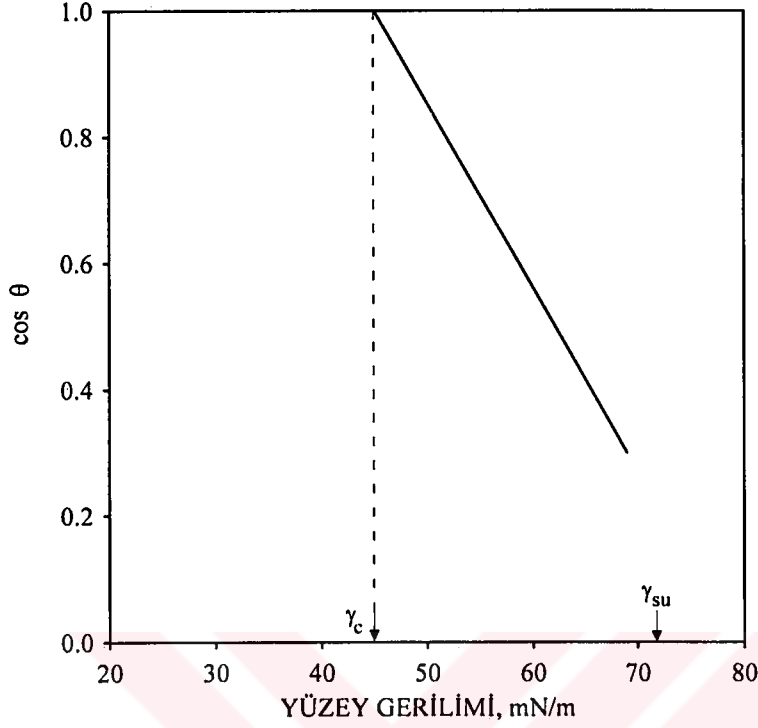
Kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) bir mineral yüzeyini karakterize etmede etkili bir parametre olarak dikkate alınabilir. Bununla birlikte, flotasyona uygulandığında, mineral ayrımları için termodinamik flotasyon kriterinin test edilmesine doğrudan bir yol sunar (Andrade ve Ark., 1985; Laskowski, 1986; Yarar, 1988).

Katıların veya minerallerin kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri, herhangi bir yüzey gerilimine (γ_{SH}) sahip sıvı tarafından katıların ıslanma koşulunu tarif eder. $\gamma_c < \gamma_{SH}$ olduğunda sıvı katı yüzeyinde bir temas açısı oluştururken ($\theta > 0$), $\gamma_c \geq \gamma_{SH}$ olduğunda sıvı katı yüzeyine yayılır (Yarar ve Aksu, 1997). Bu da flotasyonun başarılı olmasını gerektiren koşullardan birincisidir (Laskowski, 1986).

Zisman temas açısı ölçüm yöntemi ve flotasyon tekniği, minerallerin kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerlerini belirlemek için kullanılan iki önemli yöntemdir (Parekh ve Aplan, 1974; Williams ve Fuerstenau, 1987; Yarar, 1988; Yekeler ve Yarar, 1994b).

1.2.2.3.1. Zisman temas açısı ölçüm yöntemi

Saf sıvılar ve bunların çözeltileri kullanılarak parlatılmış veya preslenmiş mineral ya da katı yüzeyi üzerinde damla oluşturmak suretiyle statik haldeki temas açısı (θ) ölçümüne dayanan ve yaygın olarak kullanılan bir metottur. Bu yöntemde, yüzey gerilimi önceden belirlenen bir seri sıvı veya çözelti kullanılarak katıların temas açısı ölçülür. Elde edilen temas açılarının (θ) kosünüsüne karşı sıvıların sıvı-hava arayüzey gerilimi (γ_{SH}) eğrisi çizilir. $\cos \theta = 1$ olduğu noktaya γ_{SH} değerinin ekstrapolasyonu, Şekil 11'de gösterildiği gibi katının kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri bulunur (Shafrin ve Zisman, 1960).

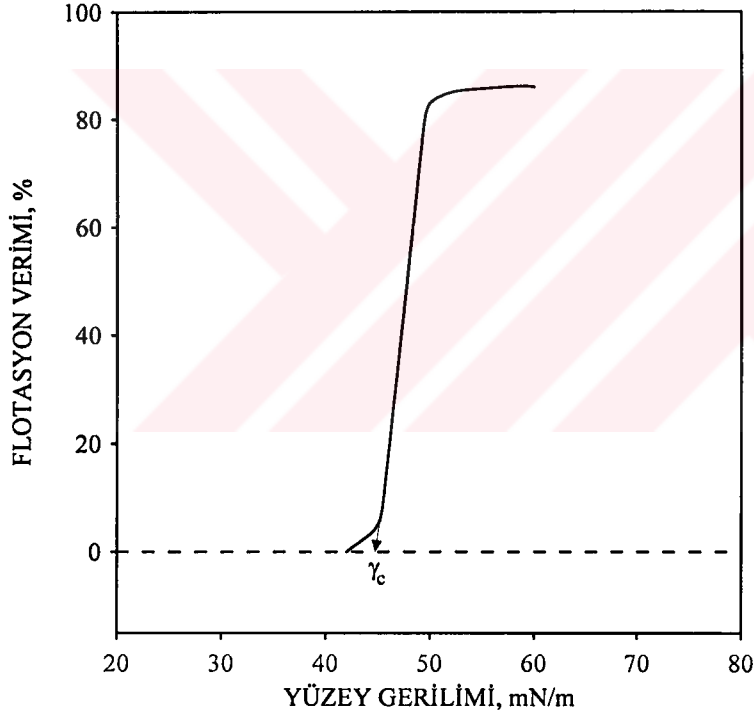


Şekil 11. Katının γ_c değerinin temas açısı ölçüm yöntemiyle belirlenmesi (Shafrin ve Zisman, 1960)

Zisman'ın temas açısı yöntemi ile katıların kritik ıslanma yüzey geriliminin belirlenmesi, güvenilir temas açısı verilerinin eldesine dayanır. Ancak, temiz yüzeyler üzerindeki temas açıları, kullanılan ölçüm tekniği ve ilgili değişkenler (yüzey pürüzlülüğü ve heterojenitesi, katı alt maddenin kristal ve köşesel özellikleri, sıcaklık, damlacık boyutu ve kullanılan sıvının tipi) tarafından etkilenirler.

1.2.2.3.2. Flotasyon yöntemi

Flotasyon yönteminde ise yine bir seri sıvı veya çözelti ile flotasyon testleri yapılarak elde edilen verim değerlerinin, sıvının sıvı-hava arayüzey gerilimi (γ_{SH}) değerlerine karşı eğrisi çizilir. Şekil 12'de görüldüğü gibi, %verim- γ_{SH} eğrisinin lineer kısmının ekstrapolasyonu yapılır ve verim%=0'da x-ekseninden okunan γ_{SH} değeri, mineralin kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri olarak bulunur (Yarar ve Kaoma, 1984).

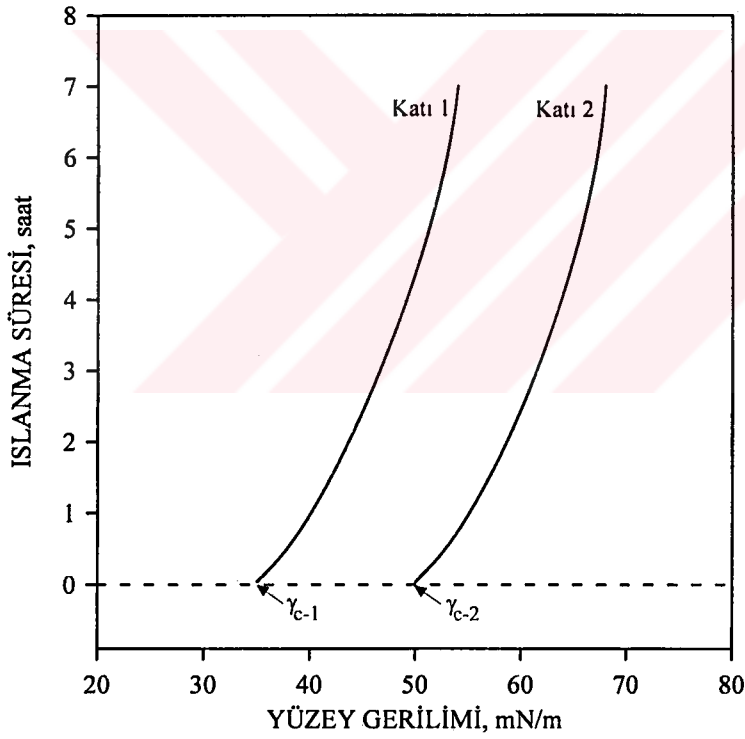


Şekil 12. Katının γ_c değerinin flotasyon yöntemiyle belirlenmesi (Yarar ve Kaoma, 1984)

1.2.2.3.3. Diğer yöntemler

Islanma süresi yöntemi (*Immersion time method*)

Bu teknik, yüzey gerilimi bilinen bir sıvı veya çözelti içerisinde bırakılan küçük mineral tanelerinin ıslanma süresinin dikkate alınması esasına dayanır. Tanelerin ıslanıp sıvıya batmasına sahip olan çözelti yüzey gerilimi, Şekil 13'de görüldüğü gibi katının kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri olarak yorumlanır (Garchava ve Ark., 1978).



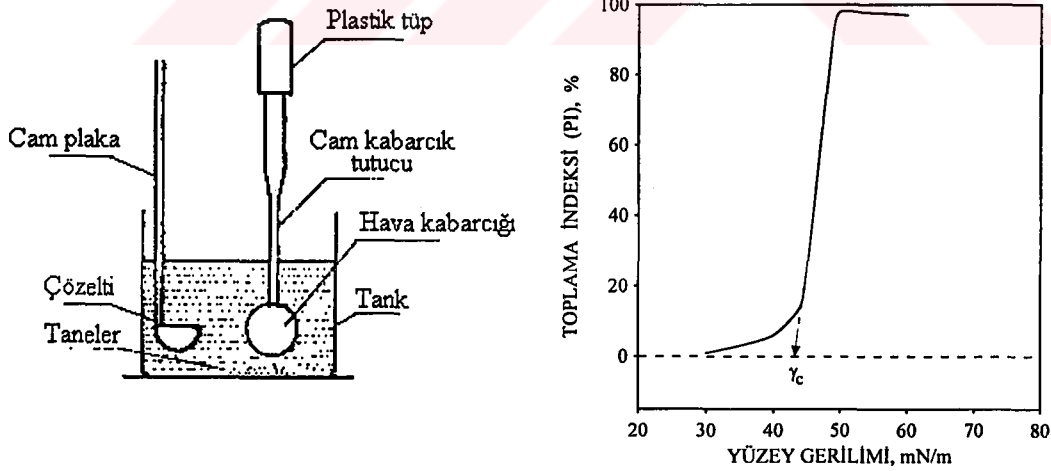
Şekil 13. Katının γ_c değerinin ıslanma süresi yöntemiyle belirlenmesi (Garchava ve Ark., 1978)

Hava kabarcığı toplama yöntemi (*Bubble pick up method*)

Bu yöntem, yarı-nicel olarak flotasyon testlerinin yerini tutarak, bir katı-sıvı-hava ortamında hidrofobik-hidrofilik geçiş koşulunun değerlendirilmesini sağlar. Toplama veya toplamama geçişindeki çözelti yüzey gerilimi, katının kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri olarak belirlenir. Bu yöntemde, hava kabarcığına yapışan hidrofobik taneler toplanıp, sayılır (taneler çok inceyse bir mikroskop yardımıyla) veya tartılır. Sonra, Eşitlik 33'den toplama indeksi (PI) hesaplanır ve Şekil 14'deki yaklaşımla katının kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri belirlenir (Sun ve Troxell, 1957).

$$PI = (P_n / P) \times 100 \quad (33)$$

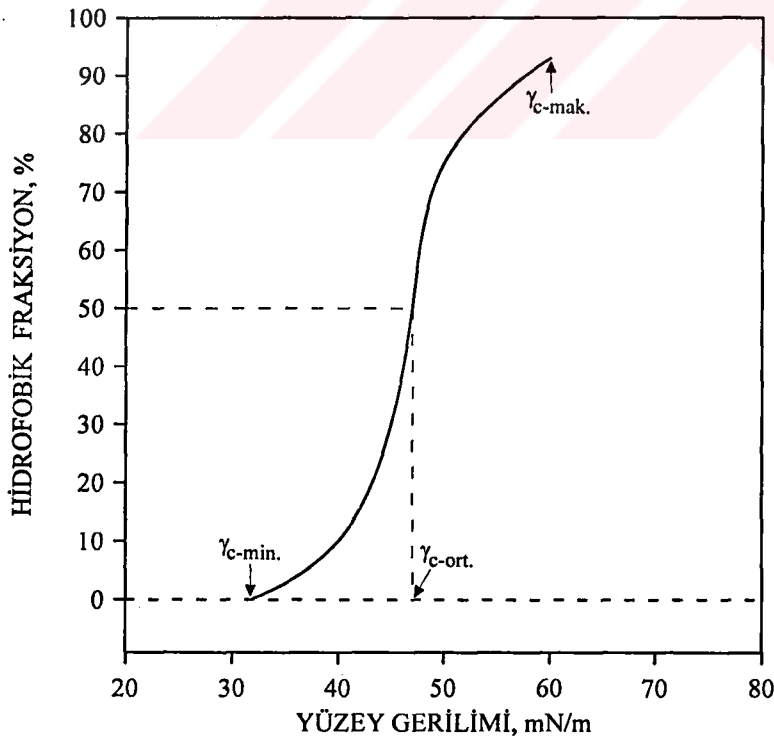
Burada; P_n belirli bir (hazırlanan) γ_{SH} değerine sahip çözeltide toplanan tane sayısı, P ise bir dizi teste en yüksek toplanan tane sayısıdır.



Şekil 14. Katının γ_c değerinin hava kabarcığı toplama yöntemiyle belirlenmesi (Sun ve Troxell, 1957)

Film flotasyonu yöntemi

Bu yaklaşımda, taneler tek tabaka halinde yüzey gerilimi değeri bilinen bir sıvı içerisinde bırakılır ve verilen bir süre sonunda batan tanelerin oranı tespit edilir. Bu testlerin sonuçlarından, Şekil 15’de gösterildiği gibi katının üç kritik ıslanma yüzey gerilimi değeri, yüzey gerilimine karşı çizilen toplam tane dağılım eğrisinden elde edilir. Tüm tanelerin ıslandığı çözelti yüzey gerilimi değeri “minumum kritik ıslanma yüzey gerilimi, γ_{c-min} ”, dağılımdaki tanelerin yarısının ıslandığı yüzey gerilimi “ortalama kritik ıslanma yüzey gerilimi, γ_{c-ort} ” ve hiçbir tanenin ıslanmadığı çözelti yüzey gerilimi değeri ise “maksimum kritik ıslanma yüzey gerilimi, γ_{c-max} ” olarak ifade edilir. γ_{c-ort} değeri katıların değerlendirilmesinde bir indeks olarak kullanılmaktadır. Katının hidrofobikliği arttıkça γ_{c-ort} değeri γ_{SH} ekseninde sağa doğru ilerler, yani daha yüksek γ_c değeri tespit edilmiş olur (Williams ve Fuerstenau, 1987).



Şekil 15. Katının γ_c değerinin film flotasyonu yöntemiyle belirlenmesi (Williams ve Fuerstenau, 1987)

Otomatik ıslanma terazisi yöntemi (*Automatic wetting balance method*)

Bu yöntem, çeşitli sıvılar tarafından fluoro-polimerlerin ıslanabilirliğini araştırmak için geliştirilmiştir. Farklı kimyasal yapılı fluoro-polimerlerle kaplanan ince katı tabakası, bir transducer denge kuvveti ile dengelenmektedir. Bu tabakalar çeşitli arayüzeyler (yağ/hava ve yağ/su) içerisine batırılır ve yer değiştirmeye karşı düzlemdeki hareketin miktarı belirlenir. Yağ/katı/hava ve yağ/katı/su sistemlerinin temas açıları aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanır:

$$\cos \theta = \tau / \gamma_L \quad (34)$$

$$\cos \theta_i = \tau_i / \gamma_i \quad (35)$$

Burada; θ yağ/katı/hava sistemindeki temas açısı, θ_i yağ/katı/su sistemindeki arayüzey bölgesi temas açısı, γ_L yüzey gerilimi, τ yağ/katı/hava sistemi için adhezyon gerilimi (birim alana düşen ıslanmama işine eşit), τ_i ise yağ/katı/su sistemi için arayüzey bölgesi adhezyon gerilimidir. Katının γ_c değeri $\cos \theta = 1$ olduğu andaki değer olup, çizilen $\cos \theta - \gamma_L$ eğrisinden bulunur. Bu verilerden, iki kritik ıslanma yüzey gerilimi değeri elde edilir: γ_c kritik ıslanma yüzey gerilimi, γ_c^i ise esasen pürüzlülüğün neden olduğu temas açısı hatasından (*hysteresis*) ileri gelen kritik arayüzey bölgesi ıslanma gerilimidir (Rosano ve Ark., 1971).

Modifiye edilmiş Hildebrand-Scott eşitliği yöntemi

Bu eşitlik (Eşitlik 36) ile polimerlerin kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerleri onların moleküler yapılarından yararlanılarak önceden belirlenebilir.

$$\gamma_c = 0.327 \left[\frac{(\sum F)^s}{n_s} \right]^{1.85} \left[\frac{n_s}{V_m^s} \right]^{1.52} \quad (36)$$

Burada; $(\sum F)^s$ polimerik moleküldeki bir bölümün dispersiyon kuvveti (bu hem de Small'ın molar çekim sabitlerinin toplamına eşittir), V_m^s bir bölümünün molar hacmi, n_s ise bir bölümündeki atom sayısıdır (Wu, 1968).

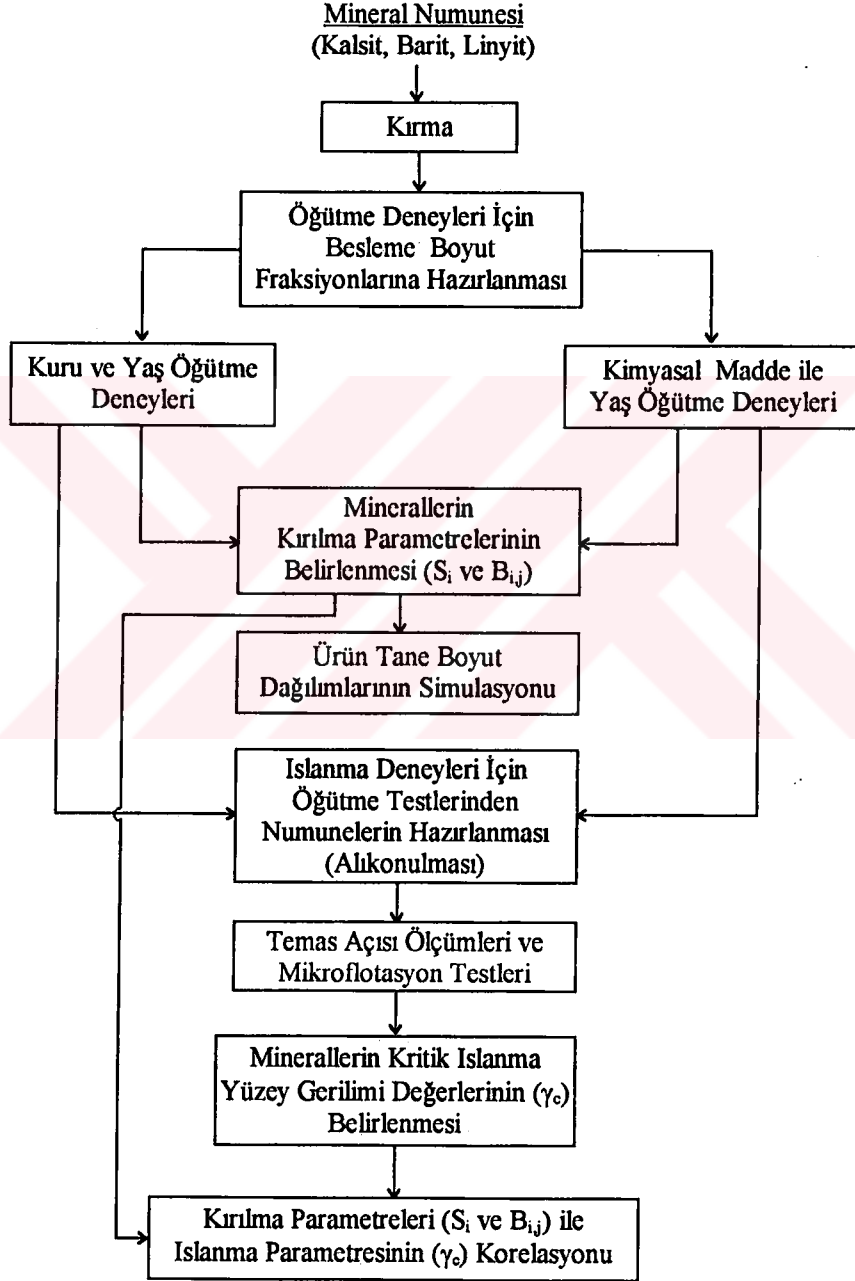


2. MALZEME VE YÖNTEM

Minerallerin (kalsit, barit ve linyit kömürü) öğütme sonucu belirlenen kırılma parametreleri ile temas açısı ölçümleri ve flotasyon testleriyle belirlenen ıslanma parametresi arasındaki ilişkiyi araştırmak için Şekil 16'da ana hatlarıyla gösterilen akım şeması izlenmiştir.

Bu çalışma, aşağıda verilen aşamalardan oluşmaktadır:

1. Temin edilen mineral örneklerinin öğütme testleri için farklı besleme boyut fraksiyonlarına (-1700+1180 μm , -1180+850 μm , -850+600 μm , -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm) hazırlanması.
 - a. Hazırlanan bu fraksiyonların laboratuvar tipi porselen bilyalı değirmende kuru, yağ ve kimyasal madde (sodyum dodesil sülfat, sodyum-oleat, Aero 845, oleik asit, gazyağı) ile yağ öğütülmesi.
 - b. Kırılma karakteristiklerini ifade eden özgül kırılma hızı (S_i) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametrelerinin öğütme testleri sonucundan belirlenmesi.
 - c. Belirlenen kırılma parametreleri ile öğütme sonucu tane boyut dağılımlarının simülasyonu.
 - d. Islanma testleri için öğütme deneylerinden tane boyut dağılımı bakımından uygun ürünlerin (-212 μm tane boyut fraksiyonu) alınması.
2. Islanma deneyleri için belirlenen/alınan ürünler üzerinde temas açısı ölçümleri ve flotasyon testlerinin yapılması.
 - a. Islanma deneylerinde kullanılacak metil alkol ve sodyum klorür çözeltilerinin hazırlanması ve bu çözeltilerin yüzey gerilimlerinin belirlenmesi.
 - b. Temas açısı ölçüm cihazı (goniometre) kullanılarak, kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerinin tespiti için temas açısı ölçümlerinin yapılması.
 - c. Yeni dizayn edilen mikroflotasyon hücresi kullanılarak, kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerinin tespiti için flotasyon testlerinin yapılması.
3. Özgül kırılma hızı (S_i) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametresi γ ile kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri arasındaki ilişkinin/ilişkilerin kurulması.



Şekil 16. Tez çalışmasında izlenen akım şeması

2.1. Mineraller

Bu çalışmada, model için hammaddeler olarak Türkiye’de yaygın şekilde üretilen ve prosesleri yapılan kalsit (Niğde yöresi), barit (Kahramanmaraş yöresi) ve linyit kömürü (Tunçbilek yöresi) kullanılmıştır.

Numunelerinin piknometre ile yoğunlukları tespit edilmiş olup, yapılan üç ölçümünün ortalaması alınarak kalsit, barit ve kömürün yoğunlukları sırasıyla 2.69 gr/cm³, 4.38 gr/cm³ ve 1.46 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Ayrıca, kalsit, barit ve kömürün kimyasal analiz sonuçları sırasıyla Tablo 3, 4 ve 5’de verilmiştir.

Tablo 3. Kalsit numunesinin kimyasal analiz sonuçları

CaCO ₃ , %	SiO ₂ , %	MgO, %	R ₂ O ₃ , %
99.14	0.30	0.31	0.25

Tablo 4. Barit numunesinin kimyasal analiz sonuçları

BaSO ₄ , %	SiO ₂ , %	CaCO ₃ , %	SrSO ₄ , %	Fe ₂ O ₃ , %	Al ₂ O ₃ , %
97.63	0.78	0.12	1.29	0.14	0.04

Tablo 5. Kömür numunesinin kimyasal analiz sonuçları (orijinal baz)

Kül, %	Nem, %	Uçucu Madde, %	Kükürt, %	Sabit Karbon, %	Karbon, %	Isıl Değer, MJ/kg
15.83	18.25	35.36	1.49	30.56	54.03	22.24

Temin edilen numuneler laboratuvarında çeneli ve merdaneli kırıcıda kırılarak kalsitin tamamı -1180 µm tane boyutuna, barit ve kömür ise -1700 µm tane boyutuna indirilmiştir. Kırılan numuneler daha sonra $\sqrt{2}$ dizisini takip eden elekler ile öğütme testleri için sınıflandırılmıştır. Kalsit -1180+850 µm, -850+600 µm, -600+425 µm, -425+300 µm ve -300+212 µm besleme boyut fraksiyonlarına; barit ve kömür ise -1700+1180 µm, -1180+850 µm, -850+600 µm, -600+425 µm, -425+300 µm ve -300+212 µm besleme boyut fraksiyonlarına hazırlanmıştır.

Öğütme deneylerinden belirli bir öğütme süresi sonrası elde edilen ürünler (ıslanma deneyleri için uygun olan -212 µm tane boyut fraksiyonları), ıslanma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla temas açısı ölçümleri ve mikroflotasyon testleri için alıkonulmuştur.

2.2. Öğütme Deneyleri

2.2.1. Değirmen özellikleri ve öğütme koşulları

Öğütme deneylerinde porselen bilyalı değirmen ve öğütücü ortam olarak ise porselen bilyalar kullanılmıştır. Değirmen, bilya ve numune özellikleri ile deney koşulları Tablo 6’da verilmiştir.

Bilyalı değirmenlerin dönüş hızı genellikle değirmenin kritik hız değerinin %70-85’i arasında seçilir. Değirmen dönüş hızı aşağıdaki eşitlikten hesap edilir.

$$\text{Kritik hız } (N_k) = 42.2 / \sqrt{D - d} \text{ (dev./dak.)} \quad (37)$$

Burada; D değirmen çapı (m), d ise bilya çapıdır (m).

Öğütücü ortam olarak değirmene şarj edilen bilya yatağı hacminin değirmen hacmine oranı bilya şarj oranı (J) olarak ifade edilir. Bilya yatağı porozitesi, bilya boyutuna bağlı olarak düşük oranda değişmekle beraber genellikle 0.4 olarak kabul edilmektedir (Austin ve Ark., 1984).

Değirmene beslenen bilya miktarı Eşitlik 38’den bulunur.

$$J = \frac{(\text{Bilya ağırlığı} / \text{Bilya yoğunluğu})}{(\text{Değirmen hacmi})} \times \frac{1.0}{0.6} \quad (38)$$

Tablo 6. Öğütme deneylerinde kullanılan porselen bilyalı değirmen özellikleri ve deney koşulları

Porselen	İç çapı, mm	128
Değirmen	Uzunluğu, mm	212
	Hacmi, cm ³	2500
	Kritik hız, dev./dak.	132
	Çalışma hızı, dev./dak.	92
	Öğütücü ortam (Bilyalar)	Cinsi
Öğütücü ortam (Bilyalar)	Çapı, mm	25.3
	Sayısı	37
	Özgül ağırlığı	3.75
	Ortalama bilya ağırlığı, gr	30.4
	Bilya şarj oranı, J	0.20
	Numune	Cinsi
Yoğunluk, gr/cm ³		Kalsit: 2.69
		Barit: 4.38
		Kömür: 1.46
Malzeme ağırlığı, gr		Kalsit: 193.68
		Barit: 315.36
		Kömür: 105.12
Malzeme şarj oranı, f _c		0.048
Malzeme-bilya doluluk oranı, U		0.60
Pülp yoğunluğu (hacimce), %		40
Su	Mono-distile su	

Değirmene beslenen malzeme tarafından doldurulan bilyalar arasındaki boşluk oranı U olarak ifade edilir. Değirmende etkili bir öğütme elde etmek için U değerinin 0.6-1.1 arasında olması gerektiği verilmiştir (Austin ve Ark., 1984).

$$U = \frac{f_c}{0.4 J} \quad (39)$$

Burada; f_c malzeme şarj oranı, J ise bilya şarj oranıdır.

Değirmene beslenen malzeme miktarının değirmen hacmine oranı da malzeme şarj oranı (f_c) olarak tanımlanır. Malzeme yatağı porozitesi ise genellikle 0.4 olarak alınır ve Eşitlik 40'dan değirmene beslenecek malzeme miktarı bulunur (Austin ve Ark., 1984).

$$f_c = \frac{(\text{Numune ağırlığı} / \text{Numune yoğunluğu})}{(\text{Değirmen hacmi})} \times \frac{1.0}{0.6} \quad (40)$$

Yaş öğütme işleminde karışımdaki katı ağırlığının oranı pülpün katı oranı olarak ifade edilir. Ancak, bir pülpün reolojik özellikleri katı oranının hacimce ifadesi ile daha iyi tanımlanır. Pülpün hacimce katı oranı (c);

$$c = (w_K / \rho_K) / [(w_K / \rho_K) + (1-w_K) / \rho_S] \quad (41)$$

Burada; w_K : Katı ağırlığı, ρ_K : Katı yoğunluğu, ρ_S : Sıvı yoğunluğu

Özgül kırılma hızı (S_i) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametrelerinin belirlenmesinde standart S ve B öğütme testi (Austin ve Ark., 1984) kullanılmıştır.

Boyut fraksiyonlarına ayrılan mineral numuneleri değirmende kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş olmak üzere üç şekilde öğütülmüşlerdir. Kuru öğütme testinde her bir öğütme süresinden sonra elek analizi yapılarak, aynı numune bir sonraki periyot için de kullanılmıştır. Ancak, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme testlerinde her bir deney için yeni numune kullanılmıştır.

-1180+850, -850+600, -600+425, -425+300 ve -300+212 μm tane boyut fraksiyonlarına ayrılan kalsit numuneleri değirmende kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme olmak üzere 1, 2, 4, 8, 16, 32 (ve 64) dakika süreyle öğütülmüşlerdir. Kalsit mineralinin kimyasal madde ile yaş öğütülmesinde öğütmeye yardımcı madde olarak sodyum dodesil sülfat (SDDS, $C_{12}H_{25}SO_4Na$), sodyum-oleat ($C_{17}H_{35}COONa$), Aero 845 (Cyanamid Company) ve oleik asit

(C₁₇H₃₅COOH) kullanılmıştır. Bu kimyasal maddelerin kullanım konsantrasyonları ise sırasıyla 2×10^{-4} M, 3.5×10^{-4} M, 55 mg/L ve 2×10^{-4} M'dir.

-1700+1180, -1180+850, -850+600, -600+425, -425+300 ve -300+212 µm tane boyut fraksiyonlarına ayrılan barit numuneleri yine kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme olmak üzere 1, 2, 4, 8, 16 ve 32 dakika süreyle öğütülmüşlerdir. Barit mineralinin kimyasal madde ile yaş öğütülmesinde ise öğütmeye yardımcı madde olarak sodyum dodesil sülfat (SDDS) kullanılmış olup, kullanım konsantrasyonu 1×10^{-3} molardır.

-1700+1180, -1180+850, -850+600, -600+425, -425+300 ve -300+212 µm tane boyut fraksiyonlarına ayrılan linyit kömürü numuneleri de kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme olmak üzere 1, 2, 4, 8, 16, 32 ve 64 dakika süreyle öğütülmüşleridir. Kömürün kimyasal madde ile yaş öğütülmesinde ise öğütmeye yardımcı madde olarak gazyağı kullanılmış olup, kullanım miktarı 485 mg/L'dir.

Her bir öğütme periyodundan sonra değirmendeki malzemenin tamamı alınarak filtre edildikten (kuru öğütme ürünleri hariç) sonra etüvde kurutulmuş ve bu ürünlerden konileme-dörtleme yöntemi ile temsili numune (kalsit, barit ve kömür için sırasıyla yaklaşık olarak 40 gr, 50 gr ve 15 gr) alınarak boyut dağılımını belirlemek için elek analizi yapılmıştır.

2.2.2. Elek analizleri

Öğütme testleri sonunda ürünlerin boyut dağılımının tespitinde $\sqrt{2}$ serisini takip eden Retch marka elek seti (1700 µm, 1180 µm, 850 µm, 600 µm, 425 µm, 300 µm, 212 µm, 150 µm, 106 µm, 75 µm, 53 µm ve 38 µm) kullanılmıştır.

Tane boyut dağılımı belirlenecek ürünün temsili numunesi önce yaklaşık 10-15 dakika süreyle suyla yıkanmıştır. Sonra elek yüzeylerindeki malzemeler eleklerle beraber etüvde kurutulmuştur. Bunu takiben eleme kinetiği ile belirlenen süre kadar (10 dakika) kuru eleme yapılmış ve sonrasında elek üzerinde kalan malzeme ağırlıkları tartılmıştır.

Kalsit, barit ve kömürün optimum eleme süreleri eleme kinetiği yapılarak belirlenmiştir. Eleme kinetiği için elek serisinde yer alan 150 µm'lik elek

kullanılmış olup, eleme süresine bağlı olarak elek üzerinde kalan miktar tespit edilerek her üç numune içinde 10 dakikalık eleme süresinin optimum olduğu saptanmıştır.

2.3. Simülasyon

Minerallerin kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme testleriyle öğütülme kinetiğini belirleyen kırılma parametreleri belirlendikten sonra PSUSIM (Pennsylvania State University Simulator) (Austin ve Ark., 1989) adlı paket program kullanılarak ürünlerin boyut dağılımlarının simülasyonu yapılmıştır.

Bu program, Basic dili ile yazılmış olup, değirmen ve sınıflandırıcı modellerine kolaylıkla uygulanabilir yapıda hazırlanmıştır. Bu program ile çeşitli öğütme devresi kombinasyonlarının (açık devre, kapalı devre ve sınıflandırma işlemi içeren) simülasyonu yapılabilmektedir. Laboratuvar verileriyle de öğütme tesisinin simülasyonu, ölçek büyütmek suretiyle başarılı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bilyalı değirmen kullanılarak yapılan öğütme testlerinde, öğütme kinetiği standart S ve B testleriyle belirlenmektedir. S parametreleri belirli bir boyuttaki malzemenin daha alt boyutlara ne kadar hızla kırıldığını, B parametreleri ise kırılan malzemenin alt boyutlara nasıl dağıldığını ifade etmektedir. S ve B testlerinden elde edilen kırılma parametreleri fonksiyon değerleri α , a_T , γ , ϕ ve β değerleri kullanılarak, öğütme işlemi bilgisayar ortamında simüle edilebilir. Deneysel sonuçlar ile bilgisayar ortamında bulunan sonuçlar karşılaştırılarak, simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumu karşılaştırılmaktadır.

2.4. İslanma Deneyleri

Minerallerin ıslanma özelliklerini karakterize eden kritik ıslanma yüzey gerilimi değeri (γ_c) iki önemli metot olan temas açısı ölçüm tekniği ve flotasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçların güvenilirliğini artırmak için temas açısı ölçümleri en az iki ya da üç pelet üzerinde yapılarak ortalaması alınmış, flotasyon testleri ise çoğunlukla yapılan iki deneyin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

Minerallerin ıslanma özelliklerinin belirlenmesi için değirmende öğütülen -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutlarının kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütülmüş ürünleri kullanılmıştır.

Kalsit ve barit minerallerinin kuru öğütme ürünü olarak 32. dakika, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme ürünü olarak ta 16. dakika ürünleri, kömürün ise 64. dakika ürünleri, -212 μm fraksiyonunu temsil ettiği için ıslanma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu sürelerin belirlenmesinde, farklı öğütme tipleri için elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımlarının nispeten birbirine yakın olması ve seçilen süre sonundaki ürün tane boyutunun temas açısı ölçümü için pelet hazırlanmasına ve mikroflotasyon testlerine uygun olması gözönüne alınmıştır.

2.4.1. Kullanılan çözeltiler ve yüzey gerilimleri

Minerallerin ıslanma özelliklerinin belirlenmesi için temas açısı ölçümlerinde ve flotasyon testlerinde Panreac Quimica SA'dan temin edilen metil alkol (CH_3OH) ve Merck marka sodyum klorür (NaCl) ile hazırlanan çözeltiler kullanılmıştır. Tüm deneylerde kullanılan çözeltilerin hazırlanmasında mono-distile su kullanılmış olup, çözeltiler ağırlıkça hazırlanmıştır.

Mineralin kimyasal maddelerle muamele edilip/edilmemesine göre kullanılacak çözelti tipi serisi seçilmiştir. Hazırlanan çözeltilerin yüzey gerilimlerinin tespiti, temas açısı ölçümleri ve flotasyon testlerinde kullanımı sırasında sıcaklığı 18 ± 2 °C arasında korunmuştur.

Kullanılan çözeltilerin yüzey gerilimi değerleri (γ_{SH}) damla-ağırlık yöntemiyle (Drop-weight method) belirlenmiştir (Padday, 1968). Bunun için 10 ml'lik bir büret kullanılmıştır. Yüzey gerilimi belirlenecek çözelti bürete konulduktan sonra, etüvde 105 °C'de kurutulan bir cam kap içerisine sayılabilecek bir akış hızında büretin vanası açılarak 50 damla sayılmıştır. Daha sonra hassas elektronik tartıda (0.0001 gr hassasiyette) toplanan çözeltinin ağırlığı (ΣM) tartılmıştır. Buradan bir damlanın ağırlığı (m) bulunmuştur.

Tate (1864) yasasına göre bir damlanın ağırlığını destekleyen maksimum kuvvet;

$$w = mg = 2\pi r \gamma \text{ 'dır.} \quad (42)$$

Burada; γ çözeltinin yüzey gerilimi, r ise büretin silindirik uç kısmının yarı çapıdır. Ancak, gerçekte elde edilen ağırlık, ideal ağırlık değerinden daha düşük bir değerdir. Bunun nedeni, büretin silindirik uç noktasının mekaniksel kararsızlığından dolayı damlanın bir kısmının (yaklaşık olarak %40'ı kadar) uç noktaya yapışık kalmasıdır. Bu nedenle Eşitlik 42'ye düzeltme faktörü (F) uygulanır (Eşitlik 43).

$$F = f(r/v^{1/3}) \quad (43)$$

$$\gamma = mg / 2\pi r ; \gamma = (mg/r)F \quad (44)$$

Harkins ve Brown (1919), f 'in $r/v^{1/3}$ 'ün bir fonksiyonu olduğunu bulmuşlardır. Burada v damlanın hacmi olup, sıvının yoğunluğu (ρ) bilindiğinden m/ρ 'dan bulunur. Lando ve Oakley (1967) tarafından f 'in $r/v^{1/3}$ ile değişimi tablo halinde listelenmiştir. $r/v^{1/3}$ değeri hesaplanarak, tablodan buna tekabül eden düzeltme faktörü (F) bulunur. Sonuç olarak, çözeltinin yüzey gerilimi (γ , mN/m) Eşitlik 44 kullanılarak hesap edilir.

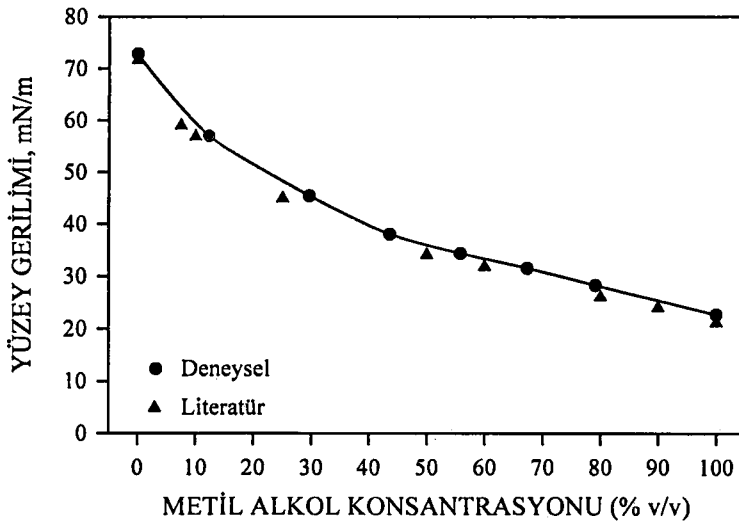
Temas açısı ölçümlerinde ve flotasyon testlerinde kullanılan çözeltilerin kullanım konsantrasyonları ve tespit edilen yüzey gerilimi değerleri Tablo 7'de

verilmiştir. Metil alkol çözeltilerinin deneysel olarak belirlenen yüzey gerilimi değerleriyle literatür değerleri (Weast, 1987) karşılaştırmalı olarak Şekil 17’de gösterilmiştir. Şekil 18’de ise sodyum klorür çözeltilerinin deneysel olarak belirlenen yüzey gerilimi değerleri verilmiştir. Tespit edilen yüzey gerilimi değerleriyle literatür değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur.

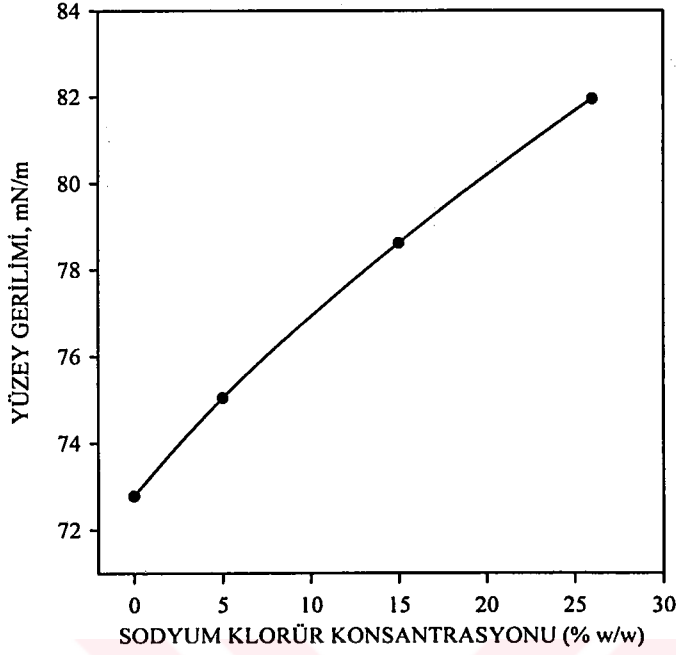
Kullanılan çözeltilerin yüzey gerilimi değerleri iki veya üç kez yapılan ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Tablo 7. Temas açısı ölçümleri ve flotasyon testlerinde kullanılan çözeltilerin konsantrasyonlarına karşılık yüzey gerilimi değerleri

Kimyasal Madde	Konsantrasyon, % w/w	Konsantrasyon, % v/v	Yüzey Gerilimi (γ_{SH}), mN/m
Sodyum klorür (NaCl)	26		81.95
	15		78.62
	5		75.04
Mono-distile su	0	0	72.78
	10	12.31	57.03
	25	29.63	45.47
Metil alkol (CH ₃ OH)	38	43.64	38.12
	50	55.82	34.45
	62	67.33	31.61
	75	79.12	28.35
	100	100	22.76



Şekil 17. Kullanılan metil alkol çözeltilerinin konsantrasyonlarına karşı yüzey gerilimi değerleri



Şekil 18. Kullanılan sodyum klorür çözeltilerinin konsantrasyonlarına karşı yüzey gerilimi değerleri

2.4.2. Temas açısı ölçümleri

Temas açısı ölçümleri Rame-Hart Inc.'in 100 NRL modelindeki Contact Angle Goniometer ile yapılmıştır. Bu cihaz ile temas açısının doğrudan belirlenmesi mümkündür.

Islanma özellikleri belirlenecek numuneler pres altında peletlenerek 1.2 cm çapında pelet haline getirilmiştir. Malzemenin cinsine bağlı olarak pelet yapımında kullanılan malzeme miktarı ve prese uygulanan basınç sabit tutulmuştur. Hazırlanan pelet, okuma için cihaza yerleştirilip gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra pelet yüzeyine bir damlalık ile yüzey gerilimi değeri bilinen bir damla çözelti damlatılmıştır. Damlanın görüntüsü üzerine goniometrenin mikroskobu odaklanarak, pelet yüzeyindeki damlanın her iki kenarından temas açısı okunarak, ortalama değer alınmıştır. Aynı işlem bir seri alkol ya da tuz çözeltisi ile tekrarlanmıştır.

Kimyasal madde ile muamele edilecek peletler hazırlandıktan sonra, o malzemenin değirmende öğütülmesi sırasında kullanılan aynı kimyasal madde tipi ve konsantrasyonuna sahip çözeltisi ile muamele edilerek (yüzeyi adsorplanarak) temas açıları ölçülmüştür.

2.4.3. Mikroflotasyon testleri

Flotasyon testleri ile minerallerin kritik ıslanma yüzey gerilimi değerinin belirlenebilmesi için küçük boyutlu bir flotasyon hücresi ve yan sistemleri yapılmıştır (Şekil 19) (Özkan ve Yekeler, 2001). Mikroflotasyon kolon hücresiyle düşük numune, çözelti ve reaktif sarfiyatı sağlanıp, deneyler başarıyla yapılmıştır.

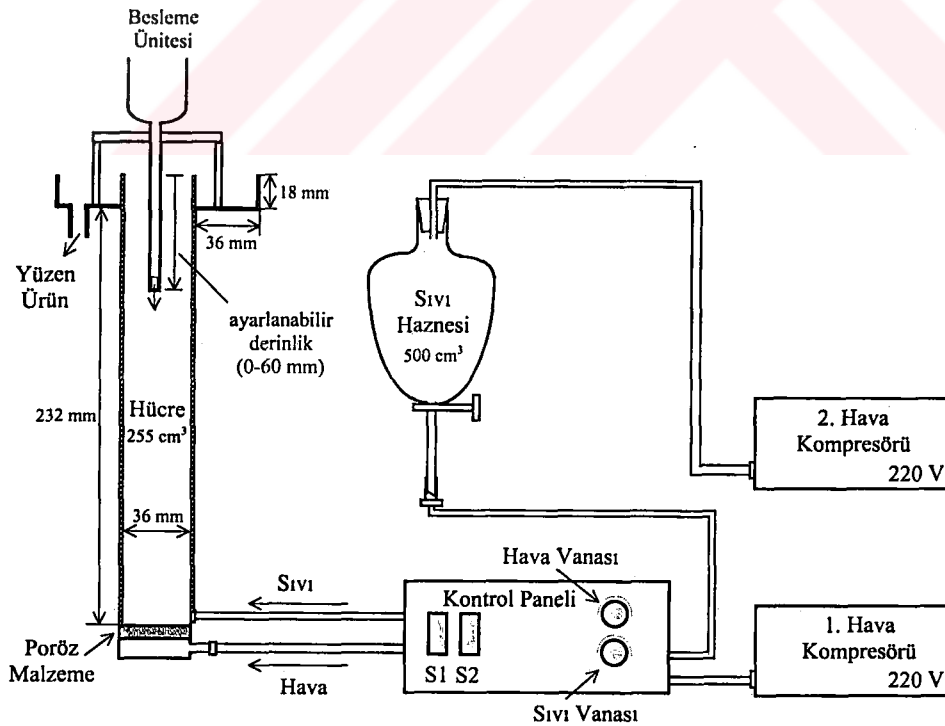
Tasarlanan mikroflotasyon hücresi Kanada Kolunu hücresi (Yoon, 1994) ve Partridge-Smith hücresinin (Partridge ve Smith, 1971) kombinasyonunun benzer bir şeklidir. Hücre, cam bir silindir ve plastik malzemelerden yapılmıştır. Hücrenin toplam hacmi 255 cm^3 , iç çapı 36 mm ve yüksekliği 250 mm'dir. Hava kabarcığı üretici olarak akvaryum hava taşı kullanılmış olup, hücrenin alt kısmına yerleştirilmiştir. Mikroflotasyon kolonu hücresinde iki kanal mevcuttur: Birincisi hava kabarcığı üreticinin üzerinde yeralan çözelti/sıvı giriş kanalı, diğeri ise plastik malzemedan yapılmış olan yüzen ürünün toplanıp alındığı kanaldır. Hava kabarcığı üretici yeterince mikro-kabarcık üretimi için uygun bir malzemedir.

Mikro-kabarcıkların üretilmesi, Şekil 19'da gösterilen kontrol panelinde yeralan S1 anahtarı vasıtasıyla 1. hava kompresörünün çalıştırılmasıyla sağlanır. Hava akış debisi ise maksimum $200 \text{ cm}^3/\text{dak.}$ 'ya kadar kontrol panelinde yeralan hava vanasıyla ayarlanabilir. Hücreye sıvı veya çözelti beslemesi ise S2 anahtarıyla kontrol edilen 2. hava kompresörünün çalıştırılması ile uygulanan basınç yardımıyla cam bir ayırma hunisi olan sıvı haznesinden sağlanır. Sıvı akış debisi ise sıvı vanası ile maksimum $75 \text{ cm}^3/\text{dak.}$ 'ya kadar ayarlanabilir. Besleme ünitesi, besleme işlemi tamamlandıktan sonra kaldırılabilir ve hücre içine yapılan besleme derinliği ayarlanabilir. 1. ve 2. hava kompresörleri, vanalar, plastik hortumlar vs. akvaryum imalatında kullanılan veya laboratuvarında bulunabilecek malzemelerdir.

Tasarlanıp yapılan mikroflotasyon hücresi ile aşağıda verilen avantajlar sağlanmıştır:

- Hücre, hem Kanada Kolonu ve hem de Partridge-Smith Hücresinin işlevlerini yerine getirebilir.
- Test işlemi çok düşük miktarda numune, çözelti ve reaktif gerektirir..
- Hücre, hava kabarcığı üretici, havalandırma hızı, köpük toplama zonu ve çalışma basıncı bakımından iyi çalışmaktadır.
- Test işleminin kontrolü kolay ve istenilen yere (laboratuvar veya sınıf) gösterim açısından taşınabilir.

Hücre ve yan sistemlerin imalinde kullanılan malzemeler ucuz ve kolaylıkla temin edilebilecek laboratuvar ve akvaryum malzemeleridir.



Şekil 19. Mikroflotasyon hücresi ve yan sistemleri (Özkan ve Yekeler, 2001)

Sistemin çalıştırılması

Hücre, çok düşük pülp yoğunluklarında çalıştırılabildiğinden düşük miktarda (1-1.5 gr) numune kullanılabilir. Çözelti sıvı haznesine konulduktan sonra, S2 anahtarıyla 2. hava kompresörü çalıştırılarak uygulanan basınç yardımıyla sıvı haznesinden çözelti hücreye nakledilir. S1 anahtarı ile de 1. hava kompresörü çalıştırılarak hücre içinde hava kabarcıkları üretilir. Besleme ünitesinden malzeme hücreye beslenir. Sonuç olarak yüzen ürün köpükte toplanır ve toplama kanalı yardımıyla dışarı alınır.

Flotasyon testlerinde 1-1.5 gr civarında numune kullanılmıştır. Mineralin kimyasal madde ile muamele edilip/edilmemesine göre kullanılacak çözelti tipi serisi seçilmiştir ve yüzey gerilimi bilinen çözelti hücreye beslenmiştir. Flotasyon testine tabi tutulacak numune 3 dakika karıştırıcıda, hücredeki aynı yüzey gerilimine sahip çözelti ile kondüsyonlandıktan sonra flotasyon testine tabi tutulmuş olup, köpük alma süresi ise 2 dakika verilmiştir. Aynı işlemler bir seri alkol ya da tuz çözeltisi ile tekrarlanmıştır. Deneylerde hava akış debisi 50 cm³/dak, sıvı akış debisi ise 75 cm³/dak. kadardır.

Kimyasal madde kullanılan flotasyon deneylerinde ise o malzemenin değirmende öğütülmesi sırasında kullanılan aynı kimyasal madde tipi ve konsantrasyonuna sahip çözelti ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Minerallerin Kırılma Parametrelerinin Belirlenmesi ve Ürünlerin Tane Boyut Dağılımlarının Simülasyonu

3.1.1. Kalsit

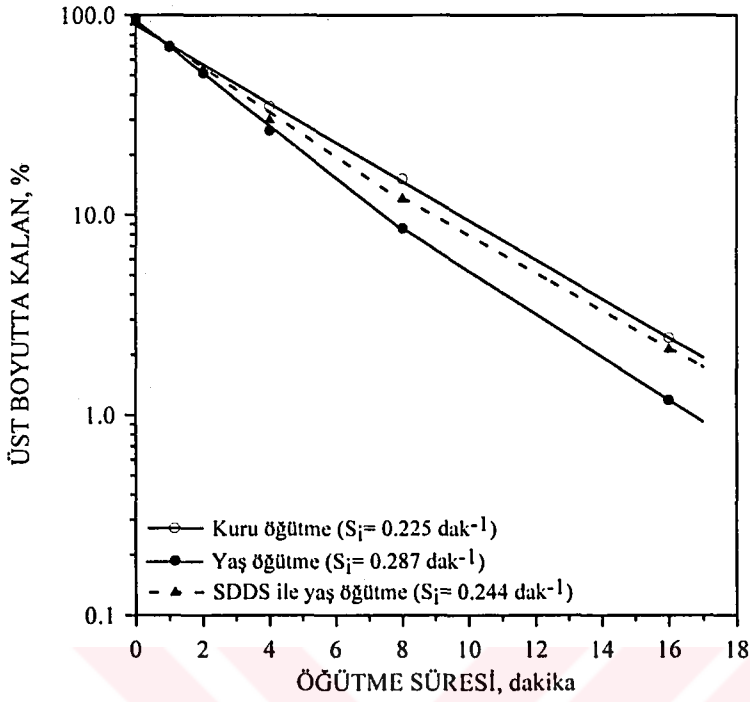
3.1.1.1. Özgül kırılma hızları (S_i) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametrelerinin belirlenmesi

Kalsit minerali için öğütme testleri kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme olmak üzere üç şekilde yapılmıştır. Her bir öğütme şeklinde 5 besleme boyut grubu ayrı ayrı (-1180+850 μm , -850+600 μm , -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm) 1, 2, 4, 8, 16 ve 32 (ve 64) dakika süreyle değirmende kesikli (*batch*) öğütülmüşlerdir. -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyut fraksiyonlarının özgül kırılma hızları (S_i), toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri ve ürünlerin tane boyut dağılımları tespit edilmiştir. -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme boyut fraksiyonlarının ise özgül kırılma hızları belirlenmiştir.

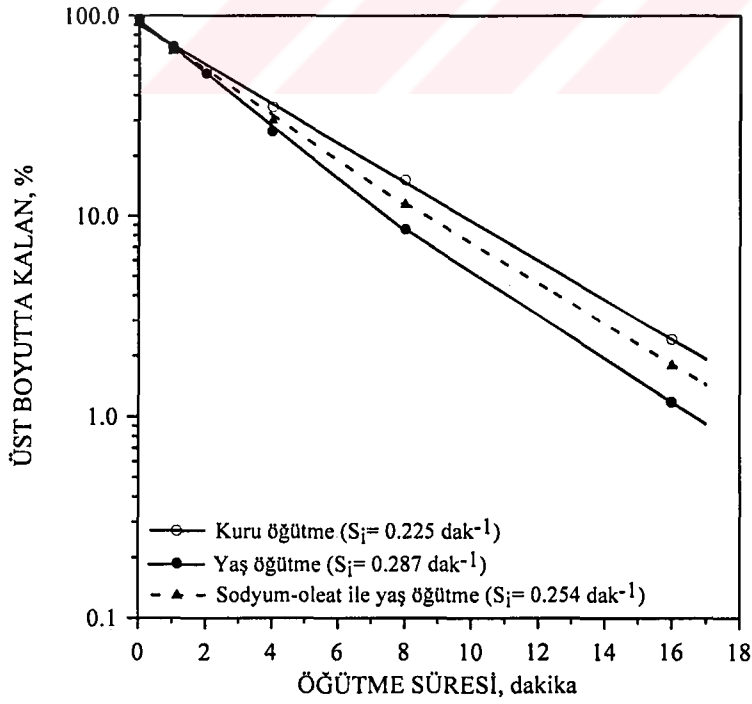
Kimyasal madde ile yaş öğütme testlerinde öğütmeye yardımcı madde olarak sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M), sodyum oleat (3.5×10^{-4} M), Aero 845 (55 mg/L) ve oleik asit (2×10^{-4} M) kullanılmıştır.

Hazırlanan besleme boyutu fraksiyonlarının kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları, Şekil 20'den 38'e kadar özgül kırılma hızları şekillerinde gösterilmiştir.

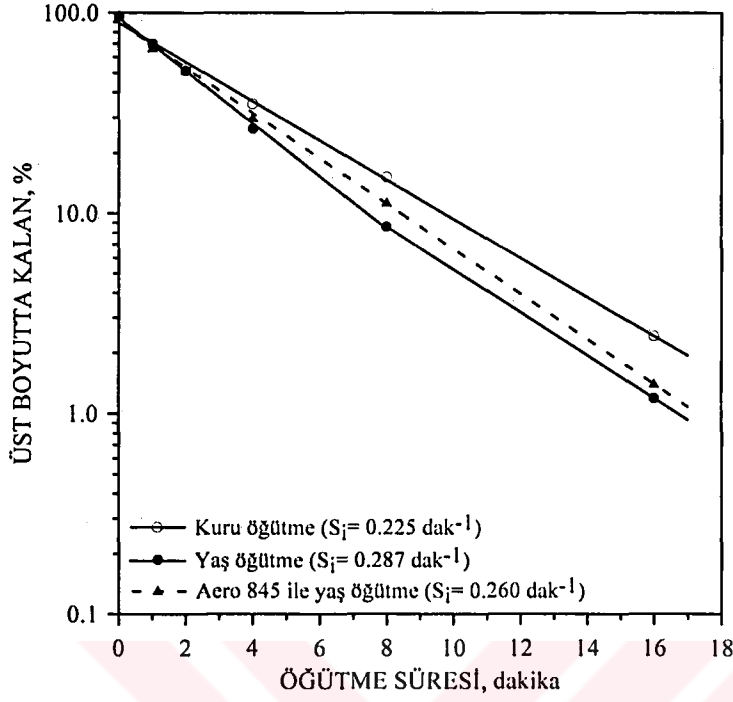
Kalsit mineralinin kuru ve yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları sırasıyla Ek 1.A ve Ek 1.B'de; sodyum dodesil sülfat, sodyum oleat, Aero 845 ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ise sırasıyla Ek 1.C, Ek 1.D, Ek 1.E ve Ek 1.F'de verilmiştir.



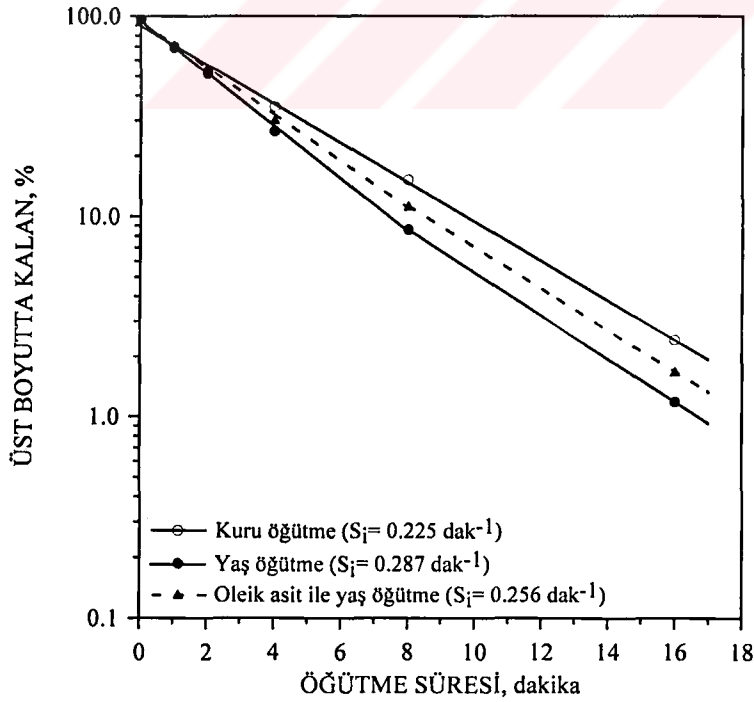
Şekil 20. -1180+850 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



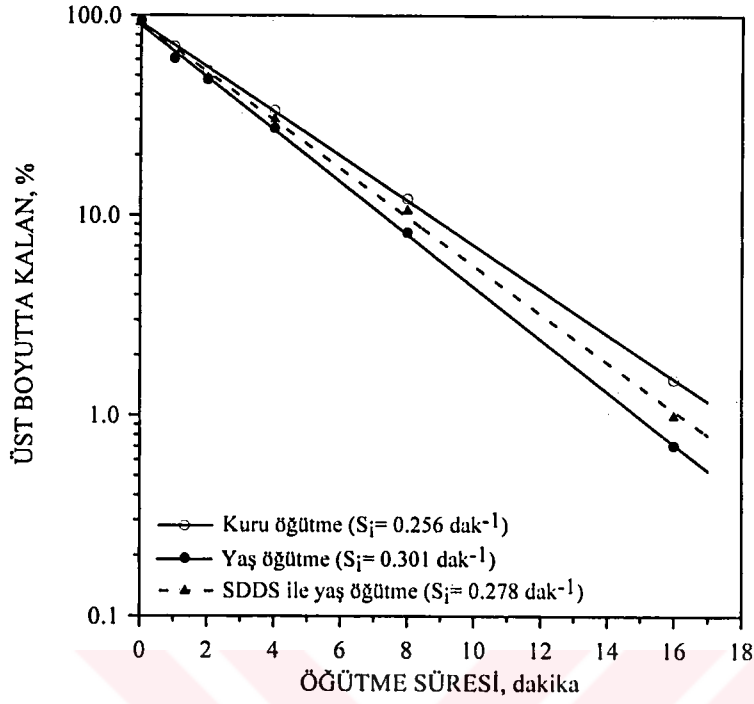
Şekil 21. -1180+850 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



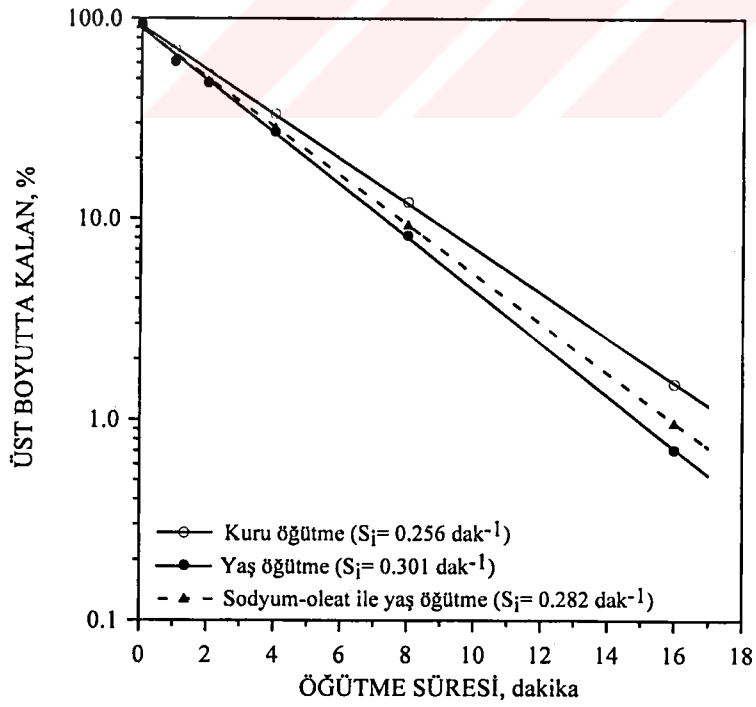
Şekil 22. -1180+850 μm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yağ ve Aero 845 ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



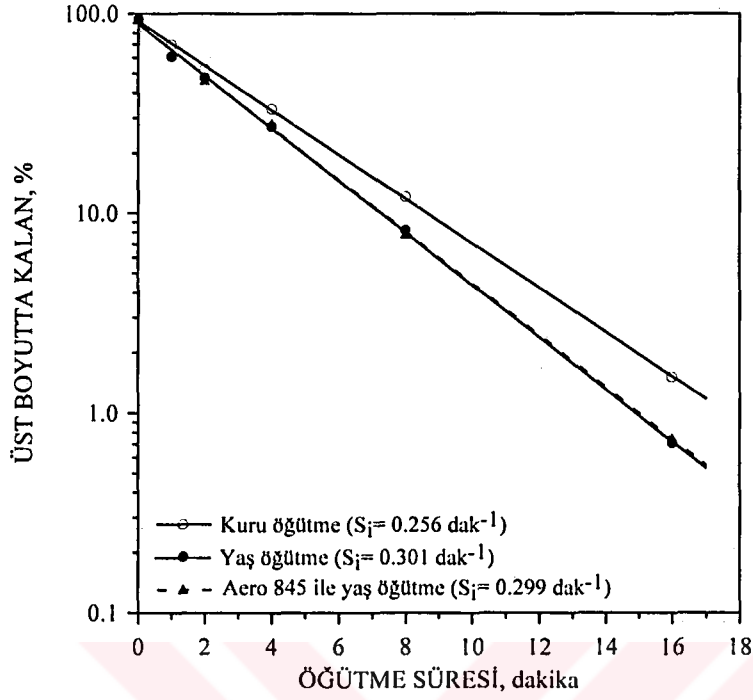
Şekil 23. -1180+850 μm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yağ ve oleik asit ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



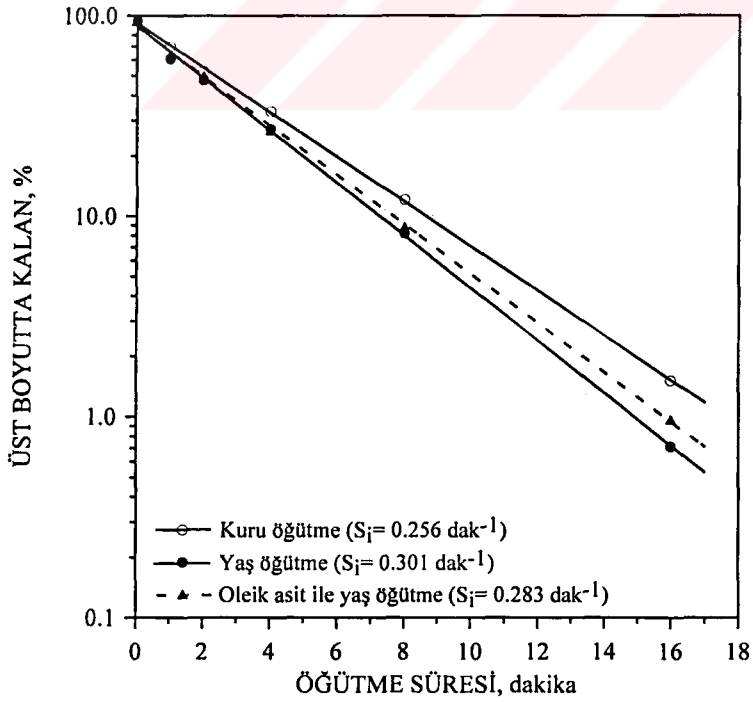
Şekil 24. -850+600 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yağ ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



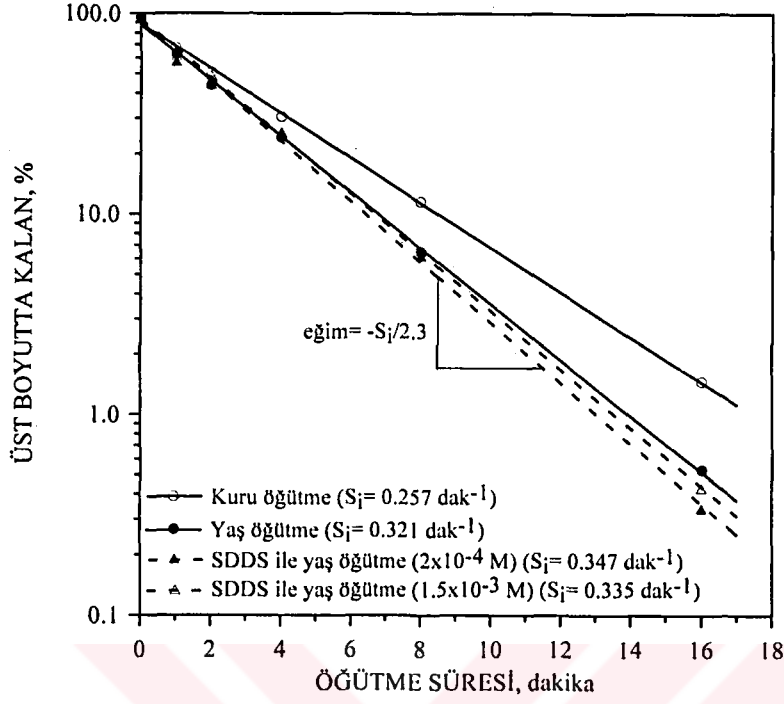
Şekil 25. -850+600 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yağ ve sodyum oleat ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



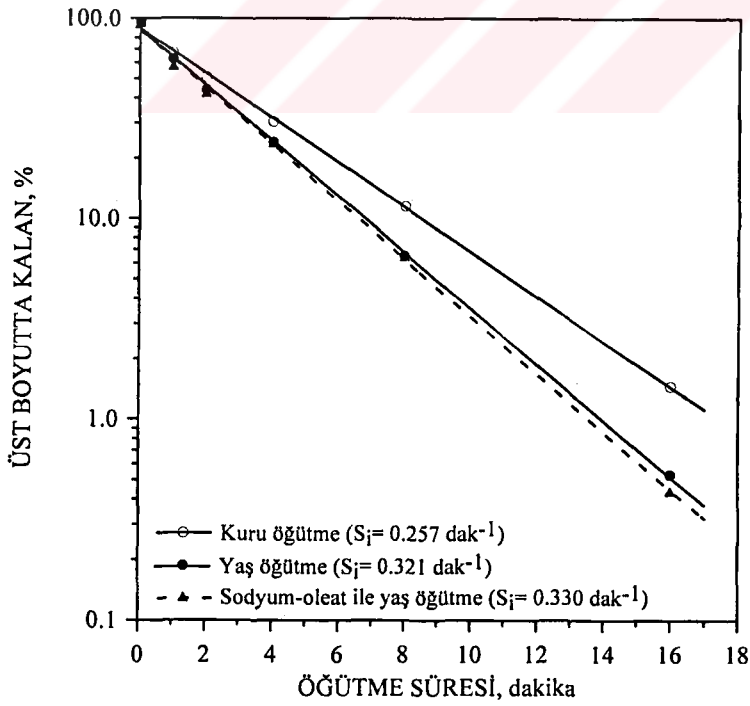
Şekil 26. -850+600 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yağ ve Aero 845 ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



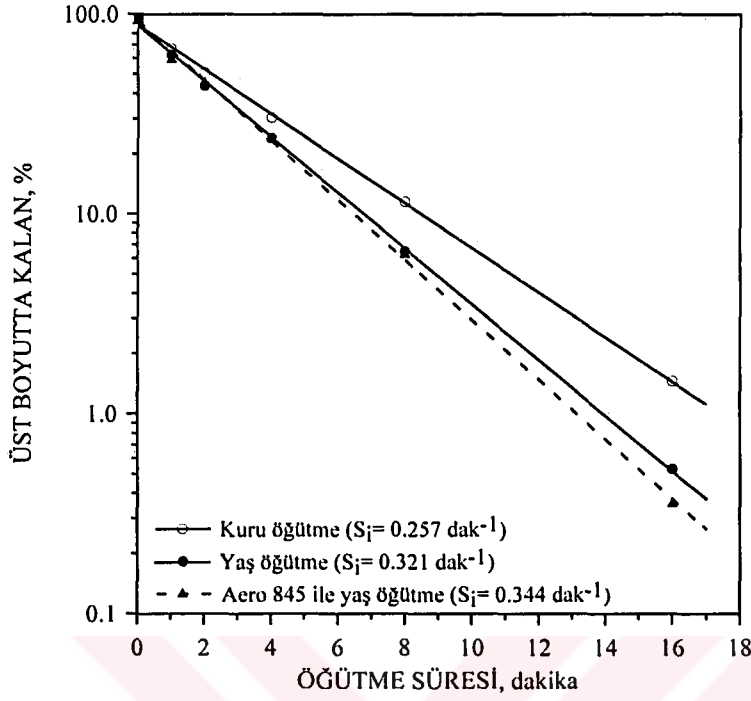
Şekil 27. -850+600 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yağ ve oleik asit ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



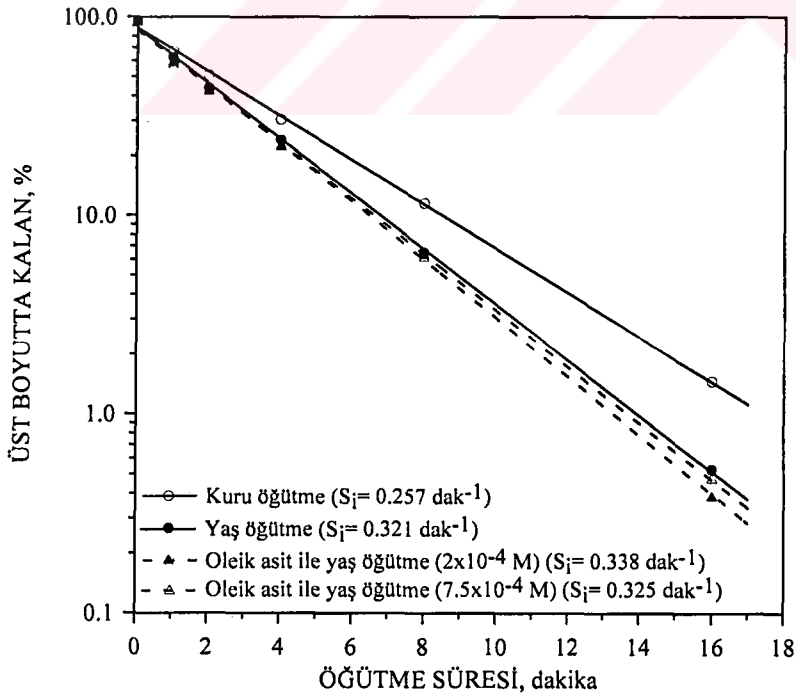
Şekil 28. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



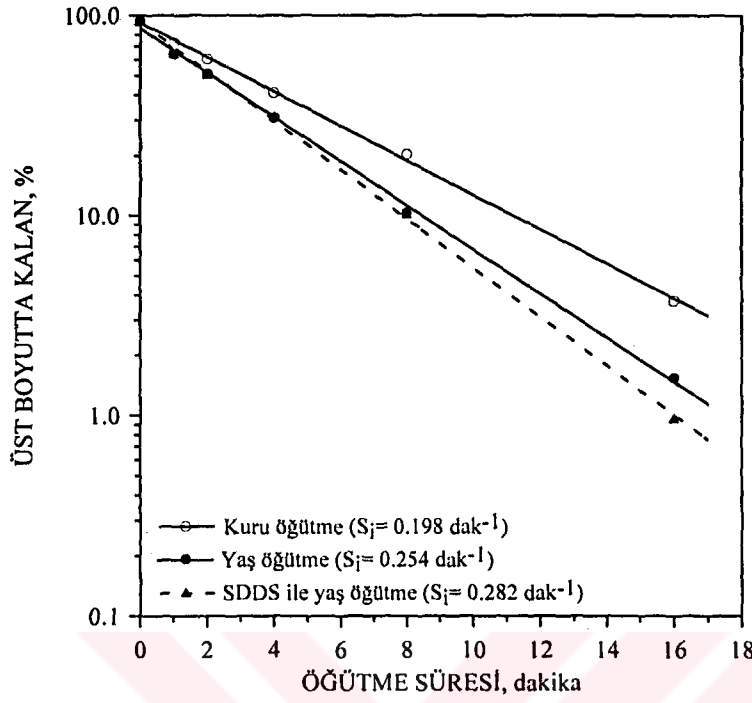
Şekil 29. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



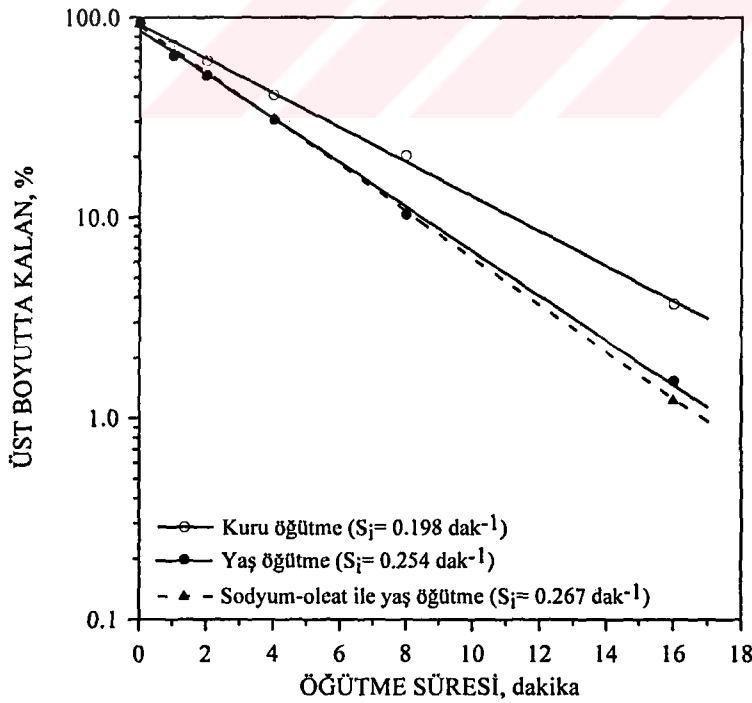
Şekil 30. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yağ ve Aero 845 ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



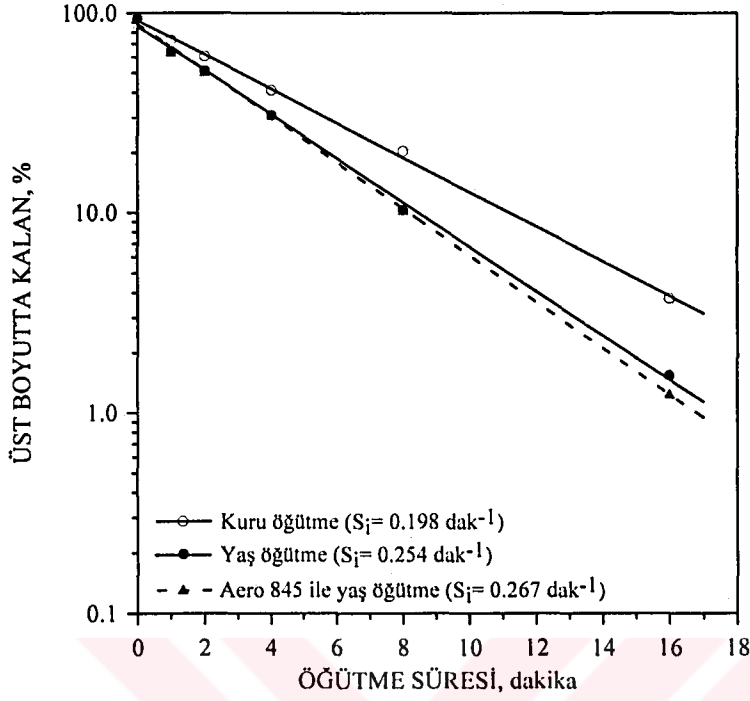
Şekil 31. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yağ ve oleik asit ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



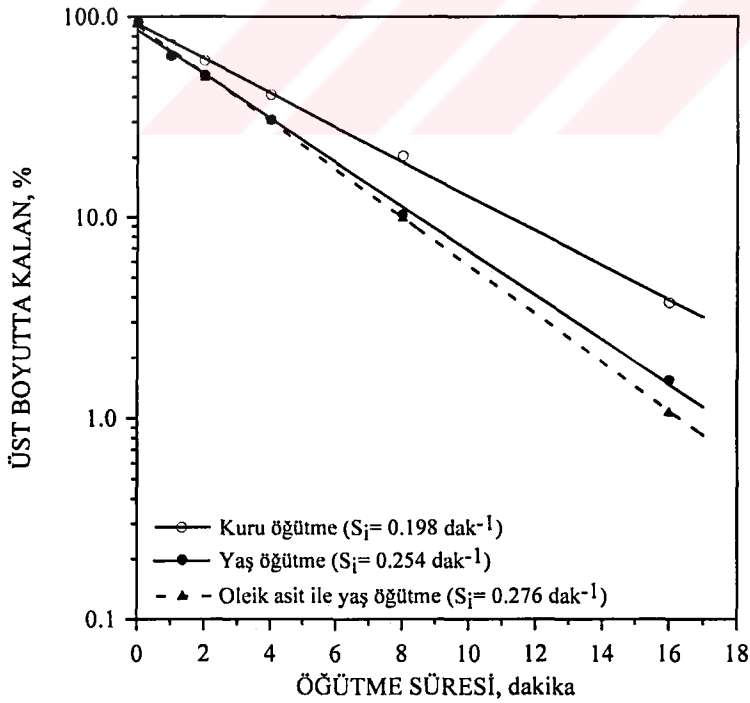
Şekil 32. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



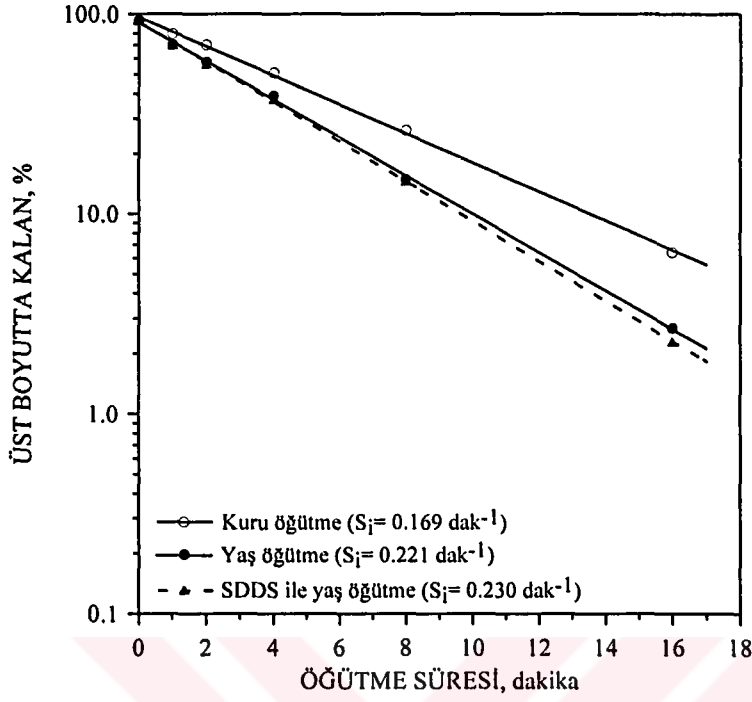
Şekil 33. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



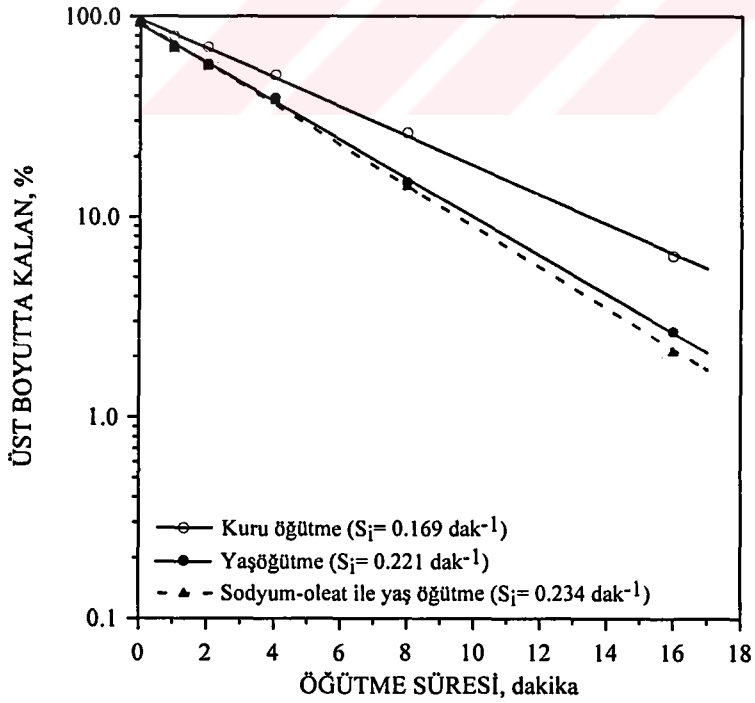
Şekil 34. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



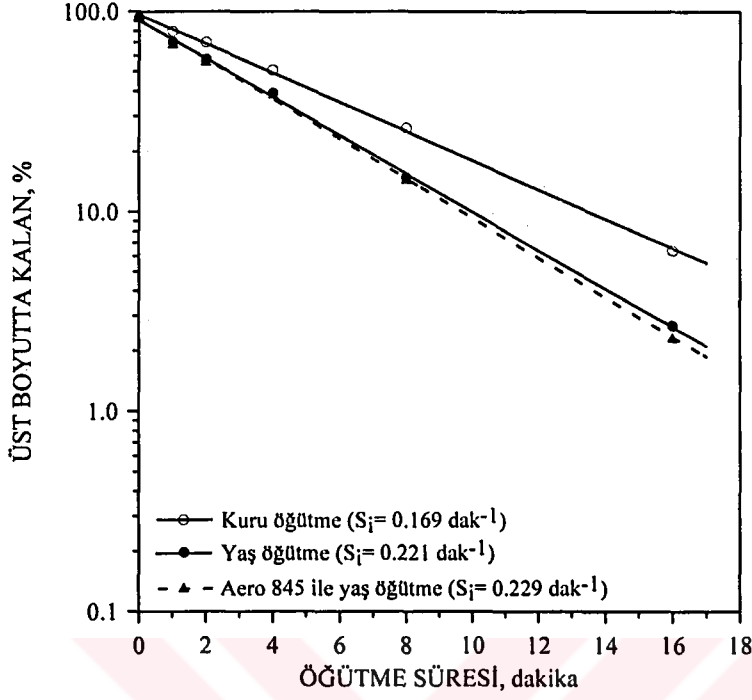
Şekil 35. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



Şekil 36. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları

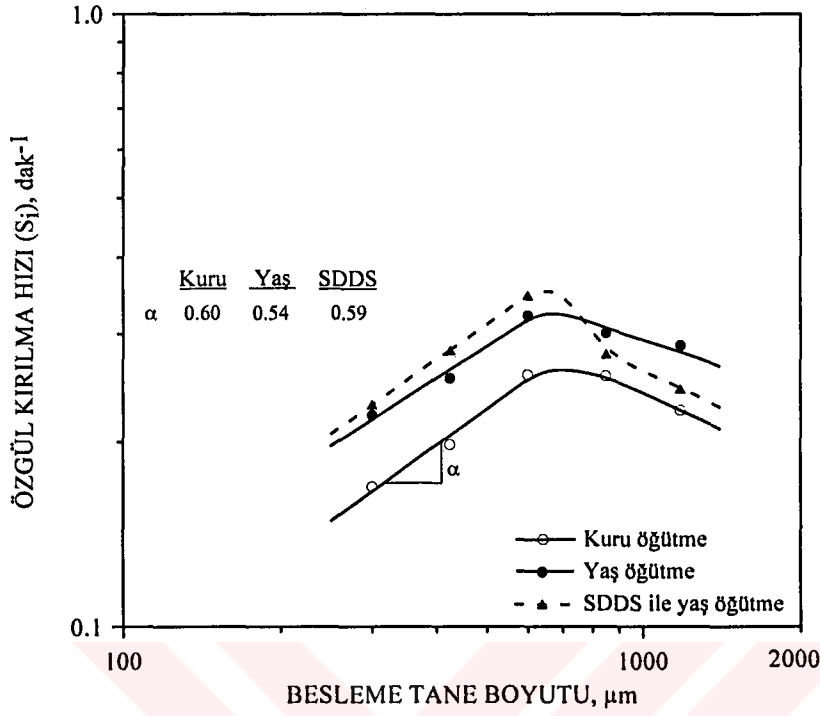


Şekil 37. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları

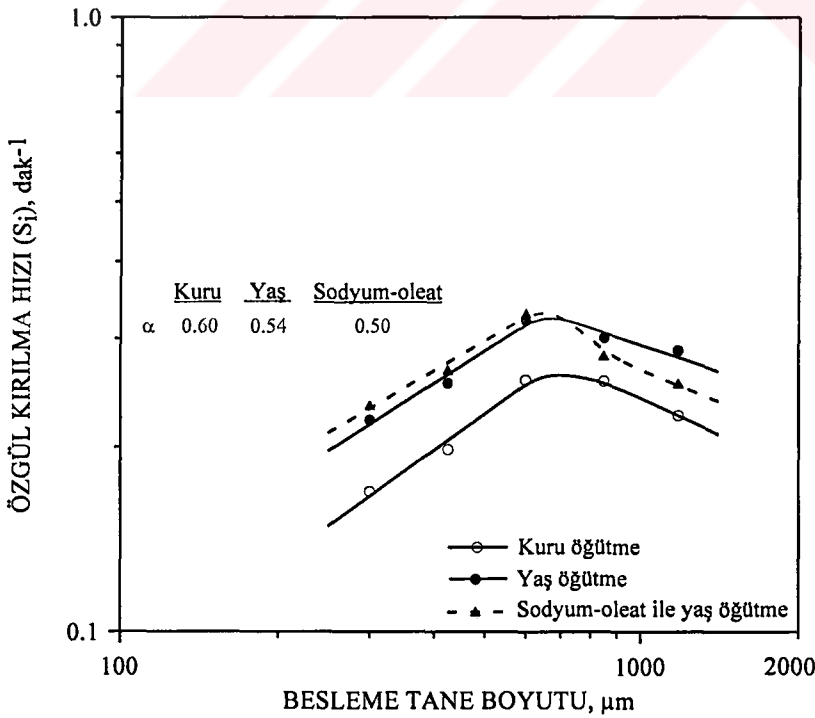


Şekil 38. -300+212 μm besleme boyutundaki kalsitin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları

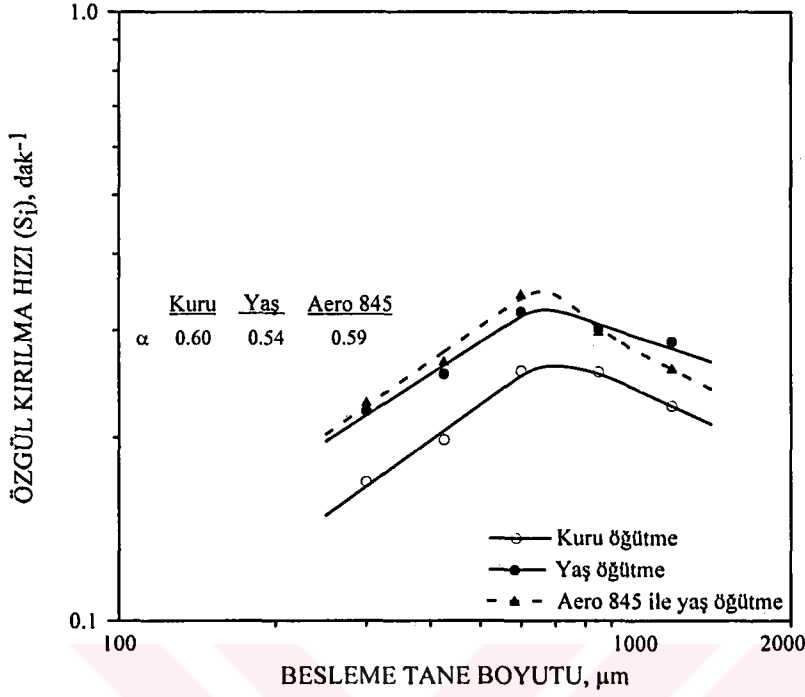
Kalsit mineralinin kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimleri Şekil 39, 40, 41 ve 42'de gösterilmiştir.



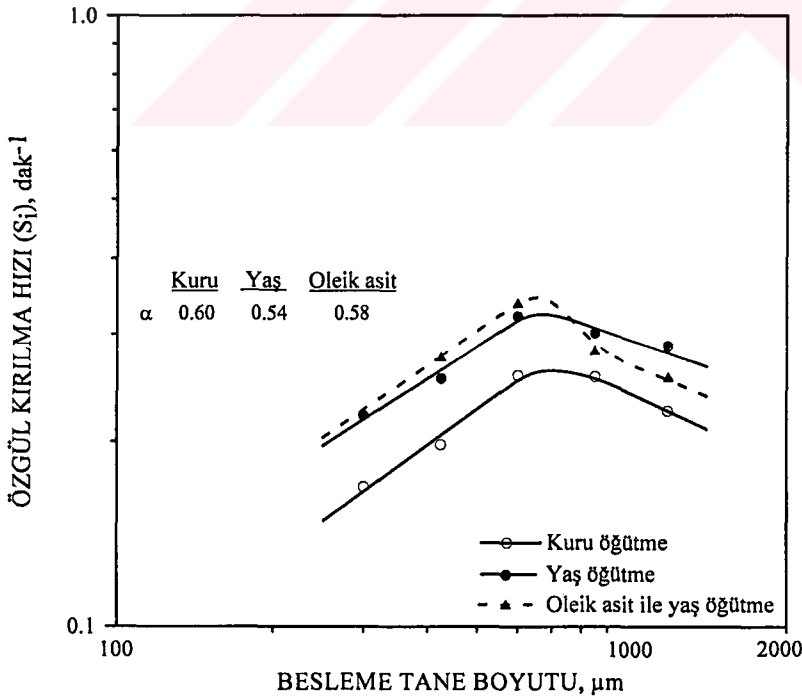
Şekil 39. Kalsit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi



Şekil 40. Kalsit mineralinin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi



Şekil 41. Kalsit mineralinin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi

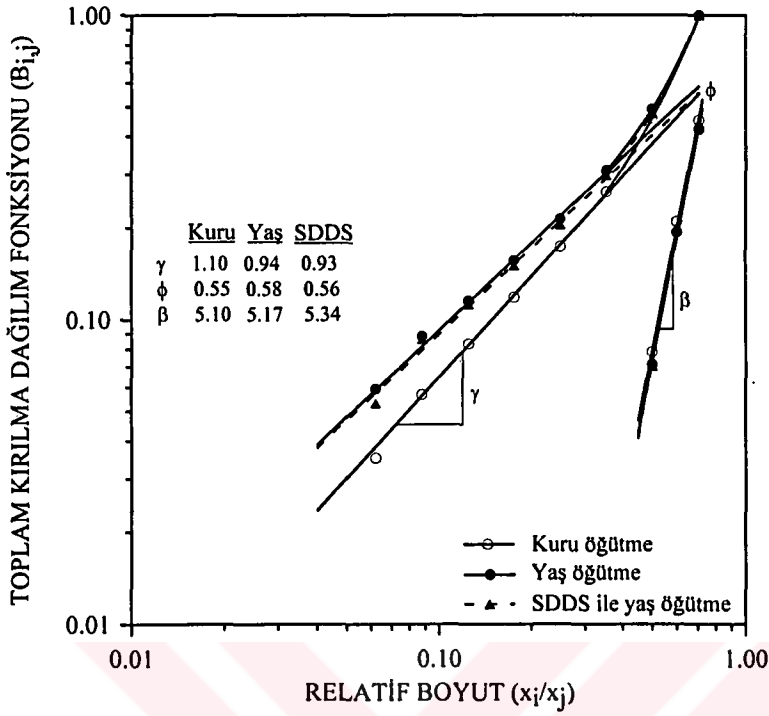


Şekil 42. Kalsit mineralinin kuru, yaş ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi

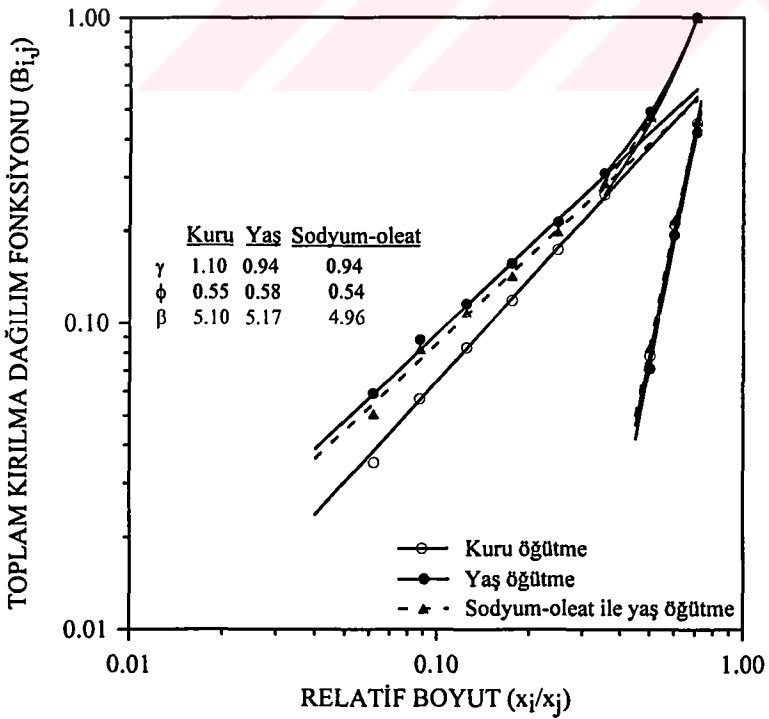
Kalsit mineralinin öğütme testleri, kullanılan porselen değirmende kırılma hızlarının 600 μm tane boyutundan daha büyük besleme boyut fraksiyonları (-1180+850 μm ve -850+600 μm besleme boyutları) için azalmaya başladığı ve birinci derece olmayan kırılma kinetiklerinin gerçekleştiğini göstermiştir (Şekil 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 ve Şekil 39, 40, 41, 42). Anormal kırılma bölgesi olarak tanımlanan bu bölgede, kırılma hızlarının yavaşlamasına rağmen -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme boyutlarının kuru öğütülmesinde üst boyutun birinci derece kırılma kinetiği izlediği tespit edilmiştir. Yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütme işlemlerinde ise -1180+850 μm besleme boyutunun 8 dakikalık öğütme süresinden sonra birinci derece olmayan kırılma kinetiği gösterdiği belirlenmiştir. -850+600 μm besleme boyutunun kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütülmesinde ise üst boyutun kırılma hızlarının yavaşlamasına rağmen, birinci derece kırılma kinetiği korunmaktadır.

Normal kırılma bölgesinde ise -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyut fraksiyonlarının kuru, yaş ve kimyasal maddelerle yaş öğütülmesinde üst boyutun kırılma hızlarının birinci derece kırılma kinetiği izlediği belirlenmiştir (Şekil 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 ve 38).

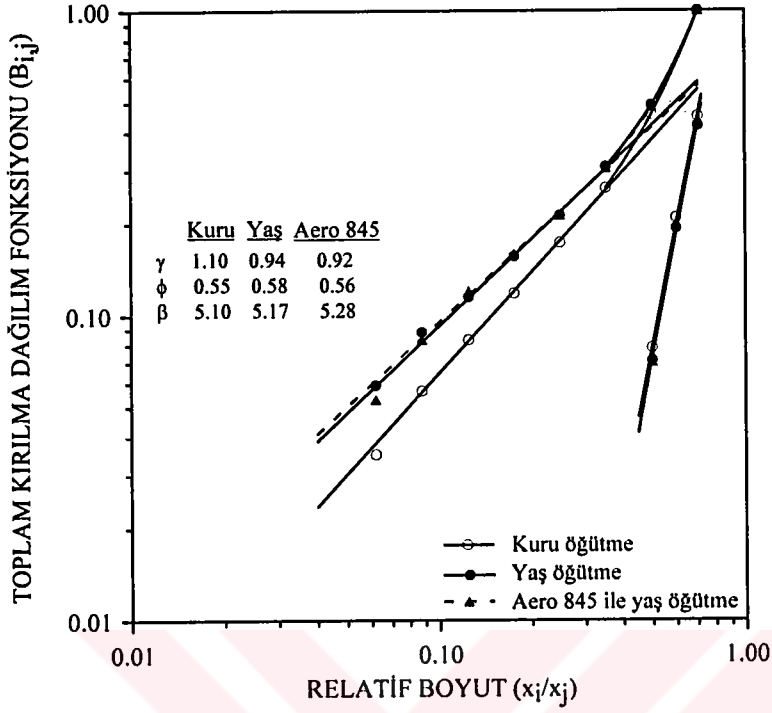
Kalsit mineralinin kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri (ortalama değerler) Şekil 43, 44, 45 ve 46'da gösterilmiştir. Toplam kırılma dağılım fonksiyonu parametreleri 1 dakikalık öğütme ürünü için BII hesaplama yöntemi (Austin ve Ark., 1984) kullanılarak belirlenmiştir. Her bir boyut grubunun kendi $B_{i,j}$ değerleri ise Tablo 8'de verilmiştir.



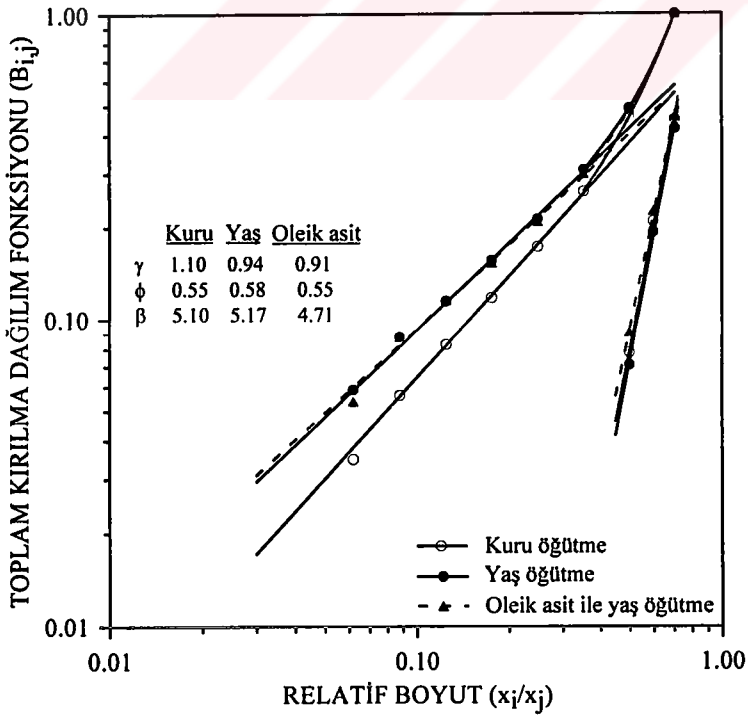
Şekil 43. Kalsit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri



Şekil 44. Kalsit mineralinin kuru, yaş ve sodyum-oleat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri



Şekil 45. Kalsit mineralinin kuru, yaş ve Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri



Şekil 46. Kalsit mineralinin kuru, yaş ve oleik asit ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri

Tablo 8. Kalsit mineralinin öğütülmesi sonucu elde edilen kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ değerleri)

Öğütme Şekli	Besleme Boyutu, μm	Kırılma Parametreleri				
		S_i , dak^{-1}	γ	ϕ	β	α / a_T , dak^{-1}
Kuru öğütme	-1180+850	0.225				0.60 / 0.270
	-850+600	0.256				
	-600+425	0.257	1.14	0.53	5.84	
	-425+300	0.198	1.01	0.56	4.38	
	-300+212	0.169	1.15	0.57	5.09	
Yaş öğütme	-1180+850	0.287				0.54 / 0.335
	-850+600	0.301				
	-600+425	0.321	0.92	0.53	5.02	
	-425+300	0.254	0.90	0.60	4.26	
	-300+212	0.221	0.99	0.60	6.24	
Sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütme (2×10^{-4} M)	-1180+850	0.244				0.59 / 0.363
	-850+600	0.278				
	-600+425	0.347	0.95	0.53	5.63	
	-425+300	0.282	0.87	0.56	4.33	
	-300+212	0.230	0.97	0.57	6.06	
Sodyum-oleat ile yaş öğütme (3.5×10^{-4} M)	-1180+850	0.254				0.50 / 0.344
	-850+600	0.282				
	-600+425	0.330	0.99	0.53	5.97	
	-425+300	0.267	0.86	0.56	4.30	
	-300+212	0.234	0.98	0.53	4.61	
Aero 845 ile yaş öğütme (55 mg/L)	-1180+850	0.260				0.59 / 0.361
	-850+600	0.299				
	-600+425	0.344	0.93	0.49	5.64	
	-425+300	0.267	0.90	0.59	4.37	
	-300+212	0.229	0.92	0.59	5.84	
Oleik asit ile yaş öğütme (2×10^{-4} M)	-1180+850	0.256				0.58 / 0.354
	-850+600	0.283				
	-600+425	0.338	0.92	0.51	5.54	
	-425+300	0.276	0.89	0.58	4.40	

Tablo 8'in değerlendirilmesinden normal kırılma bölgesinde -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları için sırasıyla yaş öğütme kuru öğütmeye oranla ($S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$) kırılma hızlarını 1.25, 1.28 ve 1.31 kat artırmıştır. Yani, yaş öğütme işlemi değirmene beslenen boyut incelidikçe daha etkin olmaktadır.

Kimyasal madde kullanılarak yapılan yaş öğütme işlemlerinde ise -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları için sırasıyla yaş öğütmeye oranla ($S_{i\text{-kimyasal}}/S_{i\text{-yaş}}$) kırılma hızlarını sodyum dodesil sülfat (SDDS) 1.08, 1.11 ve 1.04 kat; sodyum-oleat 1.03, 1.05 ve 1.06 kat; Aero 845 1.07, 1.05 ve 1.04 kat ve oleik asit 1.05 ve 1.09 kat artırmıştır. Buna göre, kalsitin öğütülmesinde kullanılan öğütmeye yardımcı kimyasal maddelerden en yüksek kırılma hızları sodyum dodesil sülfat (SDDS) kullanılarak elde edilmiştir.

Anormal kırılma bölgesinde ise yaş öğütme kuru öğütmeye oranla ($S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$) kırılma hızlarını -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme tane boyutları için sırasıyla 1.28 ve 1.18 kat artırmıştır.

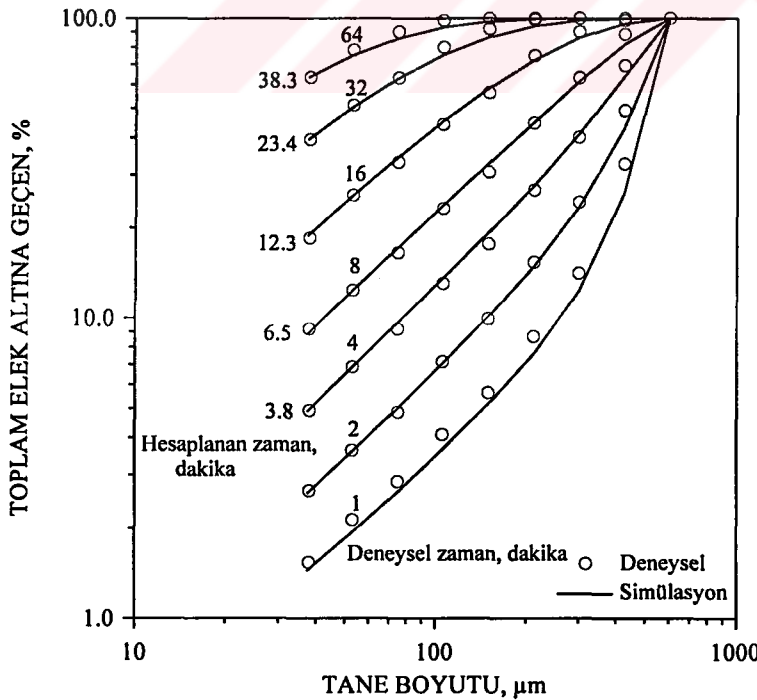
Anormal kırılma bölgesinde kullanılan kimyasal maddeler ise kalsitin özgül kırılma hızlarını yavaşlatmaktadır. -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme boyutları için bu yavaşlama oranı ($S_{i\text{-kimyasal}}/S_{i\text{-yaş}}$) sırasıyla sodyum dodesil sülfat için 0.85 ve 0.92; sodyum-oleat için 0.89 ve 0.94; Aero 845 için 0.91 ve 0.99 ve oleik asit için ise 0.89 ve 0.94 olarak bulunmuştur. Bu değerler dikkate alındığında, kimyasal maddelerin olumsuz etkileri anormal kırılma bölgesinden normal kırılma bölgesine yaklaşıldıkça azalarak normal kırılma bölgesinde 1'den büyük bir değer almaktadır.

Toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri ise kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütme için birbirine yakın bulunmuştur (Şekil 43, 44, 45 ve 46). Ancak, yine de küçük farklılıklar gözlenmiştir. Ürün tane boyut dağılımının inceliğini ifade eden γ değeri, en yüksek kuru öğütme için ($\gamma_{\text{ort.}}=1.10$) bulunmuştur (Şekil 43). Bu değer kuru öğütme işlemi ile elde edilen ürün boyutunda, daha kaba boyutların bulunduğunu ifade etmektedir.

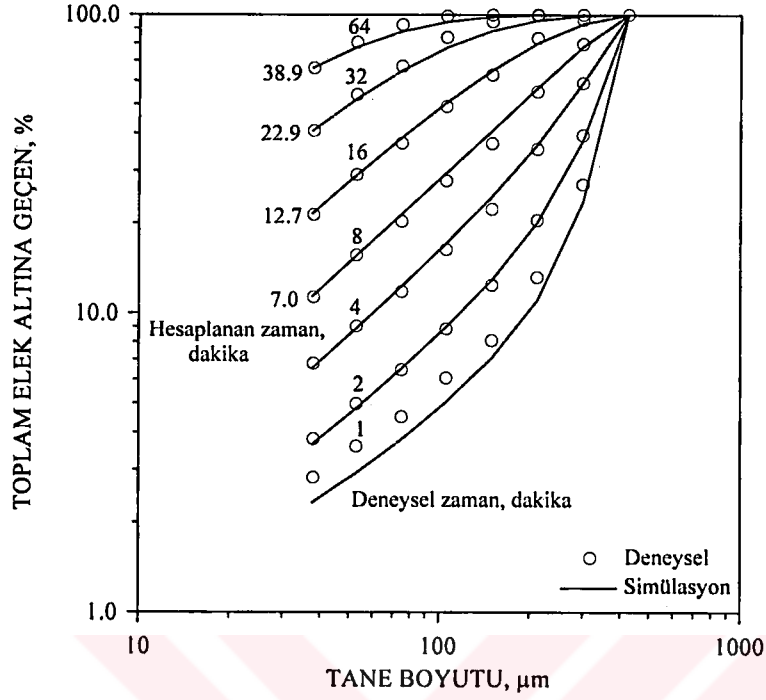
3.1.1.2. Ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu

Kalsit minerali için elde edilen karakteristik kırılma parametreleri (a_T , α , γ , ϕ ve β) (Tablo 8) kullanılarak (her öğütme tipi için ortalama $B_{i,j}$ değerleri), laboratuvar ölçekli kullanılan bu öğütme işleminin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile deneysel olarak tespit edilen tane boyut dağılımları karşılaştırmalı olarak kuru öğütme için Şekil 47, 48 ve 49, yaş öğütme için Şekil 50, 51 ve 52, sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütme için Şekil 53, 54 ve 55, sodyum-oleat ile yaş öğütme için Şekil 56, 57 ve 58, Aero 845 ile yaş öğütme için Şekil 59, 60 ve 61 ve oleik asit ile yaş öğütme için ise Şekil 62 ve 63'de gösterilmiştir.

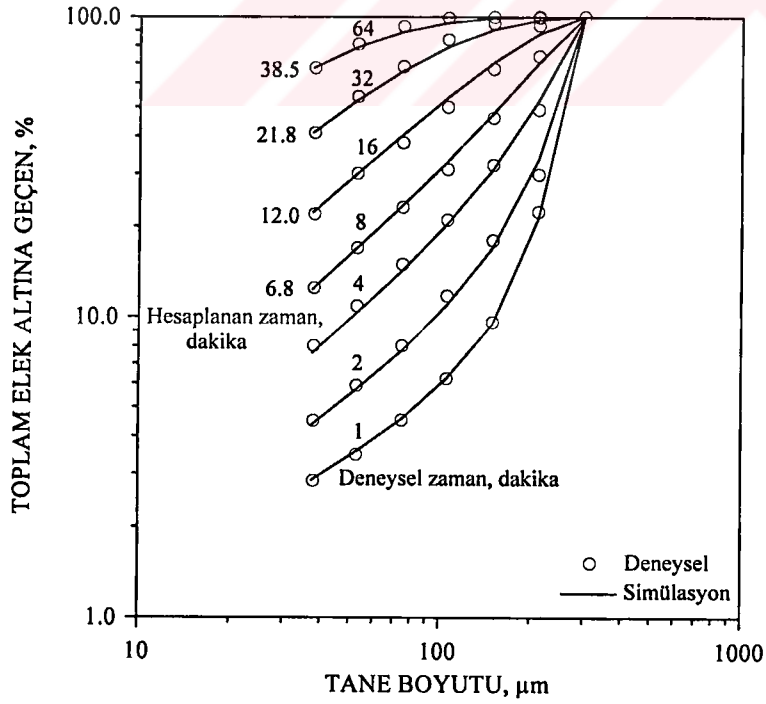
Kalsit mineralinin kuru ve yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları sırasıyla Ek 2.A ve Ek 2.B'de; sodyum dodesil sülfat, sodyum-oleat, Aero 845 ve oleik asit ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları ise sırasıyla Ek 2.C, Ek 2.D, Ek 2.E ve Ek 2.F'de verilmiştir.



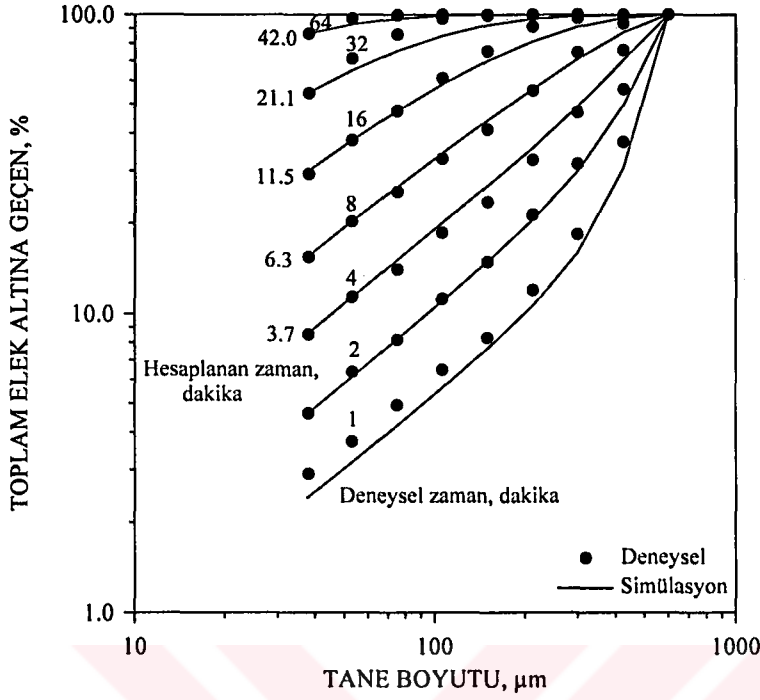
Şekil 47. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



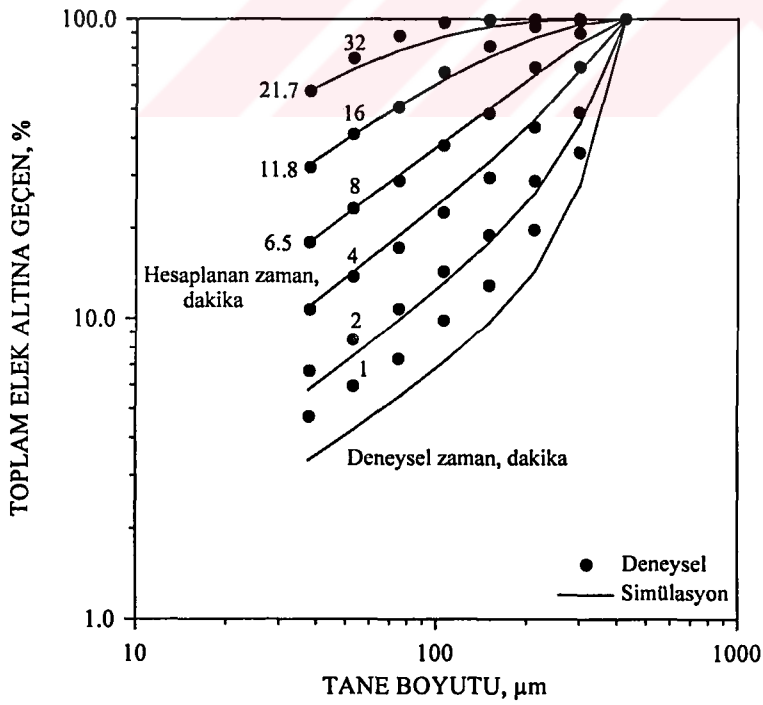
Şekil 48. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



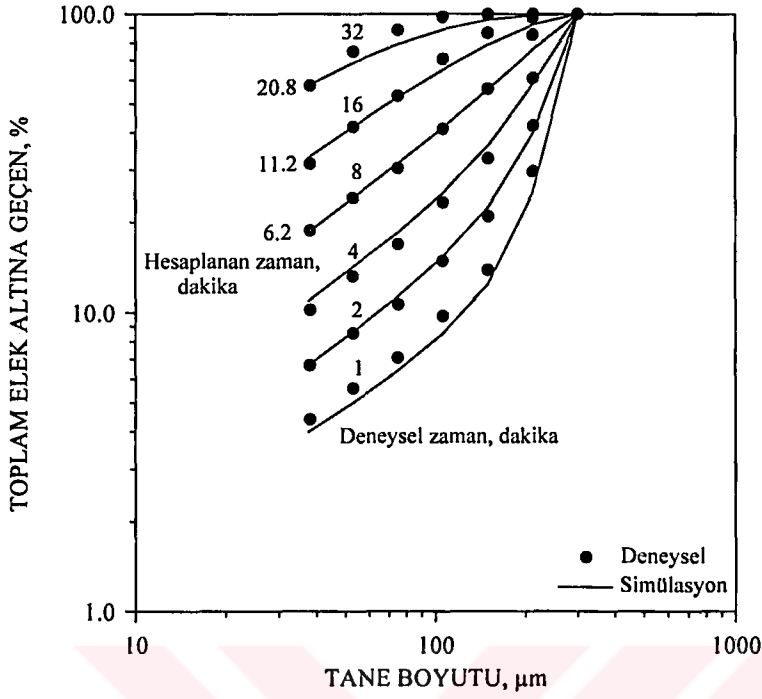
Şekil 49. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



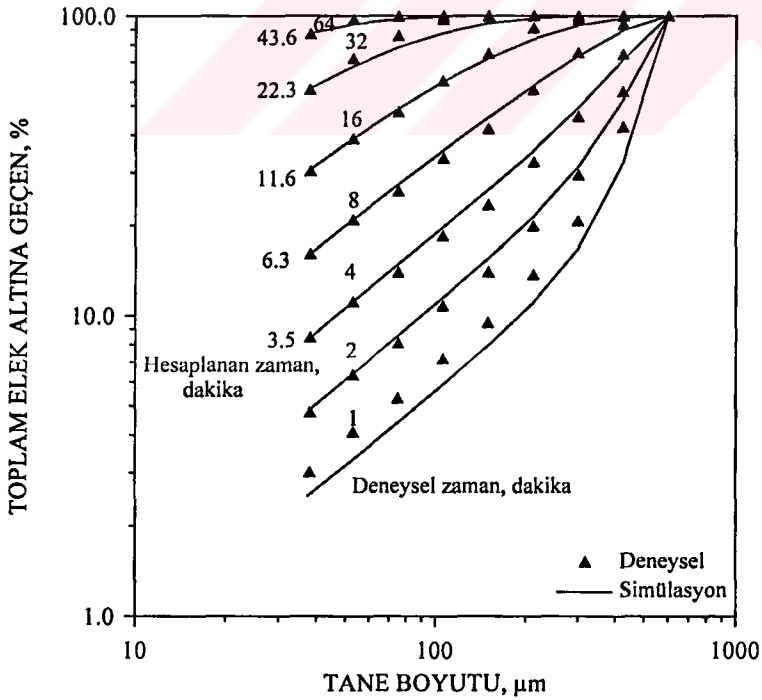
Şekil 50. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



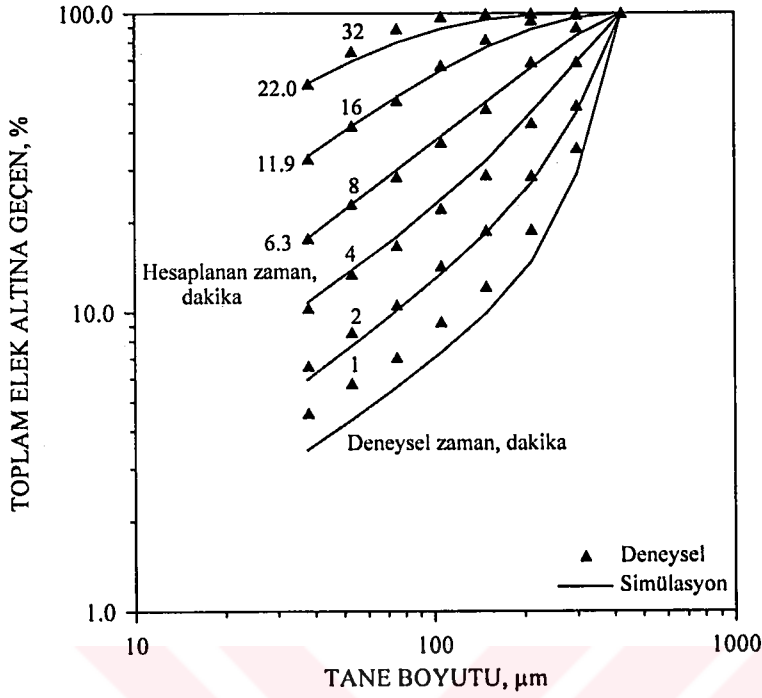
Şekil 51. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



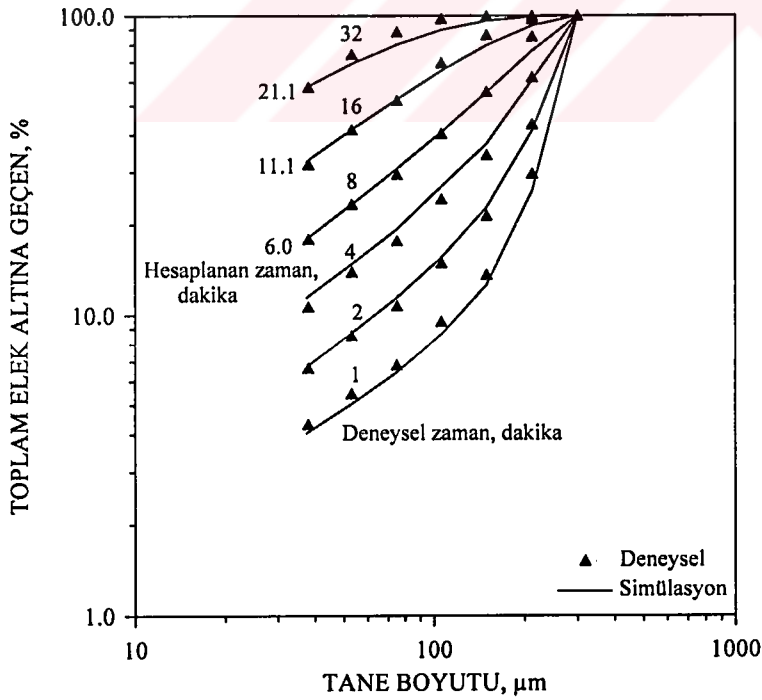
Şekil 52. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



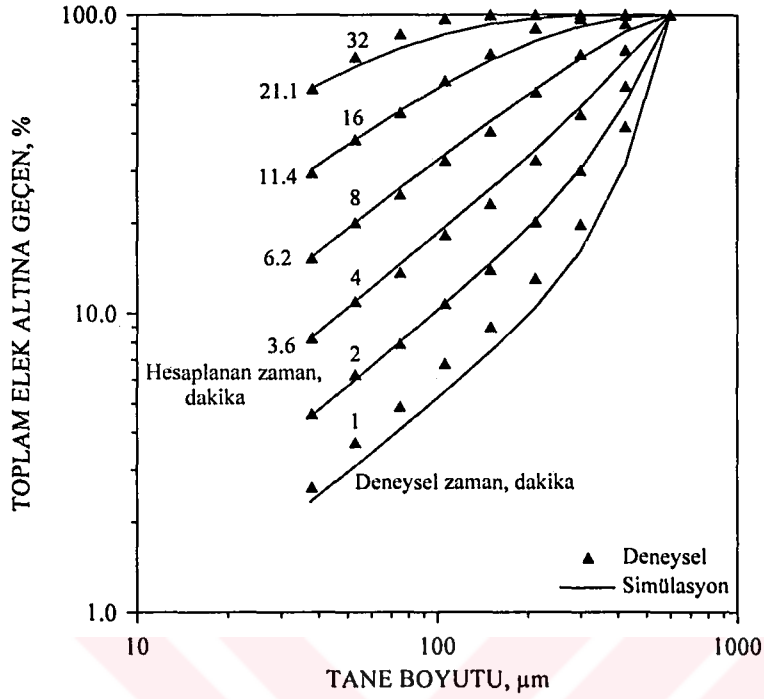
Şekil 53. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



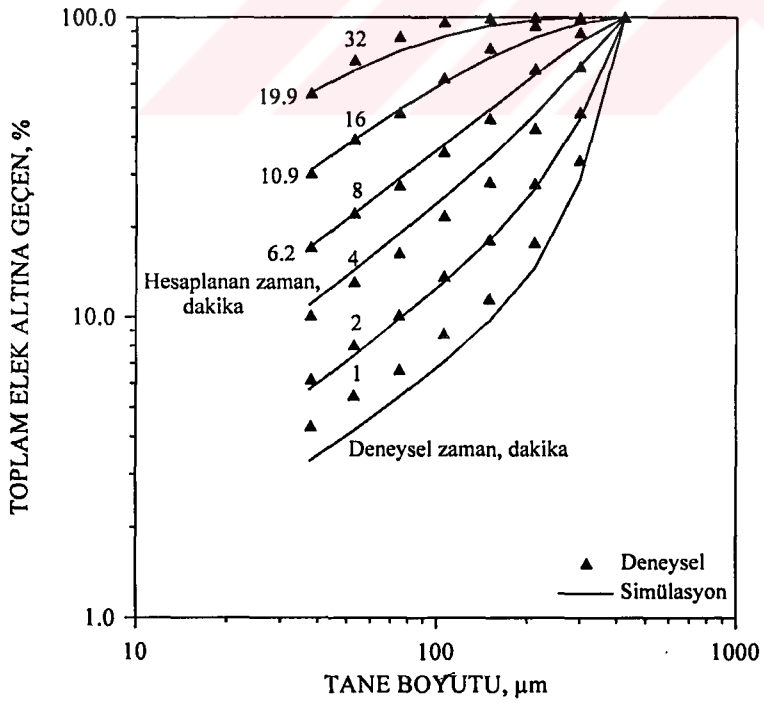
Şekil 54. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



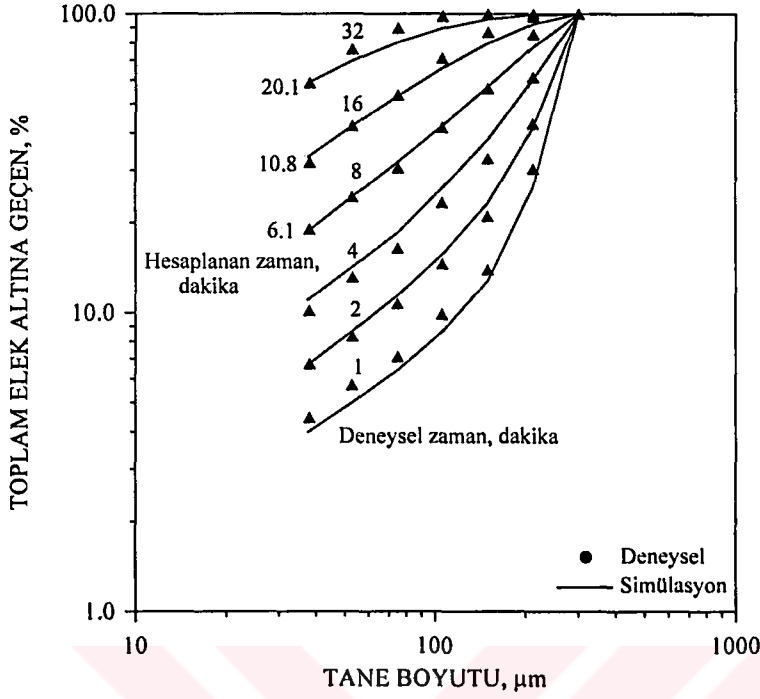
Şekil 55. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



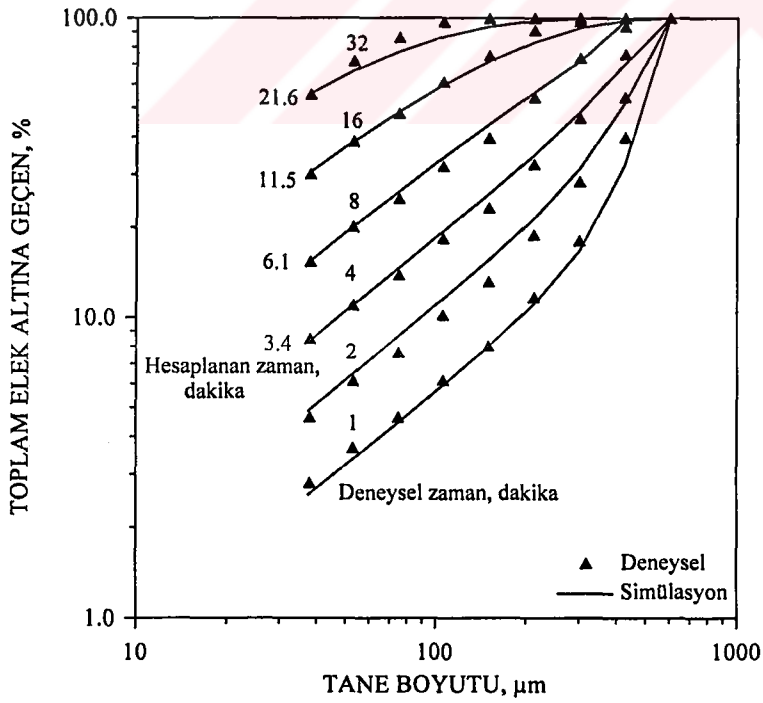
Şekil 56. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum-oleat ile yağ öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



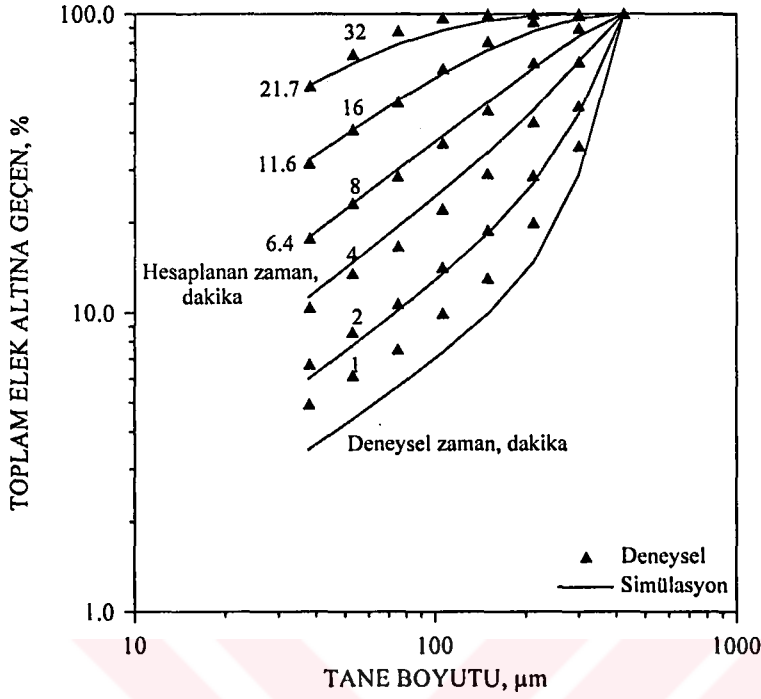
Şekil 57. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum-oleat ile yağ öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



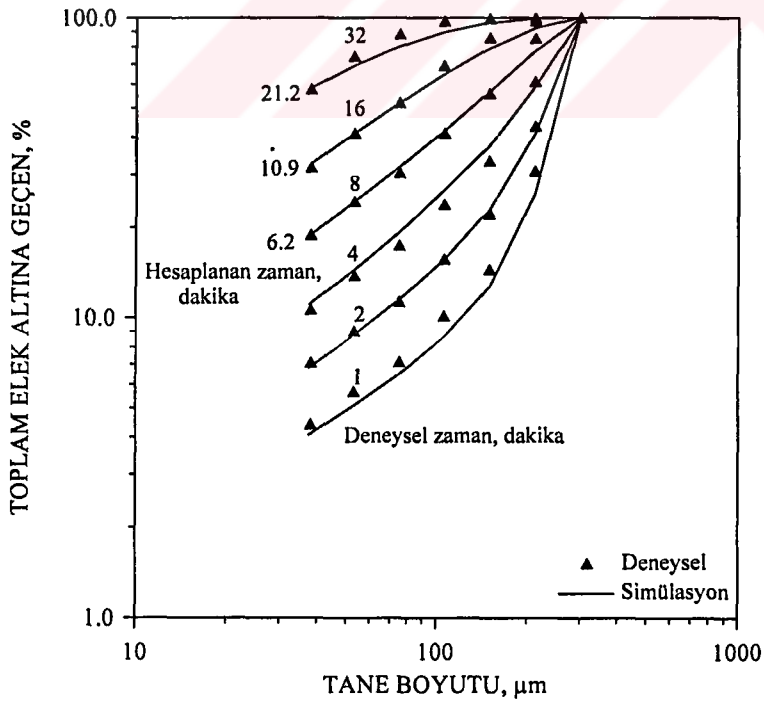
Şekil 58. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin sodyum-oleat ile yağ öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



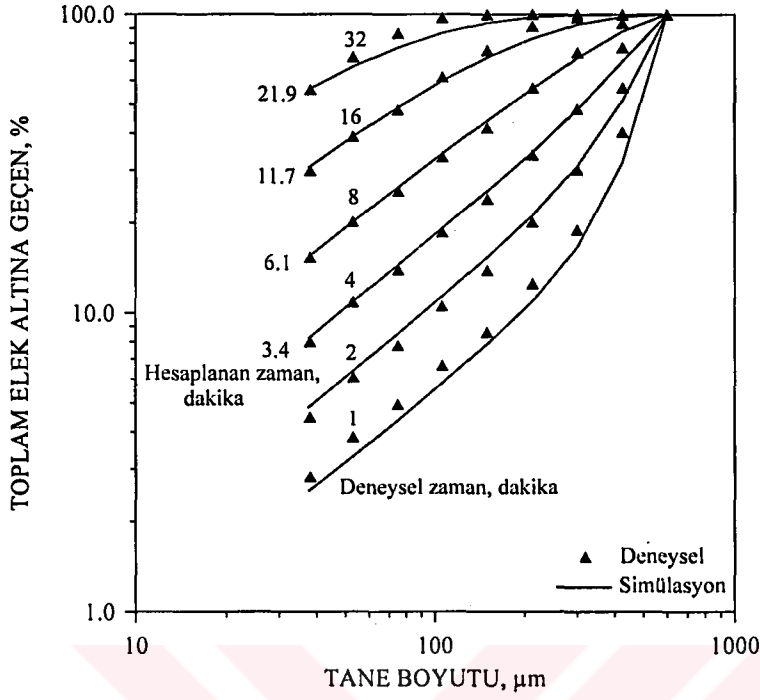
Şekil 59. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin Aero 845 ile yağ öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



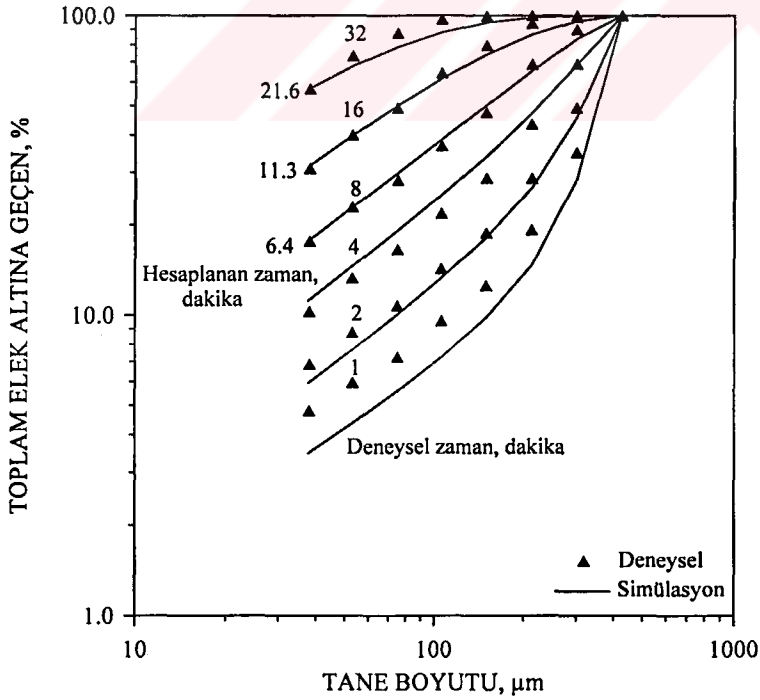
Şekil 60. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



Şekil 61. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin Aero 845 ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



Şekil 62. -600+425 µm besleme boyutundaki kalsitin oleik asit ile yağ öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu

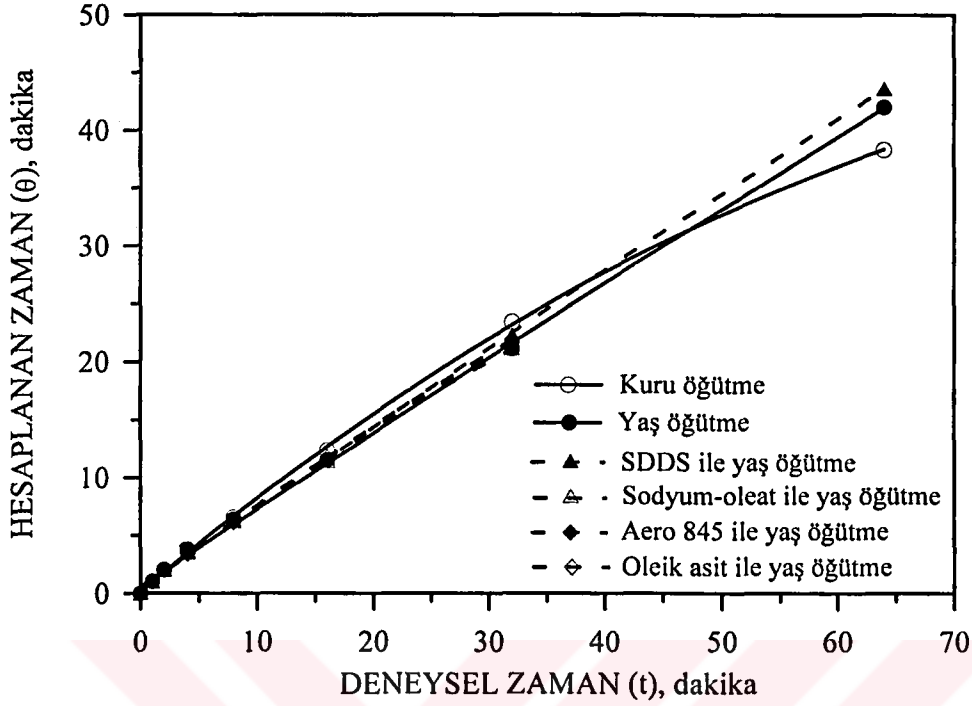


Şekil 63. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin oleik asit ile yağ öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu

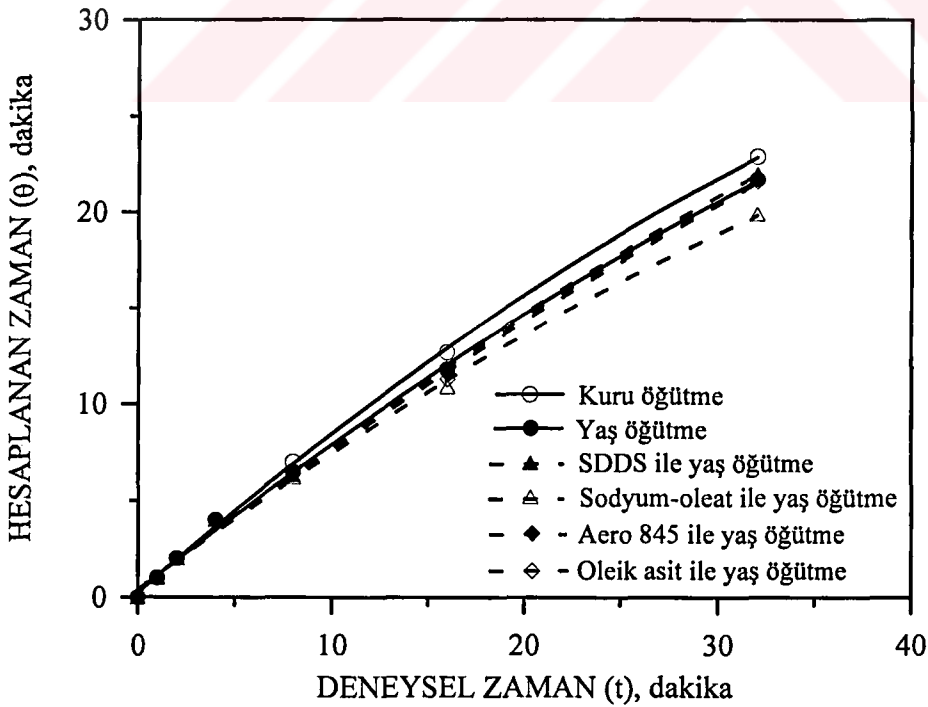
Simülasyonla elde edilen verilerin analizi sonucu; -600+425 μm besleme boyutunun kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütülmesinde 4 dakikalık öğütme süresinden itibaren, -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutlarının kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütülmesinde ise 8 dakikalık öğütme süresinden itibaren öğütmede yavaşlama etkisinin (*slowing-down effect*) başladığı belirlenmiştir (Şekil 47'den 63'e kadar).

Belirtilen bu öğütme sürelerine kadar deneysel olarak belirlenen ürün tane boyut dağılımları ile simülasyon değerlerinin birbirine yakın ve uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak, belirtilen bu öğütme sürelerinden sonra simülasyon ile belirlenen değerler, deneysel olarak belirlenen değerlerden daha ince ürün tane boyut dağılımları vermektedir. Bu sonuç, simülasyon programının bütün öğütme süreleri için tüm tane boyutlarının kırılma hızını birinci derece olarak kabul etmesindedir. Bu farkı gidermek için 4, 8 ve 16 dakikalık öğütme süreleri için 53 μm tane boyutunda, 32 ve 64 dakikalık öğütme süresi için ise 38 μm tane boyutunda, bir boyutta elde edilecek % toplam elek altı miktarı programdan istenecek şekilde "one point fit" yaklaşımı kullanılarak simülatör ile belirlenen değer, deneysel olarak belirlenen değere programda eşlenmiştir. Bu yaklaşım ile bulunan hesaplanan zaman (θ) ile deneysel zaman (t) arasındaki ilişki -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları için sırasıyla Şekil 64, 65 ve 66'da verilmiştir. Simülatör ile hesaplanan zaman, deneysel zamandan daima küçük bulunmaktadır ($\theta \leq t$). Hesaplanan değer deneysel zamana yakınlığının artması öğütme işleminde yavaşlama etkisinin az olması anlamına gelir.

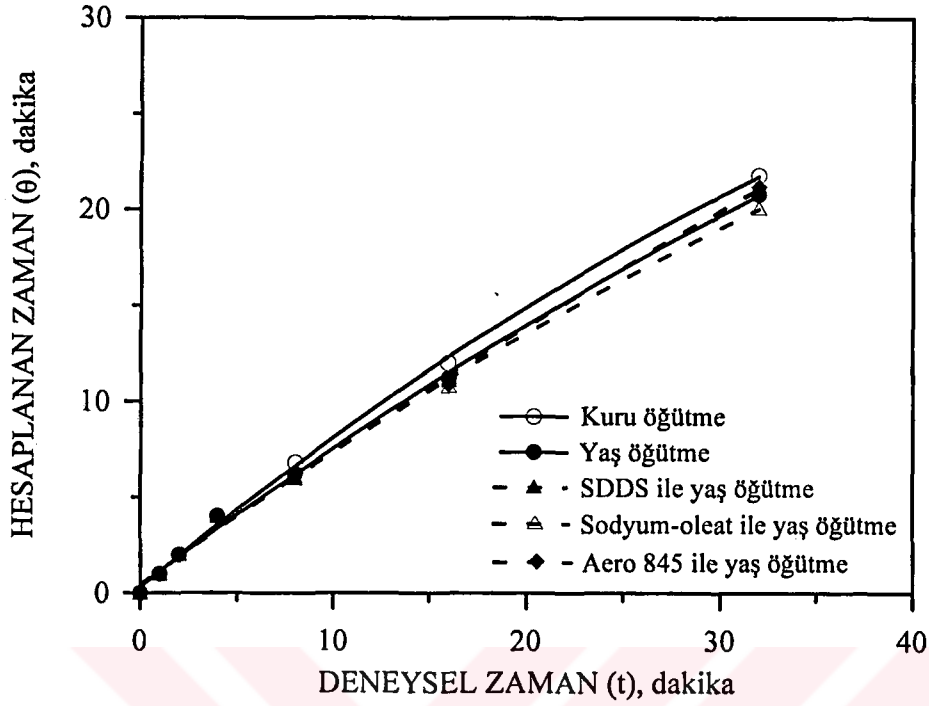
Yavaşlama faktörünün (κ) deneysel zaman ile değişimi ise -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları için sırasıyla Şekil 67, 68 ve 69'da verilmiştir. Söz konusu şekillerde görüldüğü gibi öğütme süresi arttıkça κ değeri azalmaktadır, yani öğütme işlemi ilerledikçe yavaşlama etkisi artmaktadır.



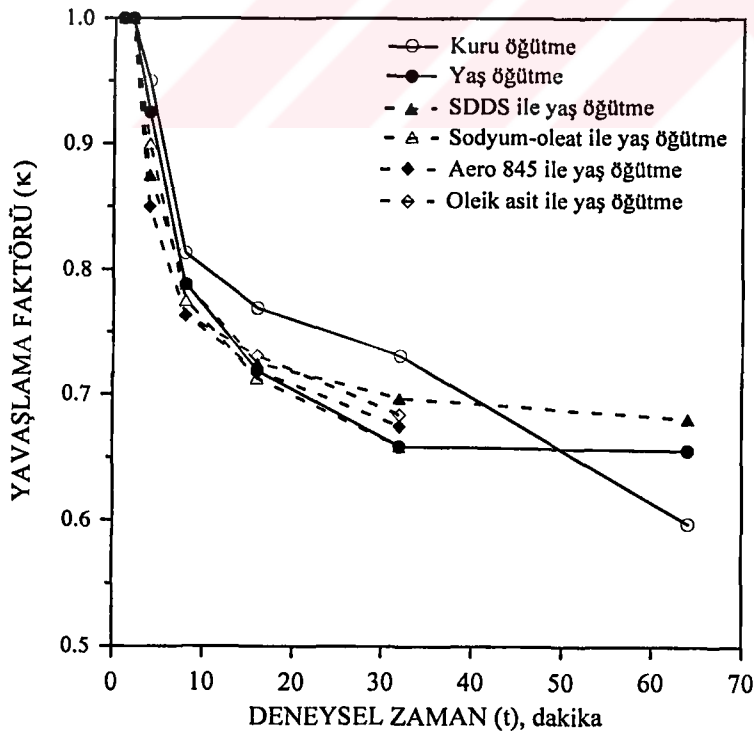
Şekil 64. -600+425 μm besleme boyutundaki kalsit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki



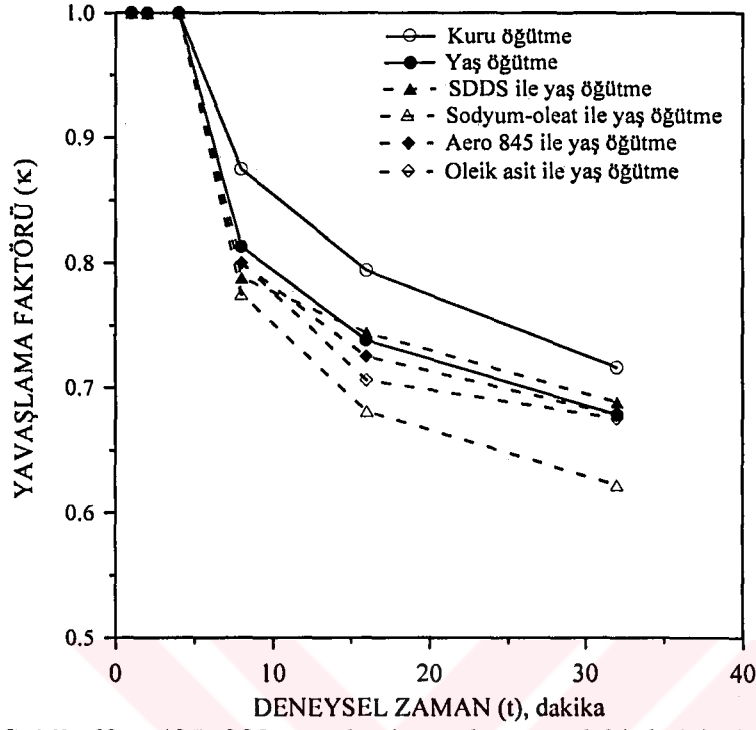
Şekil 65. -425+300 μm besleme boyutundaki kalsit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki



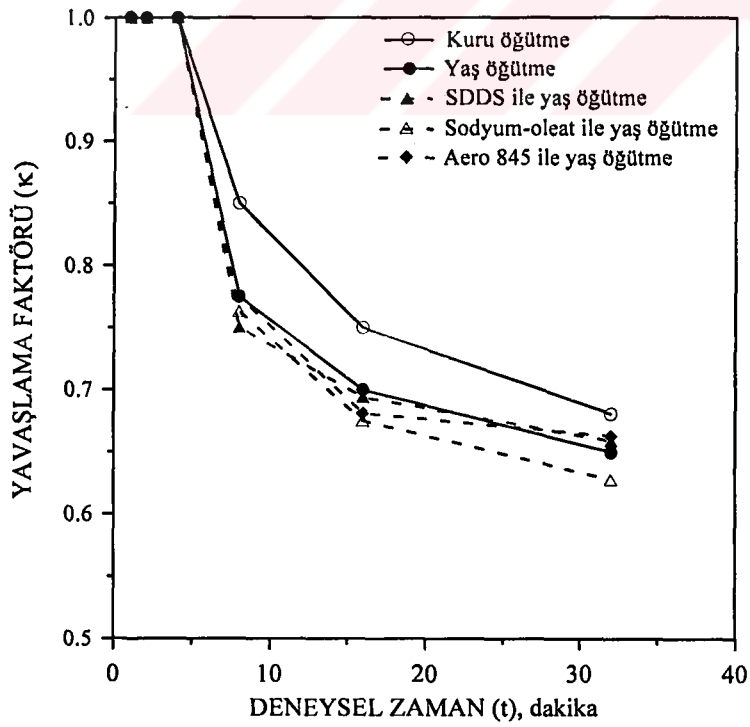
Şekil 66. -300+212 μm besleme boyutundaki kalsit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki



Şekil 67. -600+425 μm besleme boyutundaki kalsit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi



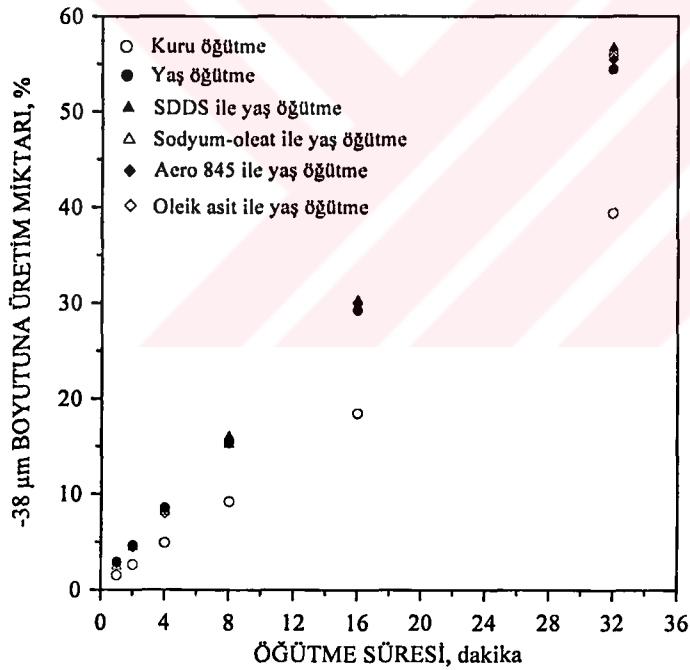
Şekil 68. -425+300 μm besleme boyutundaki kalsit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi



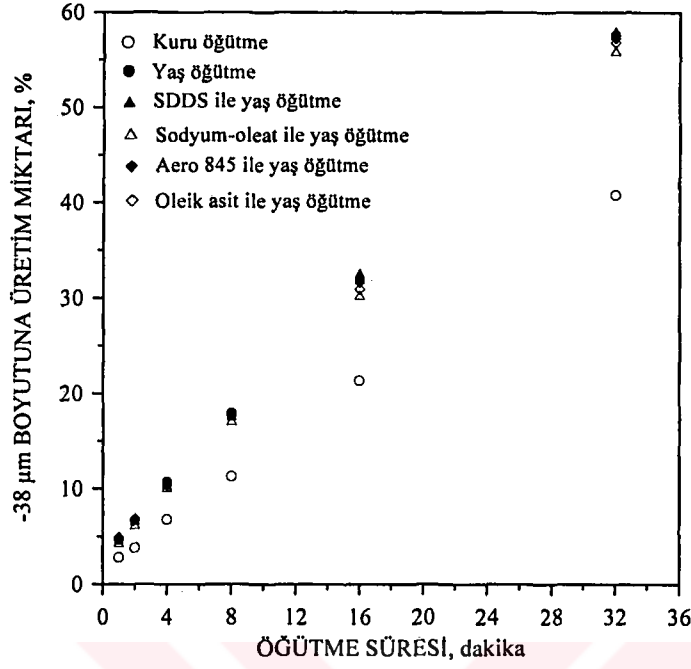
Şekil 69. -300+212 μm besleme boyutundaki kalsit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi

-600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutu kalsitin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve kimyasal maddeler (sodyum dodesil sülfat, sodyum-oleat, Aero 845 ve oleik asit) ile yaş öğütülmesi sonucu -38 μm tane boyutuna geçen miktarlar sırasıyla Şekil 70, 71 ve 72’de verilmiştir.

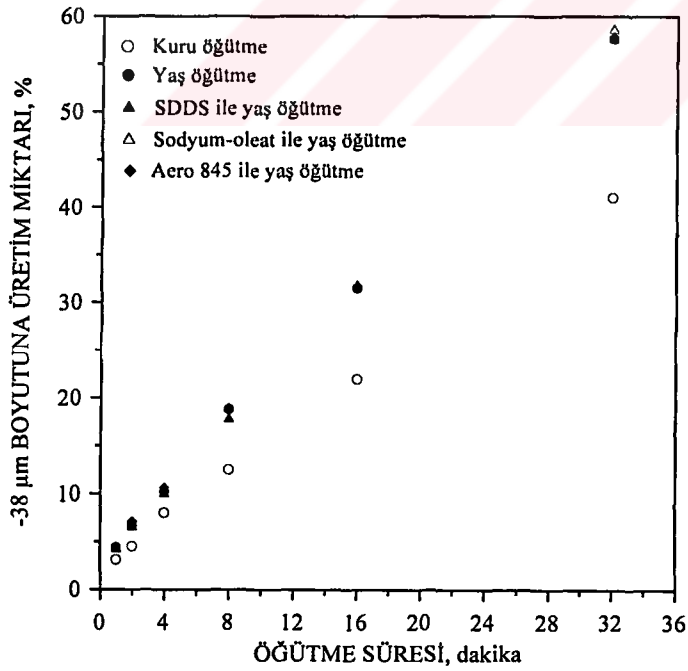
Söz konusu şekillerde görüldüğü gibi kalsitin yaş öğütülmesi ile kuru öğütmeye göre -38 μm boyutuna geçen malzeme miktarı daha fazladır. Sodyum dodesil sülfat (SDDS) ilavesi ile yapılan yaş öğütme işleminde ise yaş öğütmeye oranla kırılma hızlarının artmasına paralel olarak, -38 μm tane boyutuna geçen malzeme miktarı da diğer kimyasal maddeler ile karşılaştırıldığında nispeten daha yüksektir.



Şekil 70. -600+425 μm besleme boyutundaki kalsitin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve kimyasal maddeler (SDDS, sodyum-oleat, Aero 845 ve oleik asit) ile yaş öğütülmesi sonucu -38 μm boyutuna geçen üretim miktarları



Şekil 71. -425+300 µm besleme boyutundaki kalsitin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve kimyasal maddeler (SDDS, sodyum-oleat, Aero 845 ve oleik asit) ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları



Şekil 72. -300+212 µm besleme boyutundaki kalsitin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve kimyasal maddeler (SDDS, sodyum-oleat, Aero 845 ve oleik asit) ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları

3.1.2. Barit

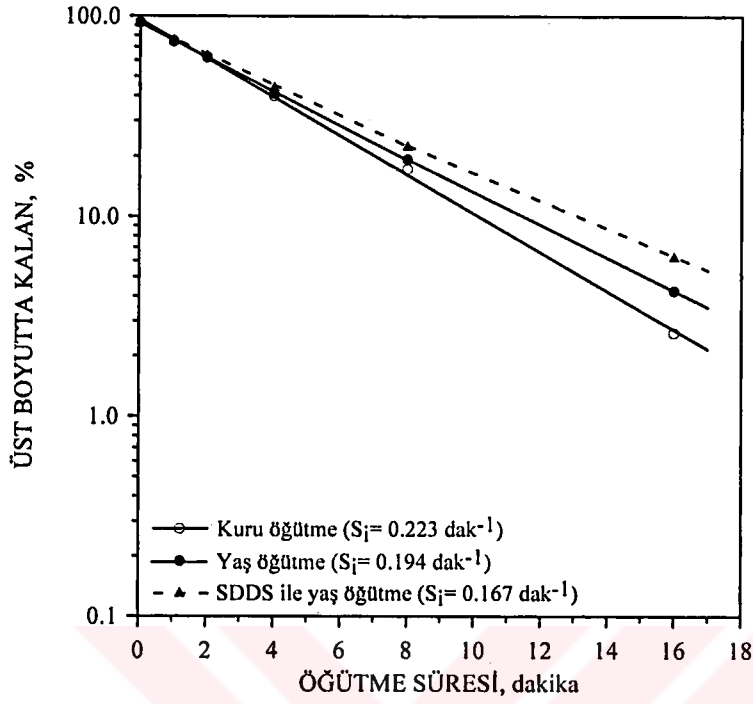
3.1.2.1. Özgül kırılma hızları (S_i) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametrelerinin belirlenmesi

Barit minerali için yapılan öğütme testleri kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme olmak üzere üç şekilde yapılmıştır. Her bir öğütme şeklinde 6 besleme boyut grubu ayrı ayrı (-1700+1180 μm , -1180+850 μm , -850+600 μm , -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm) 1, 2, 4, 8, 16 ve 32 dakika süreyle değirmende kesikli (*batch*) öğütülmüşlerdir. -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm tane boyut fraksiyonlarının özgül kırılma hızı (S_i), toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri ve ürünlerin tane boyut dağılımları tespit edilmiştir. -1700+1180 μm , -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme boyut fraksiyonlarının ise özgül kırılma hızları belirlenmiştir.

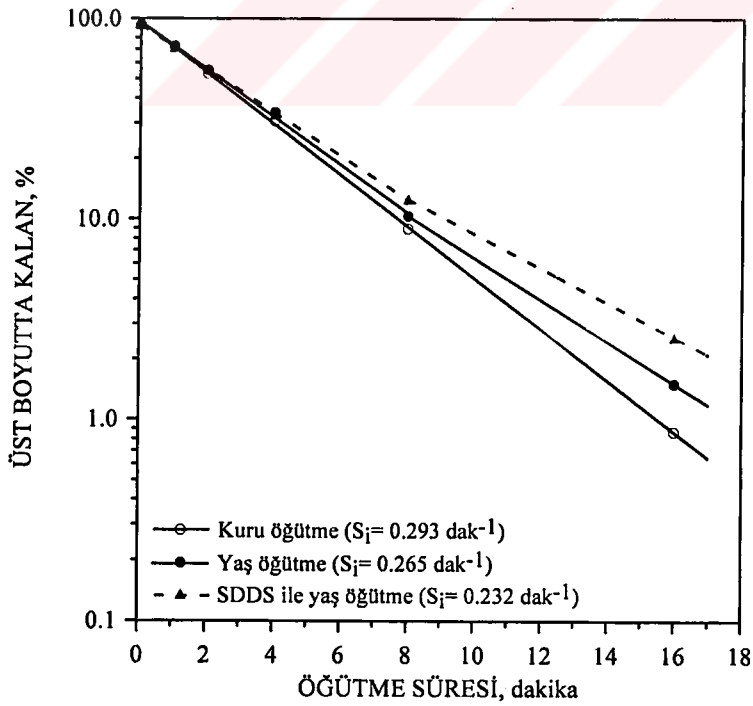
Kimyasal madde ile yaş öğütme testlerinde ise öğütmeye yardımcı madde olarak sodyum dodesil sülfat (SDDS), 1×10^{-3} M konsantrasyonunda kullanılmıştır.

Besleme boyut fraksiyonlarının kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları Şekil 73, 74, 75, 76, 77 ve 78'de gösterilmiştir.

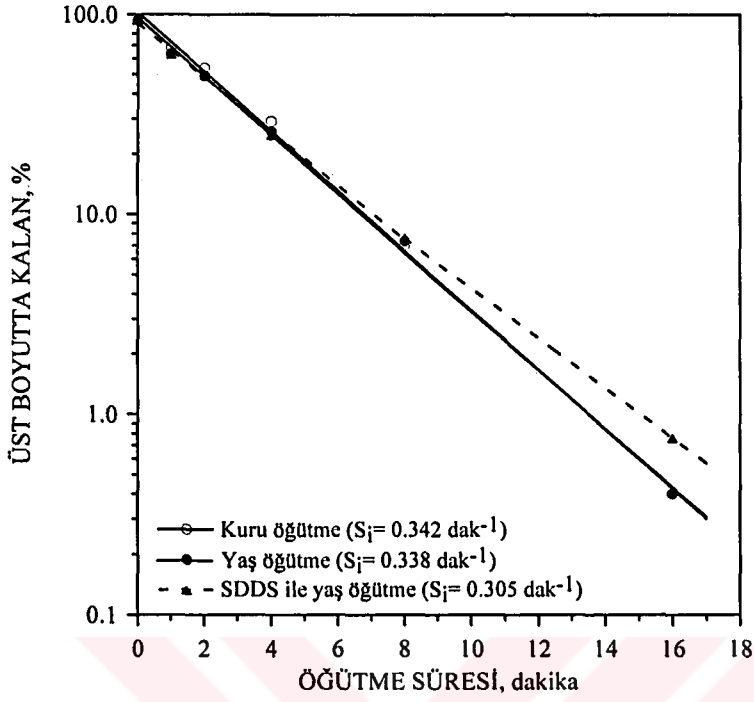
Barit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları sırasıyla Ek 3.A ve Ek 3.B ve Ek 3.C'de verilmiştir.



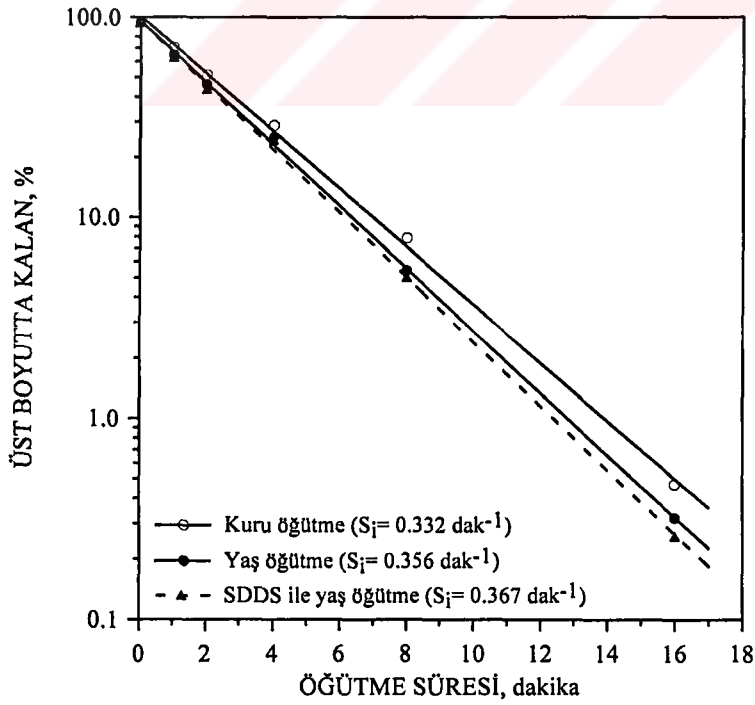
Şekil 73. -1700+1180 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



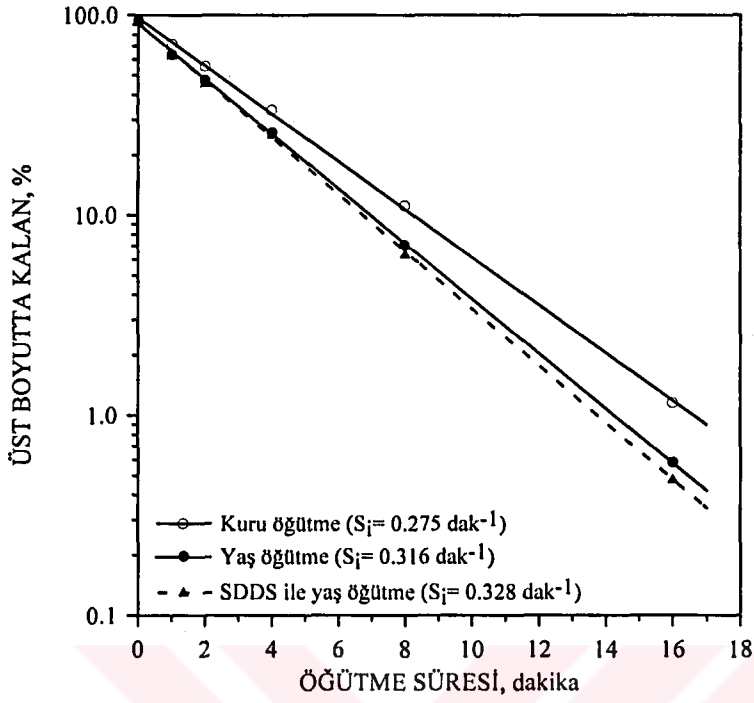
Şekil 74. -1180+850 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



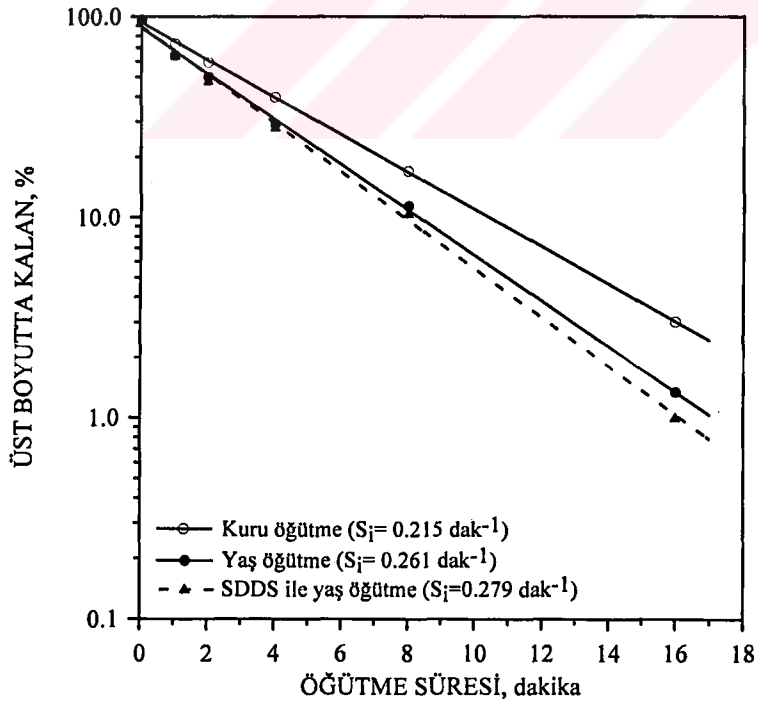
Şekil 75. -850+600 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



Şekil 76. -600+425 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları

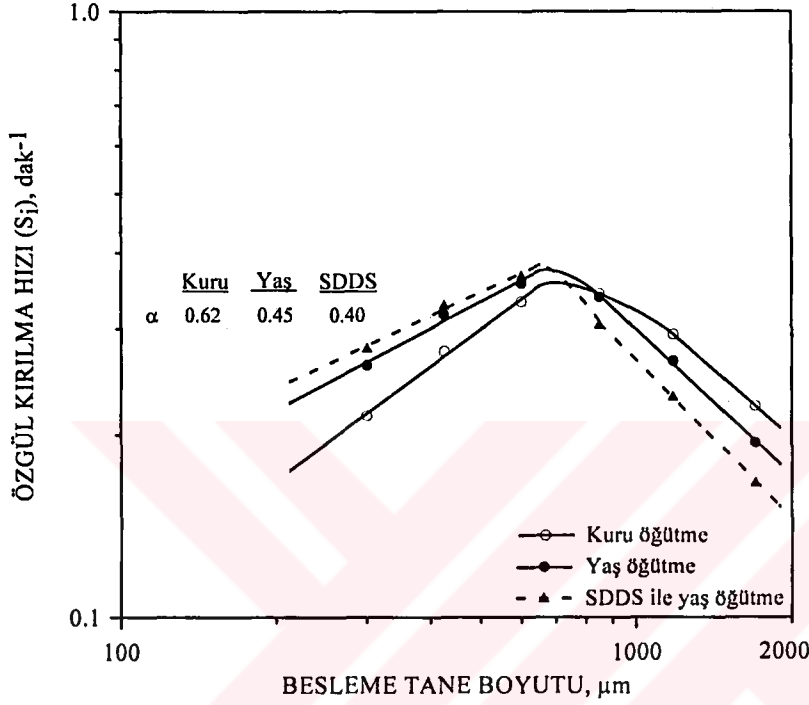


Şekil 77. -425+300 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



Şekil 78. -300+212 µm besleme boyutundaki baritin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları

Barit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutu ile değişimi Şekil 79'da gösterilmiştir.



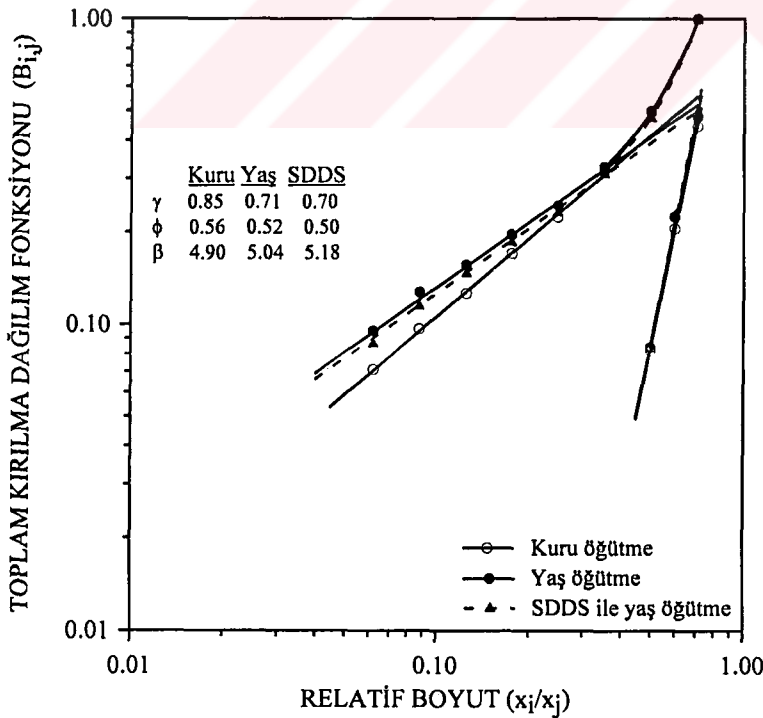
Şekil 79. Barit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi

Barit mineralinin öğütme testleri, kullanılan porselen değirmende kırılma hızlarının 600 µm tane boyutundan daha büyük besleme boyut fraksiyonları (-1700+1180 µm, -1180+850 µm ve -850+600 µm) için azalmaya başladığı ve birinci derece olmayan kırılma kinetiklerinin gerçekleştiğini göstermiştir (Şekil 73, 74, 75 ve Şekil 79). Anormal kırılma bölgesi olarak ifade edilen bu bölgede kırılma hızlarının yavaşlamasına rağmen, -1700+1180 µm, -1180+850 µm ve -850+600 µm besleme boyutlarının kuru öğütülmesinde üst boyutun birinci derece kırılma kinetiği izlediği tespit edilmiştir. Yaş öğütme işleminde ise -850+600 µm besleme boyutunun öğütülmesinde birinci derece kırılma kinetiğinin korunduğu, ancak -1700+1180 µm ve -1180+850 µm tane boyutlarının 8 dakikalık öğütme süresinden sonra birinci derece olmayan kırılma kinetiği gösterdiği belirlenmiştir.

Sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütme testlerinde ise anormal kırılma bölgesinde, tüm besleme boyut fraksiyonlarının öğütülmesinde 8 dakikalık öğütme süresinden sonra üst boyutun birinci derece olmayan kırılma kinetiği izlediği tespit edilmiştir (Şekil 73, 74 ve 75).

Normal kırılma bölgesinde ise $-600+425 \mu\text{m}$, $-425+300 \mu\text{m}$ ve $-300+212 \mu\text{m}$ tane boyut fraksiyonlarının kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesinde üst boyutun kırılma hızlarının birinci derece kırılma kinetiği sergilediği belirlenmiştir (Şekil 76, 77 ve 78).

Barit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri (ortalama değerler) Şekil 80'de gösterilmiştir. Toplam kırılma dağılım fonksiyonu parametreleri 1 dakikalık öğütme ürünü için BII hesaplama yöntemi (Austin ve Ark., 1984) kullanılarak belirlenmiştir. Her bir boyut grubuna ait $B_{i,j}$ değerleri ise Tablo 9'da verilmiştir.



Şekil 80. Barit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri

Tablo 9. Barit mineralinin öğütülmesi sonucu elde edilen kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ değerleri)

Öğütme Şekli	Besleme Boyutu, μm	Kırılma Parametreleri				
		S_i , dak^{-1}	γ	ϕ	β	α / a_T , dak^{-1}
Kuru öğütme	-1700+1180	0.223				0.62 / 0.349
	-1180+850	0.293				
	-850+600	0.342				
	-600+425	0.332	0.76	0.46	4.52	
	-425+300	0.275	0.82	0.57	4.11	
	-300+212	0.215	0.98	0.66	6.07	
Yaş öğütme	-1700+1180	0.194				0.45 / 0.369
	-1180+850	0.265				
	-850+600	0.338				
	-600+425	0.356	0.63	0.45	5.07	
	-425+300	0.316	0.66	0.51	4.12	
	-300+212	0.261	0.83	0.61	5.92	
Sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütme (1×10^{-3} M)	-1700+1180	0.167				0.40 / 0.379
	-1180+850	0.232				
	-850+600	0.305				
	-600+425	0.367	0.64	0.42	4.75	
	-425+300	0.328	0.67	0.50	4.34	
	-300+212	0.279	0.78	0.57	6.46	

Tablo 9'un değerlendirilmesi ile normal kırılma bölgesinde -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları için sırasıyla yaş öğütme kuru öğütmeye oranla ($S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$) kırılma hızlarını 1.07, 1.15 ve 1.21 kat artırmıştır.

Sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütme ise normal kırılma bölgesinde -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları için sırasıyla yaş öğütmeye oranla ($S_{i\text{-SDDS}}/S_{i\text{-yaş}}$) kırılma hızlarını 1.03, 1.04 ve 1.07 kat artırmıştır.

Değirmene beslenen tane boyutu incelidikçe $S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$ oranı artmaktadır. Yani, yaş öğütme işlemi ince besleme boyutlarının öğütülmesinde daha etkin olmuştur. Benzer şekilde, barit minerali için $S_{i\text{-SDDS}}/S_{i\text{-yaş}}$ oranı da değirmene beslenen boyut incelidikçe artmakta, yani kimyasal madde değirmene beslenen boyut incelidikçe daha etkin olmaktadır.

Anormal kırılma bölgesinde ise yaş öğütme kuru öğütmeden daha yavaş olmaktadır. -1700+1180 μm , -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme tane

boyutları için bu yavaşlama oranı ($S_{i-yaş}/S_{i-kuru}$) sırasıyla 0.87, 0.90 ve 0.99'dur. Yani, anormal kırılma bölgesinden normal kırılma bölgesine yaklaştıkça yavaşlama oranı azalarak normal kırılma bölgesinde 1'den büyük bir değer almaktadır. Başka bir ifadeyle, anormal kırılma bölgesinde tane boyutu irileştikçe kuru öğütme yaş öğütmeye göre daha etkin olmaktadır (Şekil 73, 74 ve 75).

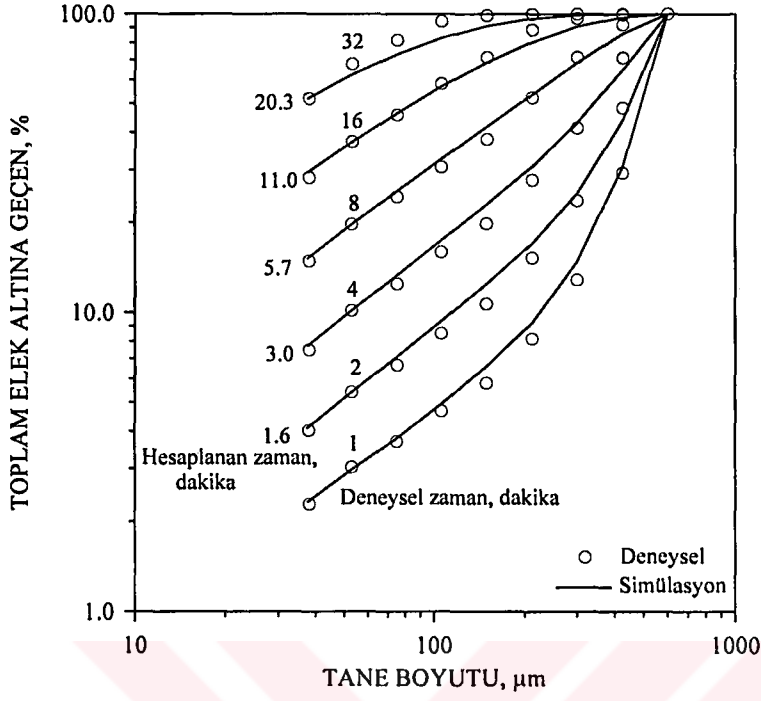
Yine anormal kırılma bölgesinde kullanılan kimyasal madde (SDDS) özgül kırılma hızlarını yavaşlatmaktadır. -1700+1180 μm , -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme tane boyutları için bu yavaşlama oranı ($S_{i-SDDS}/S_{i-yaş}$) sırasıyla 0.86, 0.88 ve 0.90'dır (Şekil 73, 74 ve 75). Yani, anormal kırılma bölgesinden normal kırılma bölgesine yaklaştıkça sodyum dodesil sülfatın olumsuz etkisi azalmaktadır.

Toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri ise kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme için birbirine yakın bulunmuştur (Şekil 80). Ancak, yine de küçük farklılıklar gözlenmiştir. Ürün tane boyut dağılımının inceliğini ifade eden γ değeri en yüksek kuru öğütme için ($\gamma_{ort}=0.85$) bulunmuş olup, bu kuru öğütme işlemi ile elde edilen ürün boyutunda daha kaba boyutların bulunduğunu ifade etmektedir (Şekil 80). Normal kırılma bölgesinde, her üç öğütme tipi içinde değirmene beslenen tane boyutu irileştikçe γ değeri azalmaktadır. Yani, daha ince boyut dağılımı vermektedir (Tablo 9).

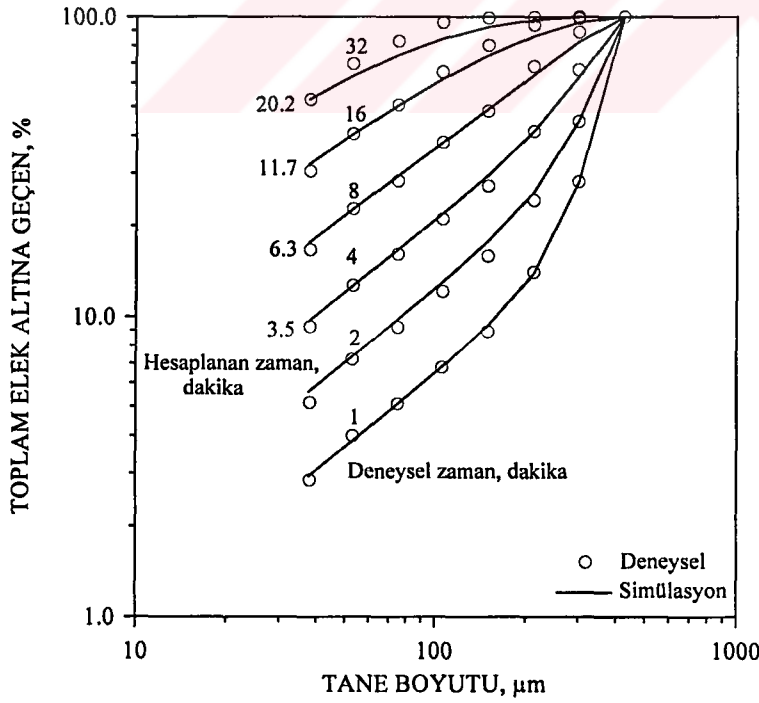
3.1.2.2. Ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu

Barit minerali için elde edilen karakteristik kırılma parametreleri (a_T , α , γ , ϕ ve β) (Tablo 9) kullanılarak (her öğütme tipi için ortalama $B_{i,j}$ değerleri), laboratuvar ölçekli kullanılan bu öğütme işleminin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile deneysel olarak tespit edilen tane boyut dağılımları karşılaştırmalı olarak kuru öğütme için Şekil 81, 82 ve 83, yaş öğütme için Şekil 84, 85 ve 86 ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütme için Şekil 87, 88 ve 89'da gösterilmiştir.

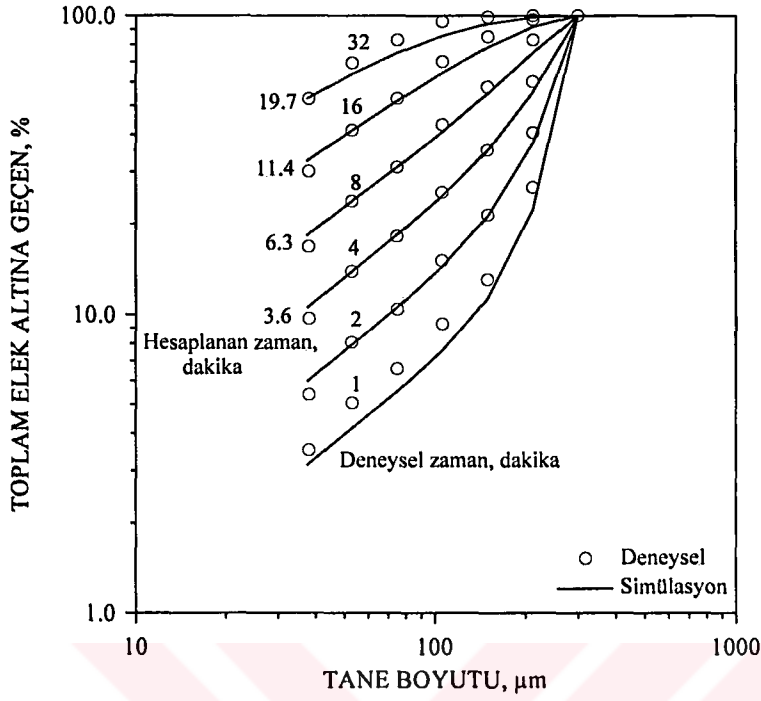
Barit mineralinin kuru, yaş ve sodyum dodesil sülfat ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları sırasıyla Ek 4.A, Ek 4.B ve Ek 4.C'de verilmiştir.



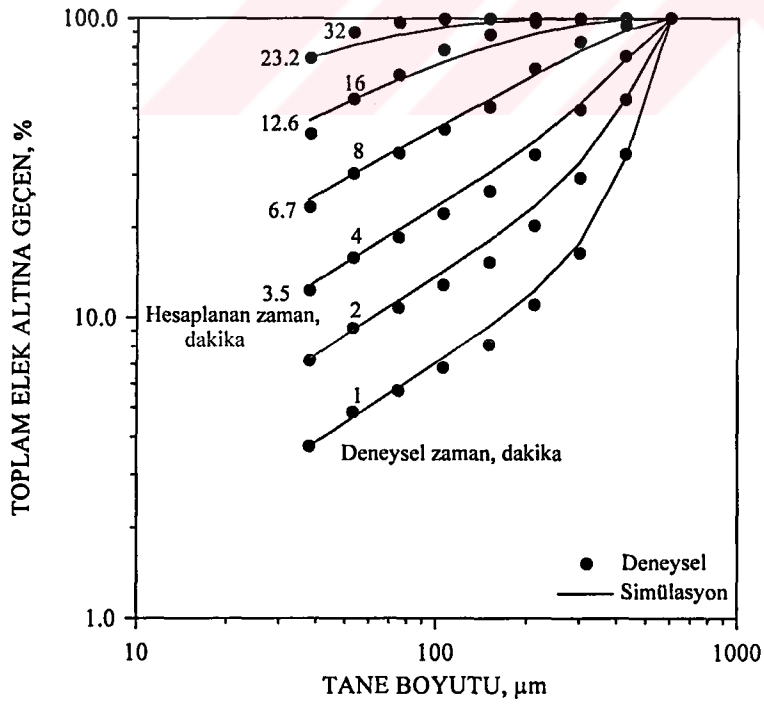
Şekil 81. -600+425 µm besleme boyutundaki baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



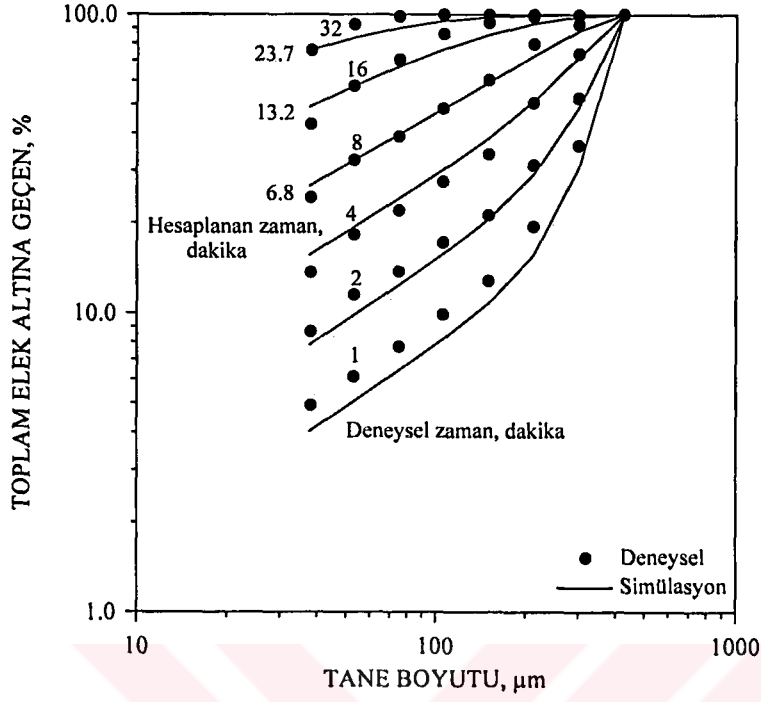
Şekil 82. -425+300 µm besleme boyutundaki baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



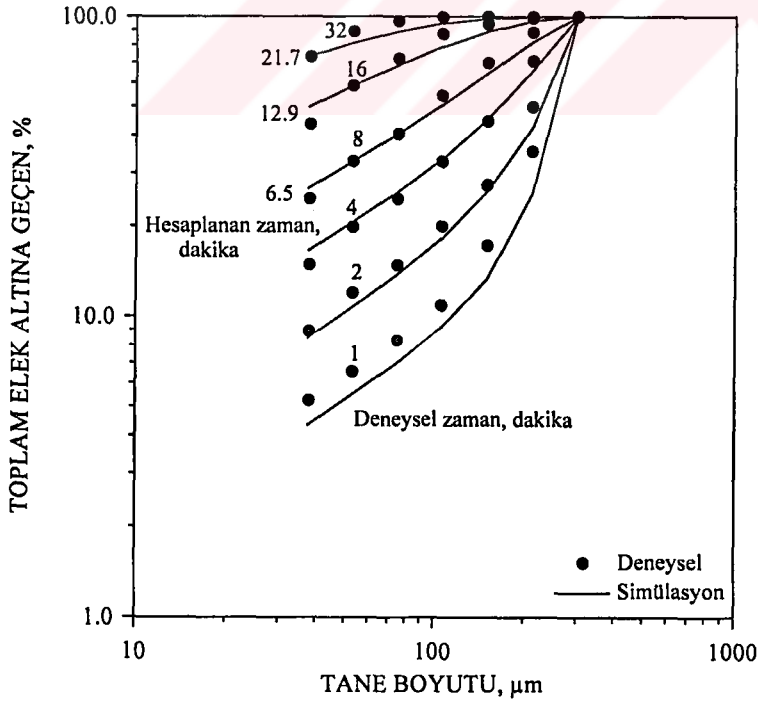
Şekil 83. -300+212 µm besleme boyutundaki baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



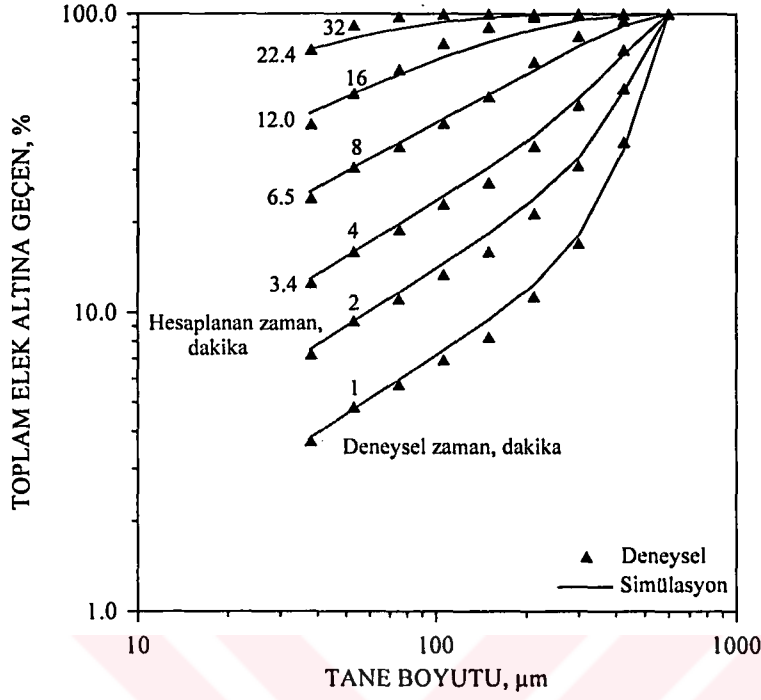
Şekil 84. -600+425 µm besleme boyutundaki baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



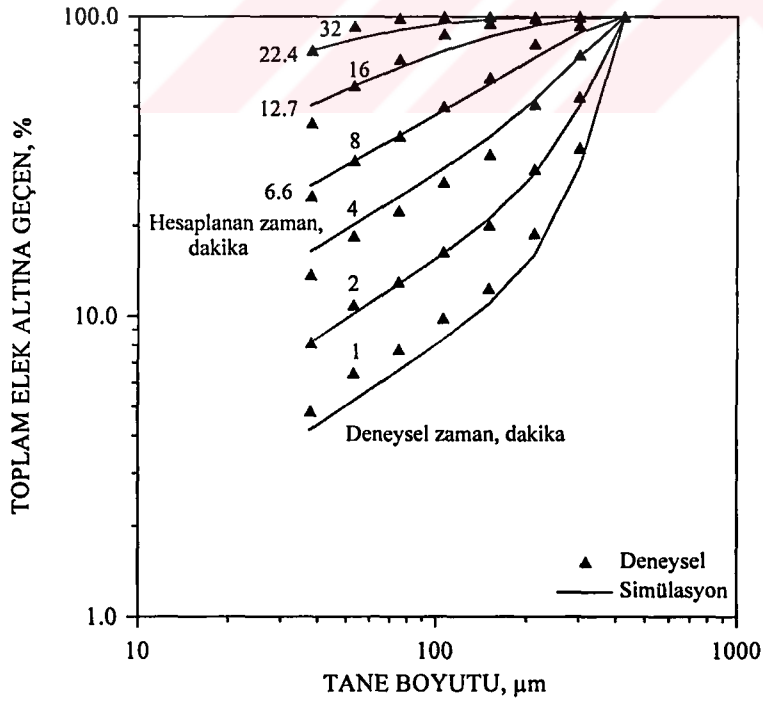
Şekil 85. -425+300 µm besleme boyutundaki baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



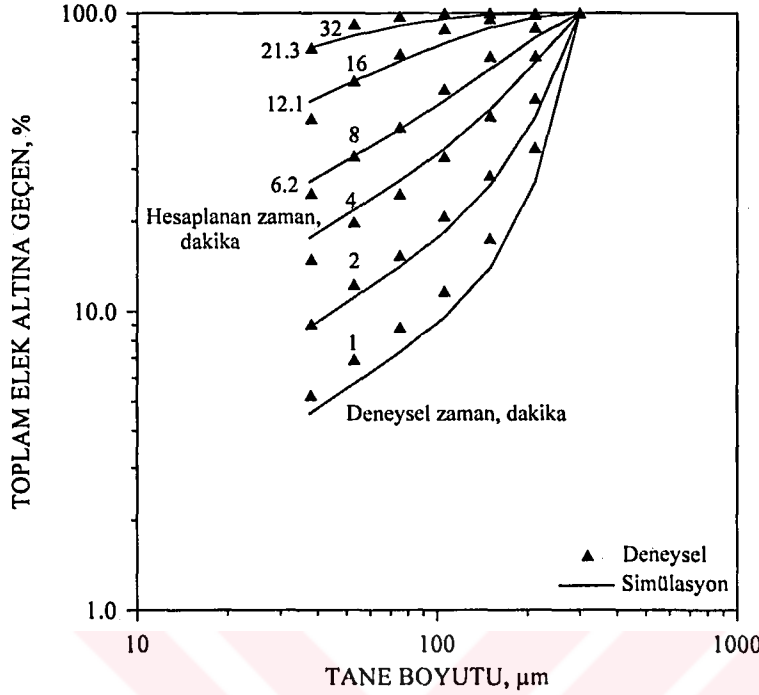
Şekil 86. -300+212 µm besleme boyutundaki baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



Şekil 87. -600+425 µm besleme boyutundaki baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



Şekil 88. -425+300 µm besleme boyutundaki baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



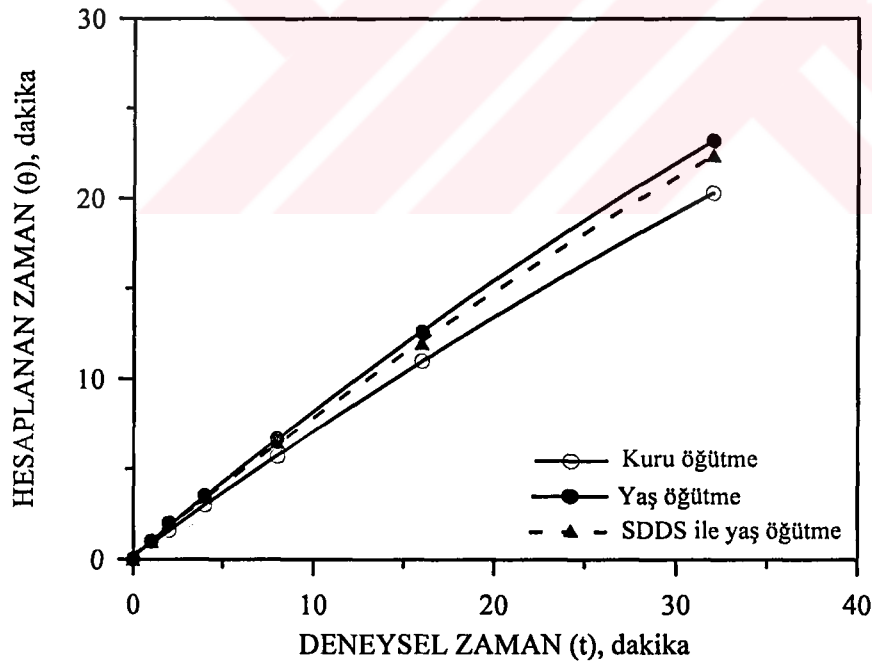
Şekil 89. -300+212 µm besleme boyutundaki baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu

Simülasyonla elde edilen verilerin analizi sonucu; barit mineralinin -600+425 µm besleme boyutunun kuru öğütülmesinde 2 dakikalık öğütme süresinden itibaren, -425+300 µm ve -300+212 µm besleme boyutlarının kuru öğütülmesinde ise 4 dakikalık öğütme süresinden itibaren öğütmede yavaşlama etkisinin başladığı belirlenmiştir (Şekil 81, 82 ve 83). Yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütme işlemlerinde ise -600+425 µm besleme boyutunun öğütülmesinde 4 dakikalık öğütme süresinden itibaren, -425+300 µm ve -300+212 µm besleme boyutlarının öğütülmesinde ise 8 dakikalık öğütme süresinden itibaren yavaşlama etkisi başlamaktadır (Şekil 84, 85, 86, 87, 88 ve 89).

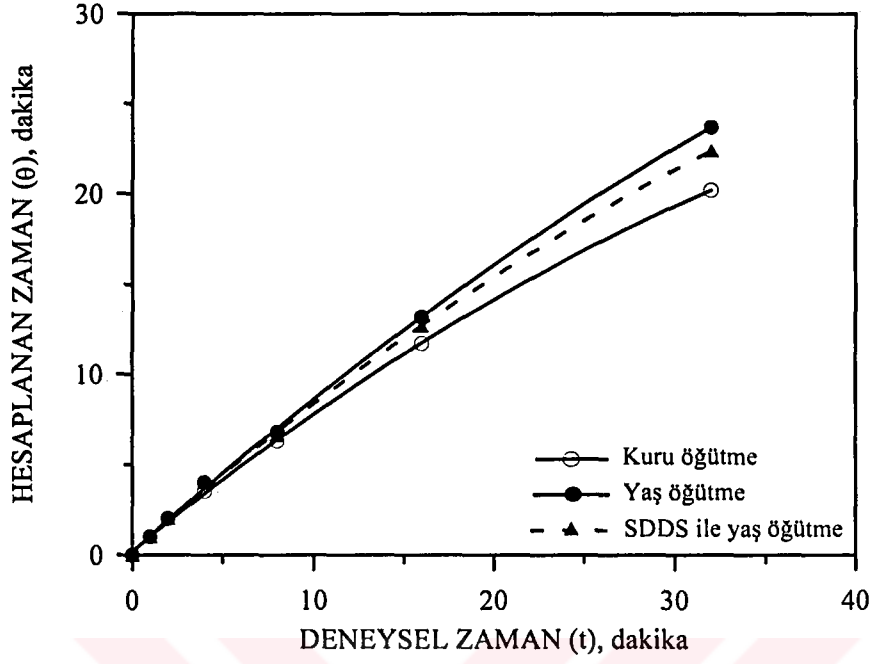
Belirtilen bu öğütme sürelerine kadar deneysel olarak belirlenen ürün tane boyut dağılımları ile simülasyonla elde edilen ürün boyut dağılımlarının uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak, belirtilen bu öğütme sürelerinden sonra simülasyon ile belirlenen değerler, deneysel olarak belirlenen değerlerden daha ince ürün tane boyut dağılımları vermektedir. Bu farkı gidermek için 2, 4, 8 ve 16 dakikalık

öğütme süreleri için $53 \mu\text{m}$ tane boyutunda, 32 dakikalık öğütme süresi için ise $38 \mu\text{m}$ tane boyutunda, bir boyutta geçen miktarı baz alarak (one point fit yaklaşımı kullanılarak) simülatör ile belirlenen değer, deneysel olarak belirlenen değere programda eşlenmiştir. Bu yaklaşım ile elde edilen hesaplanan zaman (θ) ile deneysel zaman (t) arasındaki ilişki $-600+425 \mu\text{m}$, $-425+300 \mu\text{m}$ ve $-300+212 \mu\text{m}$ besleme boyutları için sırasıyla Şekil 90, 91 ve 92'de verilmiştir. Simülatör ile hesaplanan zaman, deneysel zamandan daima küçük bulunmaktadır ($\theta \leq t$).

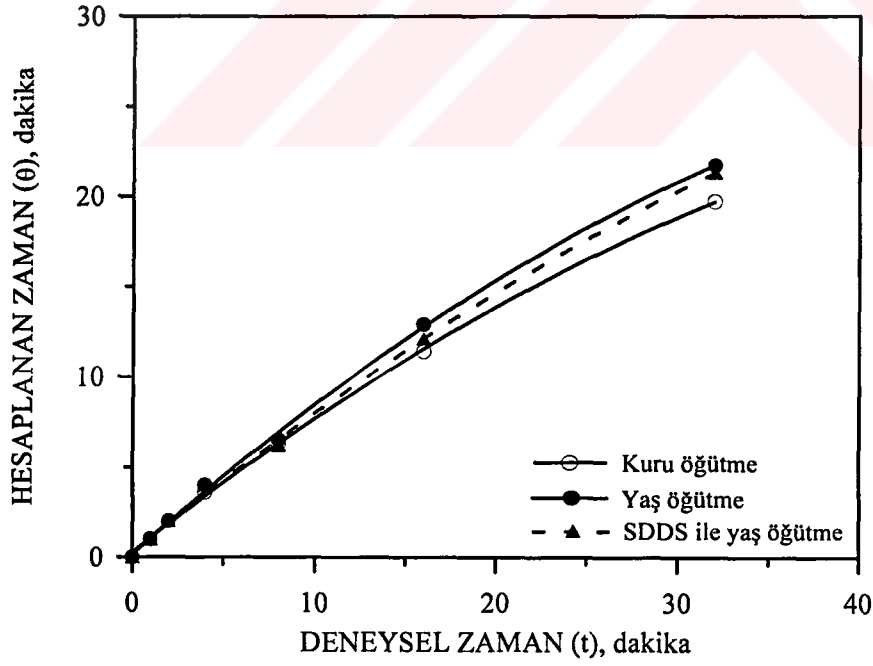
Yavaşlama faktörünün (κ) deneysel zaman ile değişimi ise $-600+425 \mu\text{m}$, $-425+300 \mu\text{m}$ ve $-300+212 \mu\text{m}$ besleme boyutları için sırasıyla Şekil 93, 94 ve 95'de verilmiştir. Söz konusu şekillerde görüldüğü gibi öğütme süresi arttıkça κ değeri azalmaktadır, yani öğütme işlemi ilerledikçe yavaşlama etkisi de artmaktadır.



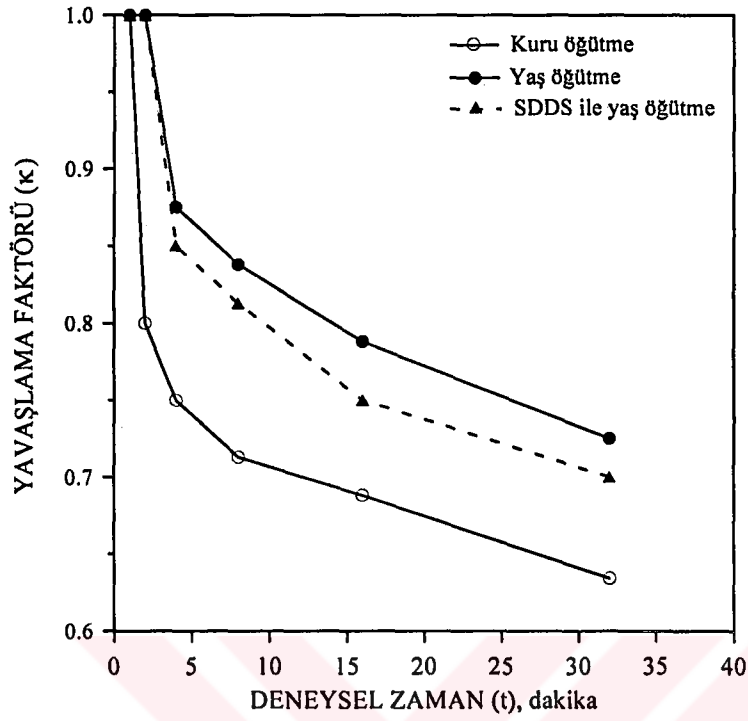
Şekil 90. $-600+425 \mu\text{m}$ besleme boyutundaki barit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki



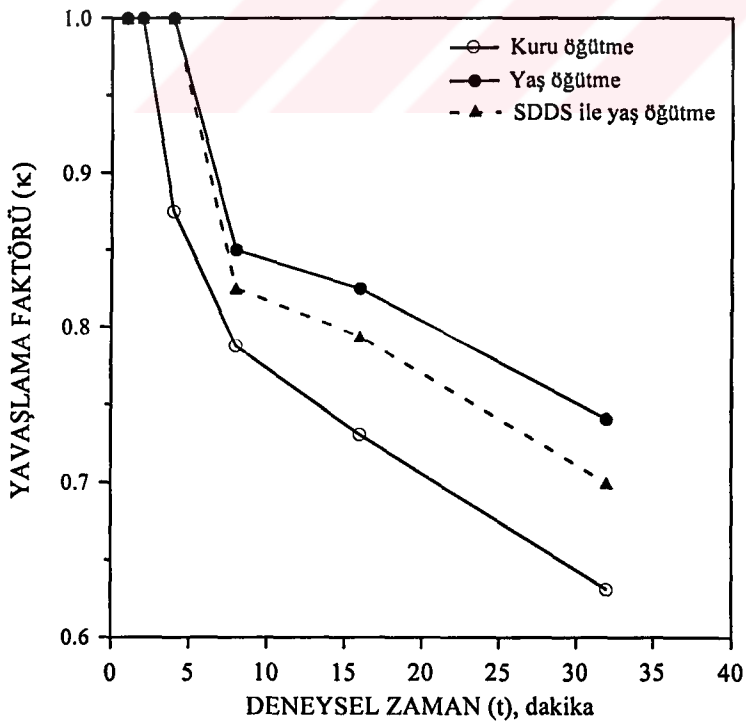
Şekil 91. -425+300 μm besleme boyutundaki barit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki



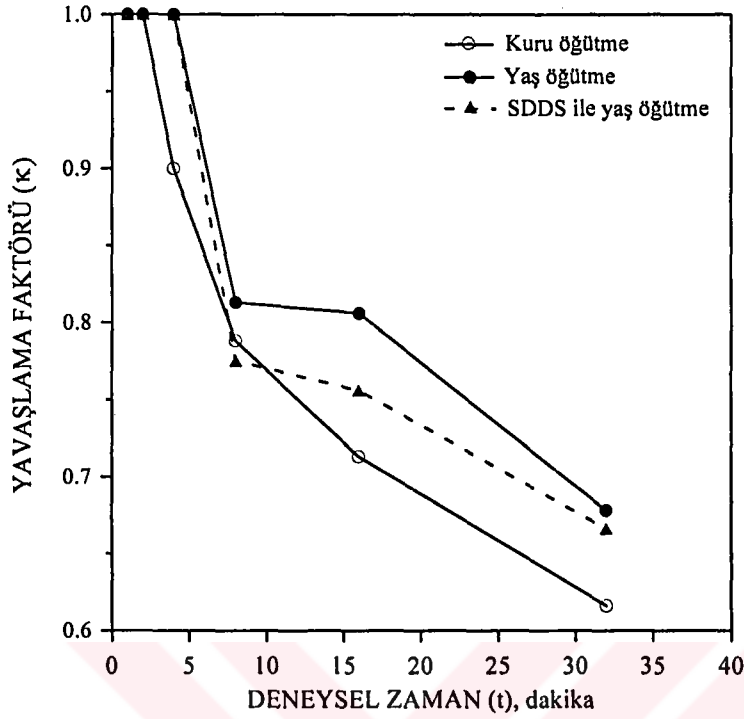
Şekil 92. -300+212 μm besleme boyutundaki barit için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki



Şekil 93. -600+425 µm besleme boyutundaki barit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi



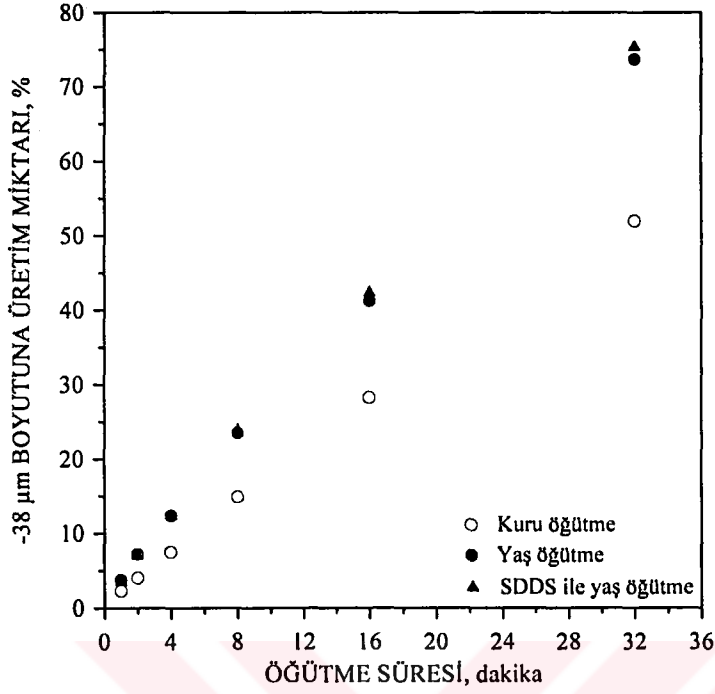
Şekil 94. -425+300 µm besleme boyutundaki barit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi



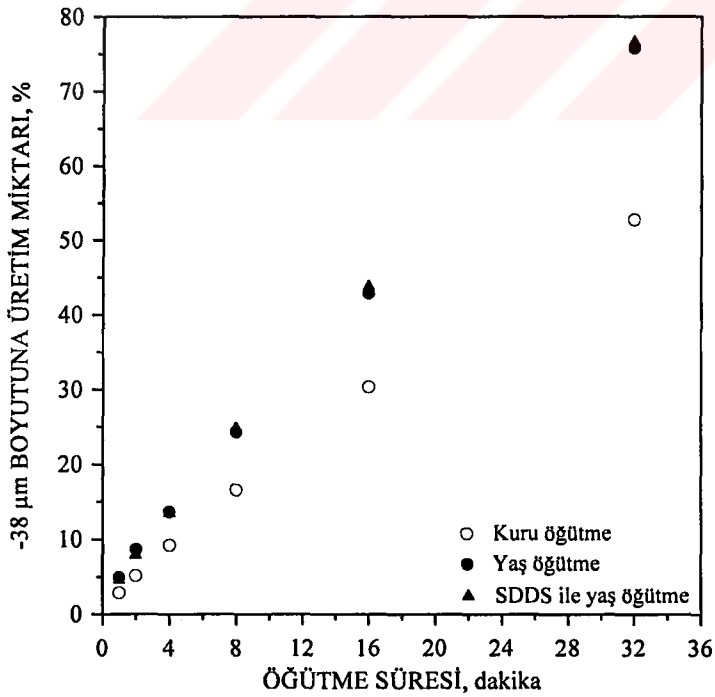
Şekil 95. -300+212 μm besleme boyutundaki barit için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi

-600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutu baritin öğütme stüresine bağlı olarak kuru, yaş ve SDDS ile yaş öğütülmesi sonucu -38 μm tane boyutuna geçen miktarlar sırasıyla Şekil 96, 97 ve 98'de verilmiştir.

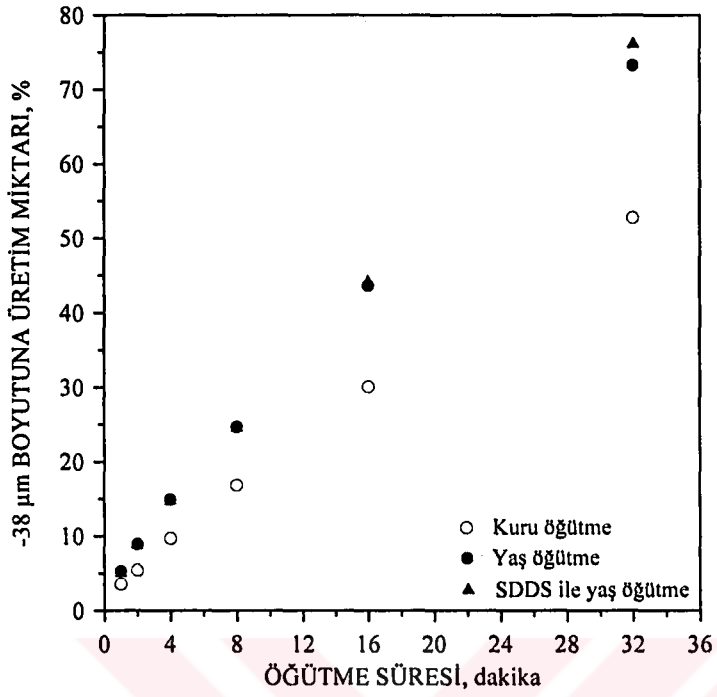
Söz konusu şekillerde görüldüğü gibi baritin yaş öğütülmesinde, kuru öğütmeye göre -38 μm boyutuna geçen malzeme miktarı daha fazladır. SDDS ilavesi ile yapılan yaş öğütme işlemi ise yaş öğütmeye oranla üst boyutun kırılma hızlarının da artmasına paralel olarak, -38 μm tane boyutuna geçen malzeme miktarı da artmaktadır.



Şekil 96. -600+425 µm besleme boyutundaki baritin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve SDDS ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları



Şekil 97. -425+300 µm besleme boyutundaki baritin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve SDDS ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları



Şekil 98. -300+212 µm besleme boyutundaki baritin öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve SDDS ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları

3.1.3. Kömür

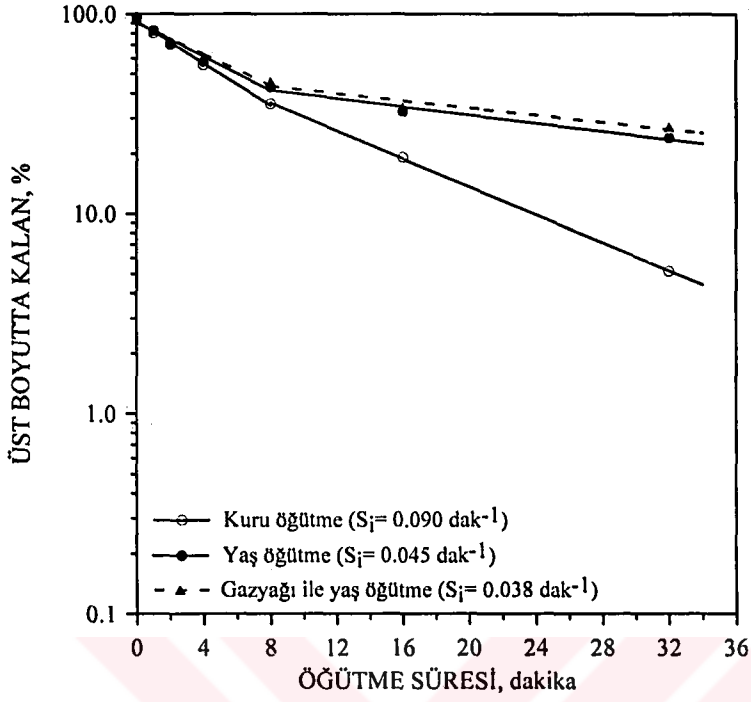
3.1.3.1. Özgül kırılma hızları (S_i) ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametrelerinin belirlenmesi

Linyit kömürü için öğütme testleri kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş olmak üzere üç şekilde yapılmıştır. Her bir öğütme şeklinde 6 besleme boyut grubu (-1700+1180 μm , -1180+850 μm , -850+600 μm , -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm) 1, 2, 4, 8, 16, 32 ve 64 dakika süreyle değirmende kesikli (*batch*) öğütülmüşlerdir. -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyut fraksiyonlarının özgül kırılma hızı (S_i), toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri ve ürün tane boyut dağılımları tespit edilmiştir. -1700+1180 μm , -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme boyut fraksiyonlarının ise özgül kırılma hızları belirlenmiştir.

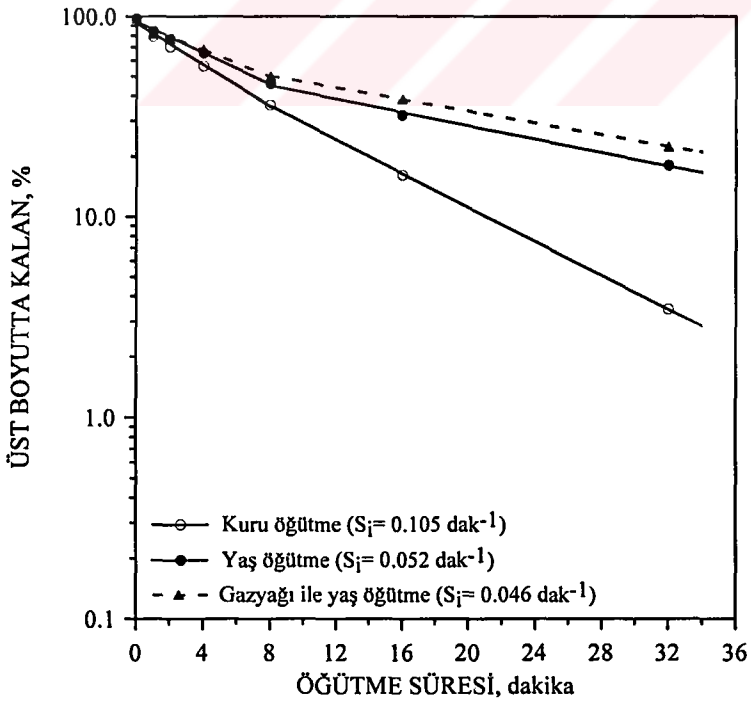
Kimyasal madde ile yaş öğütme testinde ise gazyağı kullanılmış olup, kullanım konsantrasyonu 485 mg/L'dir.

Hazırlanan besleme boyut fraksiyonlarının kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları Şekil 99, 100, 101, 102, 103 ve 104'de gösterilmiştir.

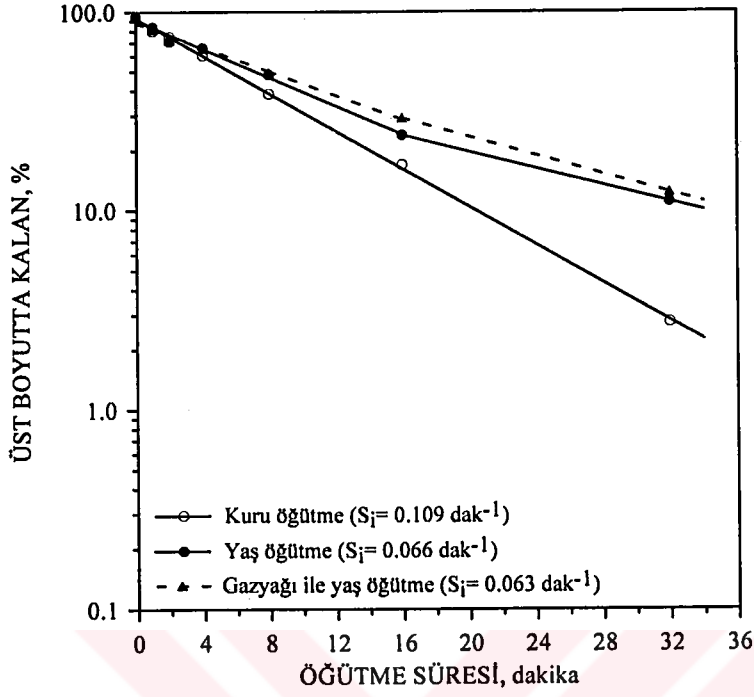
Kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları sırasıyla Ek 5.A ve Ek 5.B ve Ek 5.C'de verilmiştir.



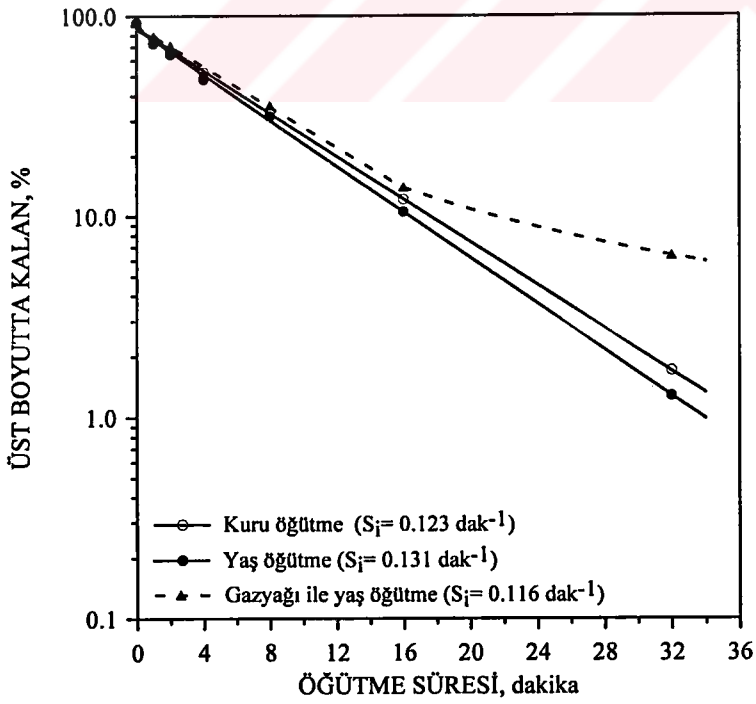
Şekil 99. -1700+1180 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



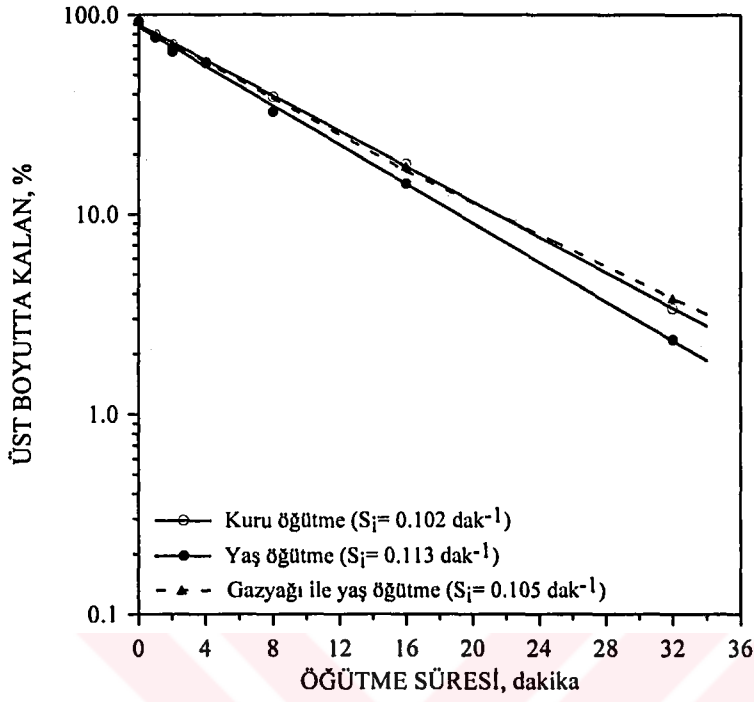
Şekil 100. -1180+850 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



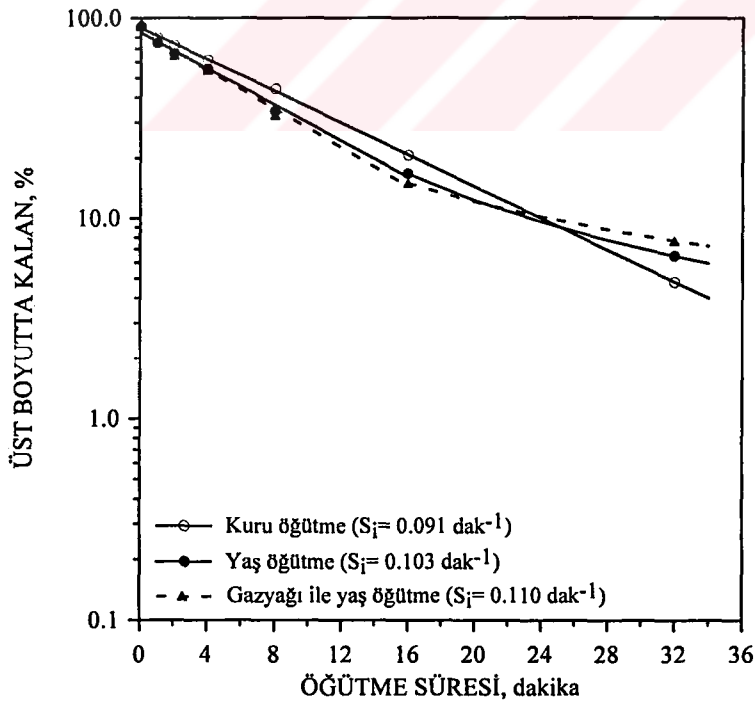
Şekil 101. -850+600 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yağ ve gazyağı ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



Şekil 102. -600+425 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yağ ve gazyağı ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları

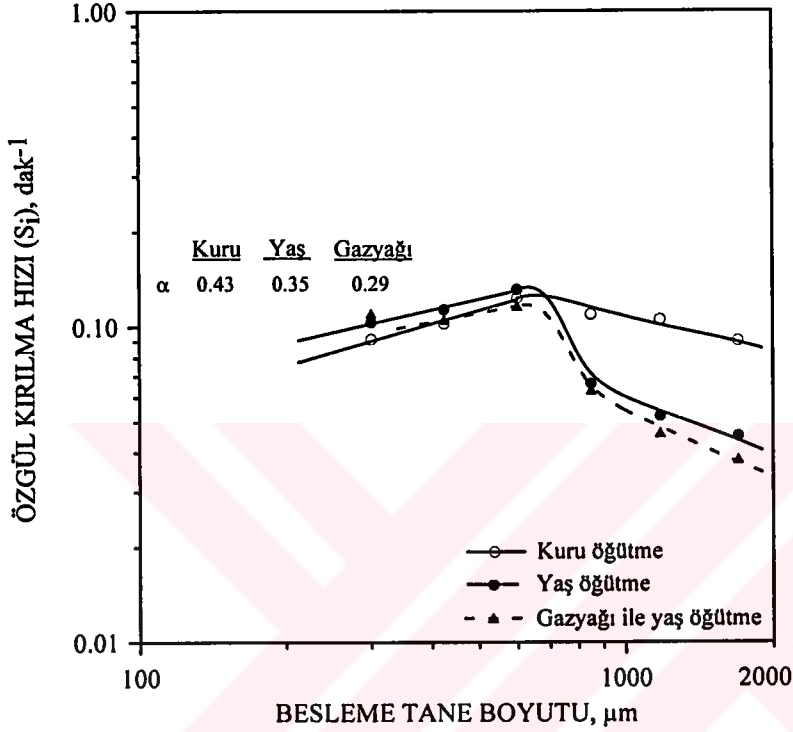


Şekil 103. -425+300 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yağ ve gazyağı ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları



Şekil 104. -300+212 µm besleme boyutundaki kömürün kuru, yağ ve gazyağı ile yağ öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızları

Kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutu ile değişimi Şekil 105’de gösterilmiştir.



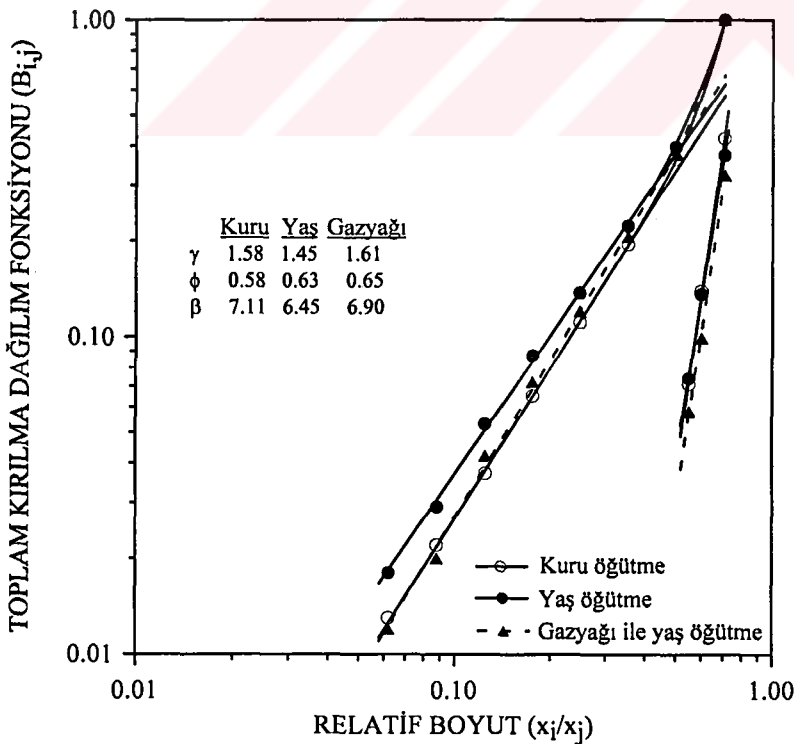
Şekil 105. Kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle belirlenen özgül kırılma hızlarının besleme tane boyutuyla değişimi

Kömürün öğütme testleri, kullanılan porselen değirmende kırılma hızlarının 600 µm tane boyutundan daha büyük besleme boyut fraksiyonları için azalmaya başladığı ve birinci derece olmayan kırılma kinetiklerinin gerçekleştiğini göstermiştir (Şekil 99, 100 ve 101 ve Şekil 105). Anormal kırılma bölgesi olarak tanımlanan bu bölgede kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesinde üst boyutun kırılma hızlarının -1700+1180 µm ve -1180+850 µm besleme boyutları için 8 dakikalık öğütme süresinden sonra birinci derece olmayan kırılma kinetiği gösterdiği belirlenmiştir. -850+600 µm besleme boyutunun kuru öğütülmesinde birinci derece kinetik korunurken, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesi işleminde ise

16 dakikalık öğütme süresinden sonra üst boyutun kırılma hızının birinci derece olmayan kinetik izlediği tespit edilmiştir.

Normal kırılma bölgesinde ise $-600+425 \mu\text{m}$, $-425+300 \mu\text{m}$ ve $-300+212 \mu\text{m}$ besleme boyut fraksiyonlarının kuru ve yaş öğütülmesinde ($-300+212 \mu\text{m}$ boyutunun yaş öğütülmesi hariç) birinci derece kırılma kinetiği korunurken, gazyağı ile yaş öğütme işleminde ise tüm besleme boyutlarında 16 dakikalık öğütme süresinden sonra yavaşlama etkisi nedeniyle birinci derece olmayan kırılma kinetiği gözlenmektedir (Şekil 102, 103 ve 104).

Kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri (ortalama değerler) Şekil 106'da gösterilmiştir. Toplam kırılma dağılım fonksiyonu parametreleri 1 dakikalık öğütme ürünü için BII hesaplama yöntemi (Austin ve Ark., 1984) kullanılarak belirlenmiştir. Her bir boyut grubunun kendi $B_{i,j}$ değerleri ise Tablo 10'da verilmiştir.



Şekil 106. Kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) değerleri

Tablo 10. Kömürün öğütülmesi sonucu elde edilen kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ değerleri)

Öğütme Şekli	Besleme Boyutu, μm	Kırılma Parametreleri				
		S_i , dak^{-1}	γ	ϕ	β	α / a_T , dak^{-1}
Kuru öğütme	-1700+1180	0.090				0.43 / 0.127
	-1180+850	0.105				
	-850+600	0.109				
	-600+425	0.123	1.41	0.53	6.04	
	-425+300	0.102	1.62	0.57	6.41	
	-300+212	0.091	1.72	0.65	8.88	
Yaş öğütme	-1700+1180	0.045				0.35 / 0.135
	-1180+850	0.052				
	-850+600	0.066				
	-600+425	0.131	1.28	0.52	6.18	
	-425+300	0.113	1.52	0.63	6.23	
	-300+212	0.103	1.55	0.73	6.93	
Gazyağı ile yaş öğütme (485 mg/L)	-1700+1180	0.038				0.29 / 0.119
	-1180+850	0.046				
	-850+600	0.063				
	-600+425	0.116	1.49	0.52	7.54	
	-425+300	0.105	1.82	0.68	6.55	
	-300+212	0.110	1.53	0.74	6.61	

Tablo 10'un değerlendirilmesinden, normal kırılma bölgesinde -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları için sırasıyla yaş öğütme kuru öğütmeye oranla ($S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$) kırılma hızlarını 1.07, 1.11 ve 1.13 kat artırmıştır. Yani, yaş öğütme işlemi değirmene beslenen boyut incelidikçe kömürün öğütülmesinde daha etkin olmaktadır.

Gazyağı ile yaş öğütme işlemi için normal kırılma bölgesinde üst boyutun kırılma hızlarının birinci derece kinetik izlediği duruma ait özgül kırılma hızları karşılaştırıldığında, -600+425 μm , -425+300 μm besleme boyutları için sırasıyla 0.89 ve 0.93 oranında yaş öğütmeye oranla kırılma hızlarını yavaşlatmıştır. -300+212 μm besleme boyutunda ise yaş öğütmeye göre kırılma hızını 1.07 kat artırmıştır. Ancak, 16 dakikalık öğütme süresinden sonra yavaşlama etkisinin yaş öğütmeye oranla daha yüksek oluşu nedeniyle, öğütmeyi olumsuz yönde etkilemektedir.

Anormal kırılma bölgesinde ise yaş öğütme kuru öğütmeden daha yavaş olmaktadır. -1700+1180 μm , -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme tane boyutları için bu yavaşlama oranı ($S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$) sırasıyla 0.50, 0.50 ve 0.61'dir.

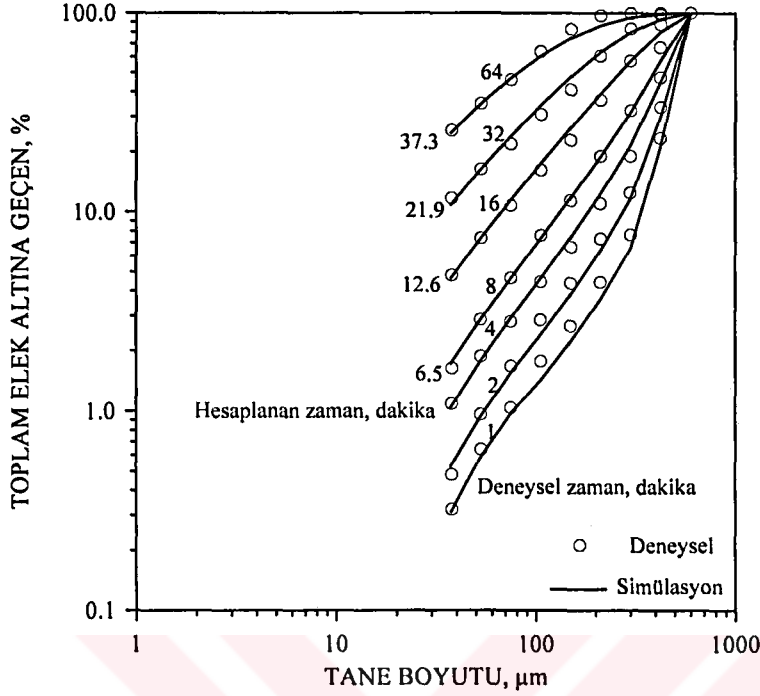
Yine anormal kırılma bölgesinde kullanılan kimyasal madde (gazyağı) yaş öğütmeye göre özgül kırılma hızlarını yavaşlatmaktadır. -1700+1180 μm , -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme tane boyutları için bu yavaşlama oranı ($S_{i\text{-gazyağı}}/S_{i\text{-yaş}}$) sırasıyla 0.84, 0.88 ve 0.95'tir.

Toplam kırılma dağılım fonksiyonu ($B_{i,j}$) parametreleri ise kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütme için birbirine yakın olmakla beraber (Şekil 106), yine de küçük farklılıklar göstermiştir. Ürün tane boyut dağılımının inceliğini ifade eden γ değeri en yüksek olarak gazyağı ile yaş öğütme için (kuru öğütmeye çok yakın) bulunmuştur.

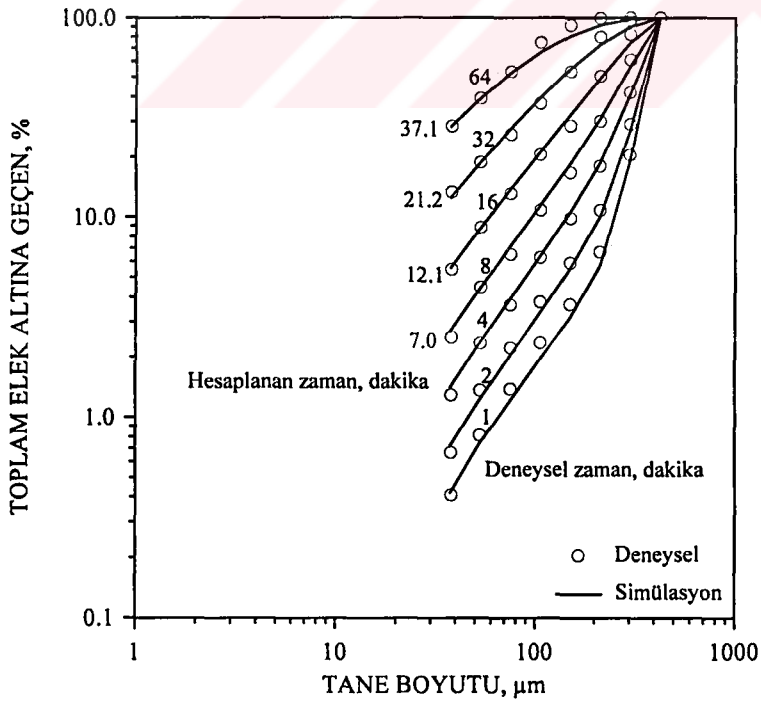
3.1.3.2. Ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu

Linyit kömürü için elde edilen karakteristik kırılma parametreleri (a_T , α , γ , ϕ ve β) (Tablo 10) kullanılarak (her öğütme tipi için ortalama $B_{i,j}$ değerleri), laboratuvar ölçekli kullanılan bu öğütme işleminin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile deneysel olarak tespit edilen tane boyut dağılımları karşılaştırmalı olarak kuru öğütme için Şekil 107, 108 ve 109, yaş öğütme için Şekil 110, 111 ve 112 ve gazyağı ile yaş öğütme için Şekil 113, 114 ve 115'de gösterilmiştir.

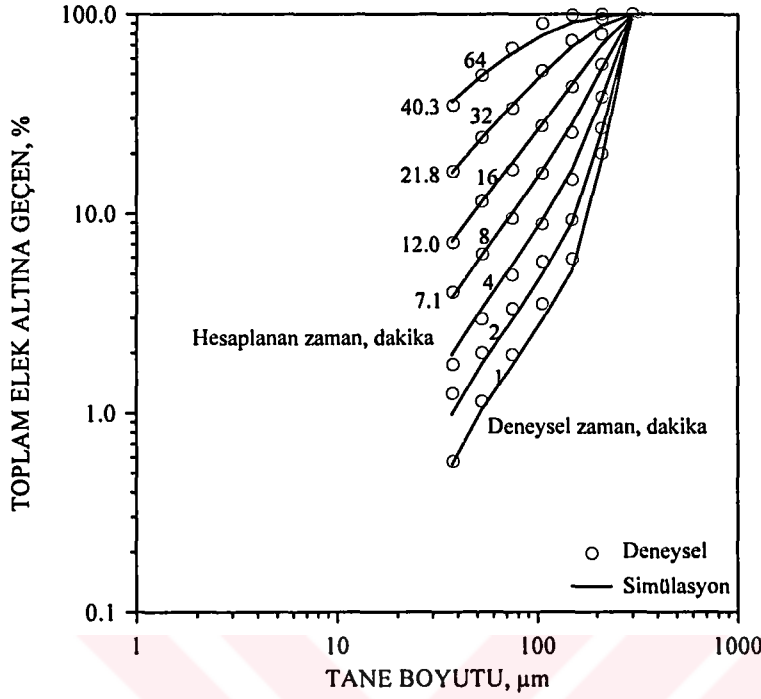
Kömürün kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları sırasıyla Ek 6.A, Ek 6.B ve Ek 6.C'de verilmiştir



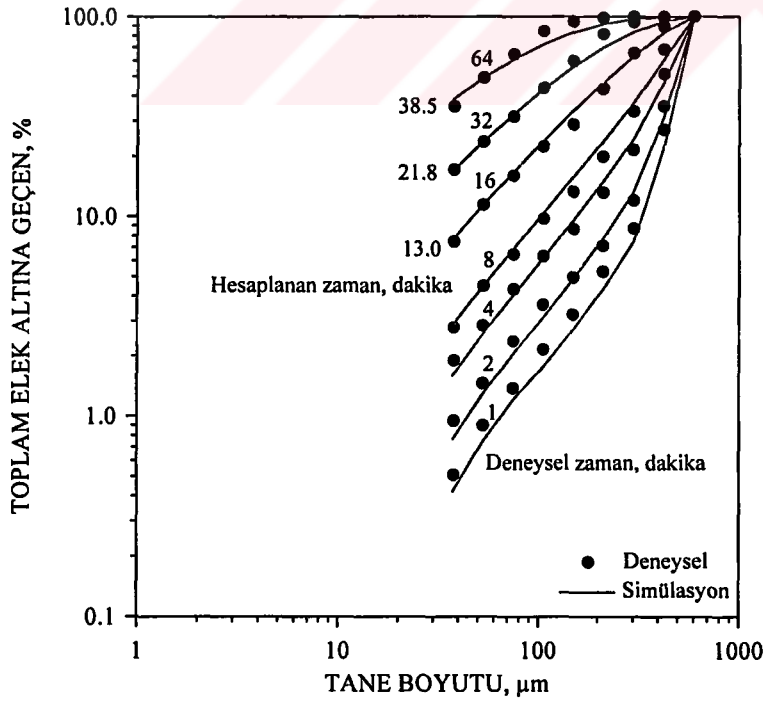
Şekil 107. -600+425 µm besleme boyutundaki kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



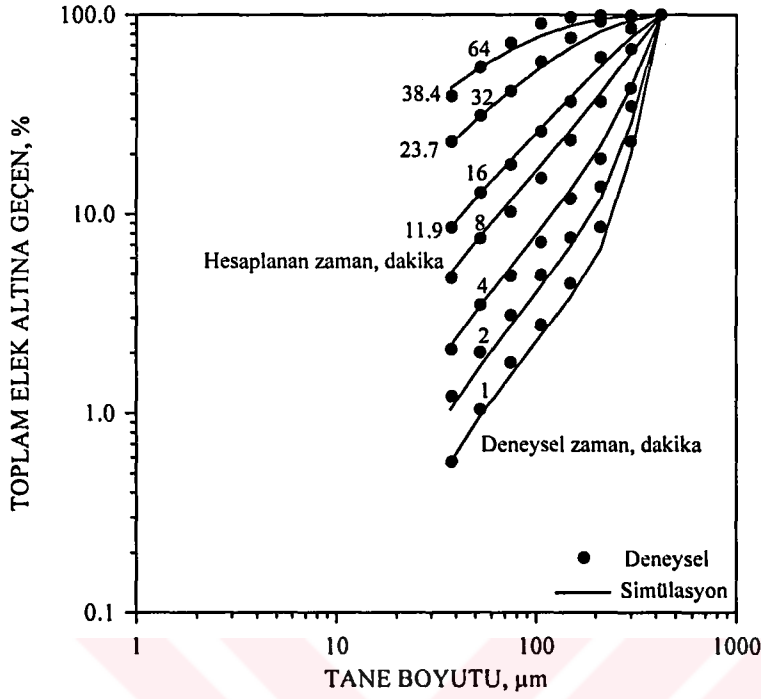
Şekil 108. -425+300 µm besleme boyutundaki kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



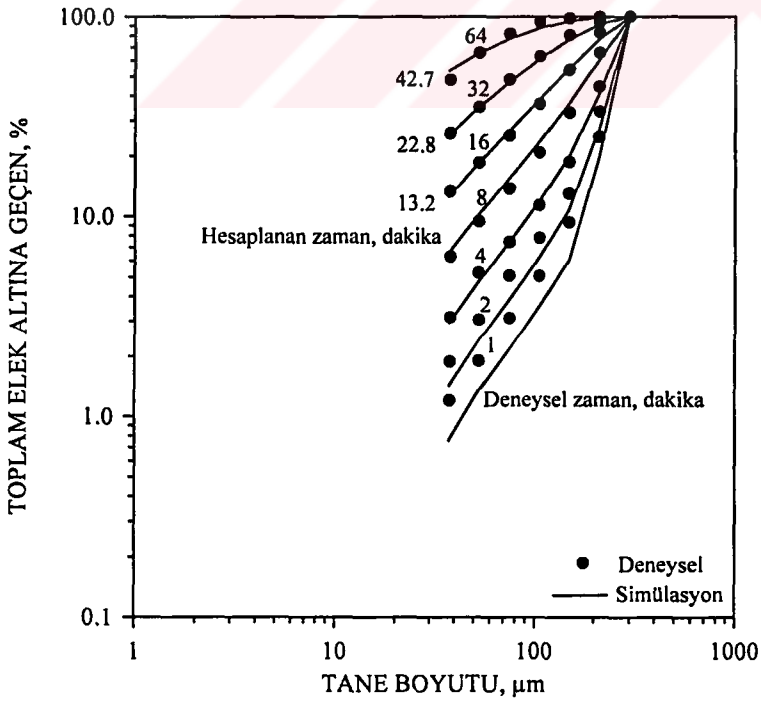
Şekil 109. $-300+212 \mu\text{m}$ besleme boyutundaki kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



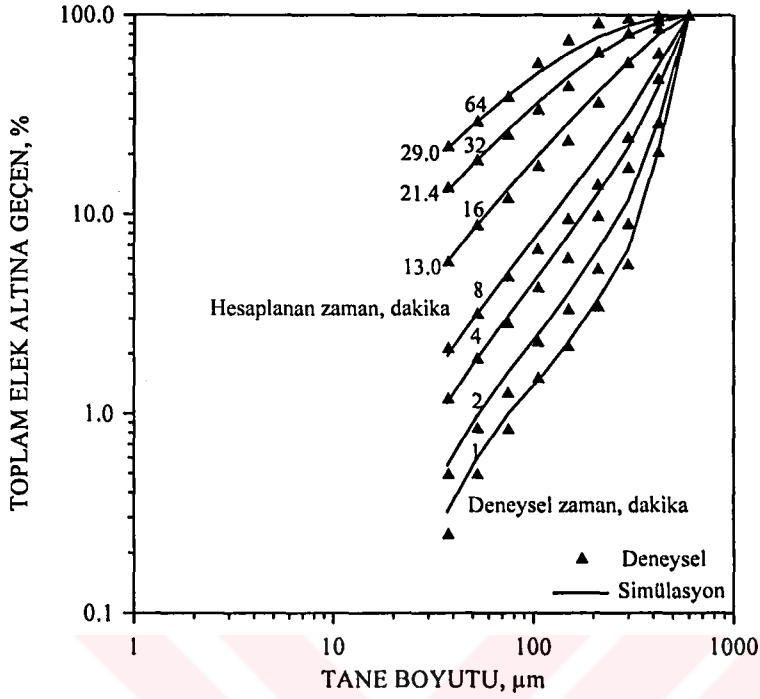
Şekil 110. $-600+425 \mu\text{m}$ besleme boyutundaki kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



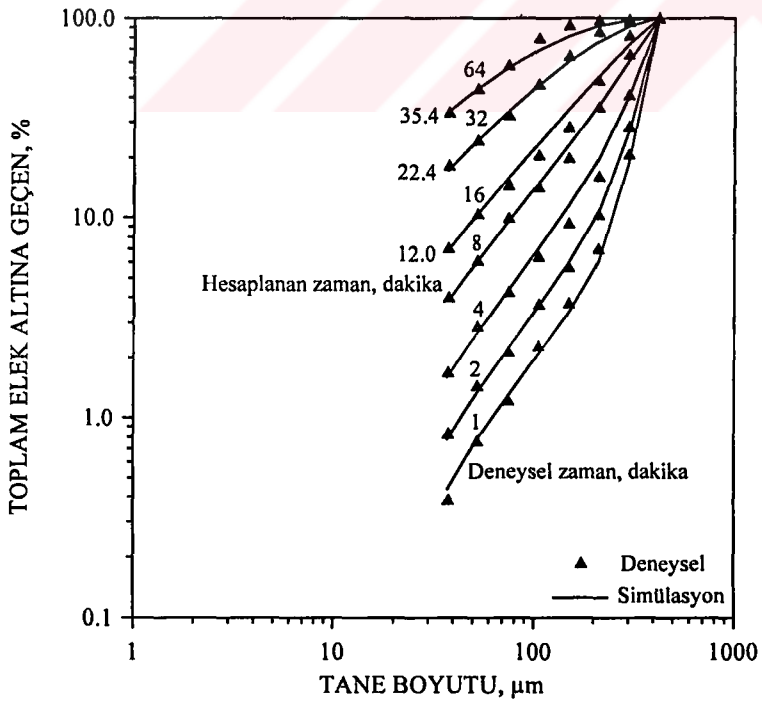
Şekil 111. -425+300 µm besleme boyutundaki kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



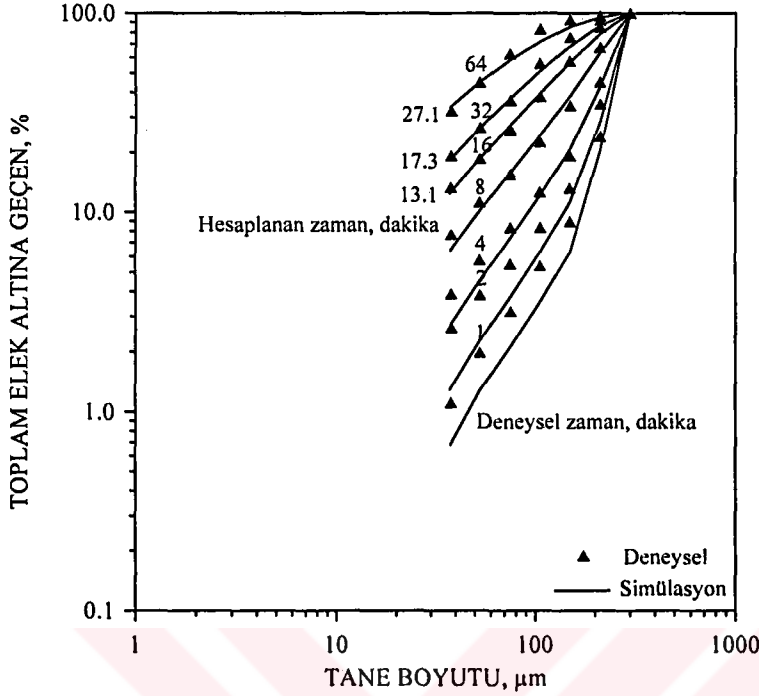
Şekil 112. -300+212 µm besleme boyutundaki kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



Şekil 113. -600+425 µm besleme boyutundaki kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



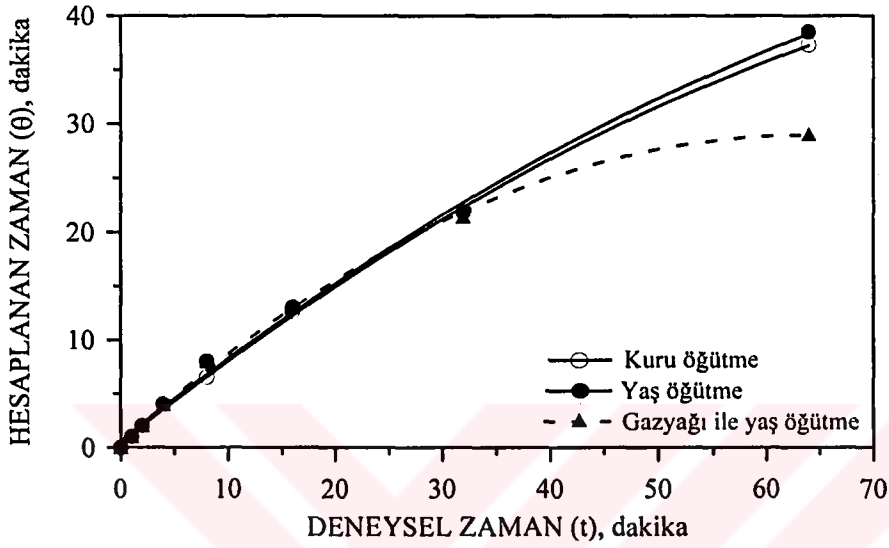
Şekil 114. -425+300 µm besleme boyutundaki kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu



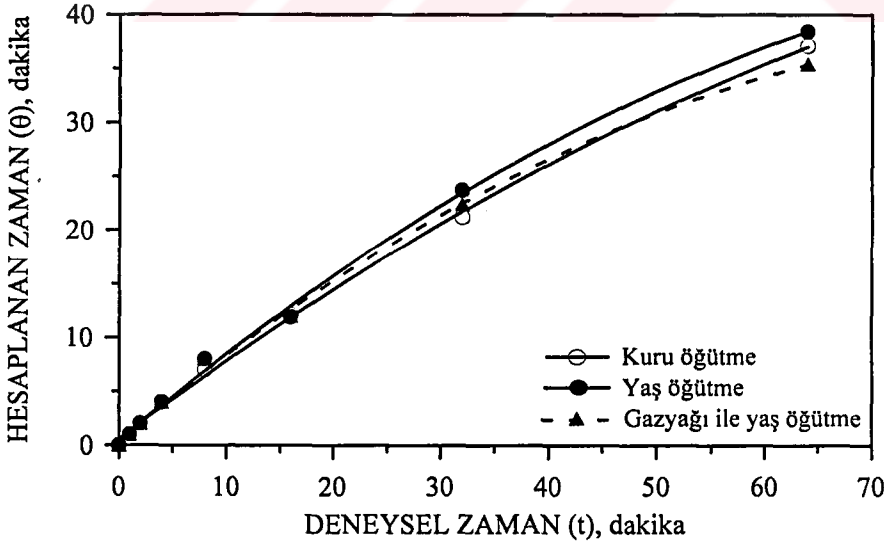
Şekil 115. -300+212 µm besleme boyutundaki kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ve simülasyonu

Simülasyonla elde edilen verilerin analizi sonucu; kömürün -600+425 µm, -425+300 µm ve -300+212 µm besleme boyutlarının kuru öğütülmesinde 8 dakikalık öğütme süresine kadar, yaş ve gazyağı ile yaş öğütme için ise 16 dakikalık öğütme süresine kadar deneysel olarak belirlenen ürün tane boyut dağılımları ile simülasyon değerlerinin birbirine yakın ve uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak, belirtilen bu öğütme sürelerinden sonra simülasyon ile belirlenen değerler deneysel olarak belirlenen değerlerden (yavaşlama etkisi nedeniyle) daha ince ürün tane boyut dağılımları vermektedir. Bu farkı gidermek için kuru öğütmede 8 dakikadan itibaren, yaş ve gazyağı ile yaş öğütmede ise 16 dakikalık öğütme süresinden itibaren 53 µm tane boyutunda, bir boyutta geçen miktarı baz alarak (one point fit yaklaşımı kullanılarak) simülatör ile belirlenen değer, deneysel olarak belirlenen değere programda eşlenmiştir. Bu yaklaşım ile elde edilen hesaplanan zaman (θ) ile deneysel zaman (t) arasındaki ilişki -600+425 µm, -425+300 µm ve -300+212 µm besleme boyutları için sırasıyla

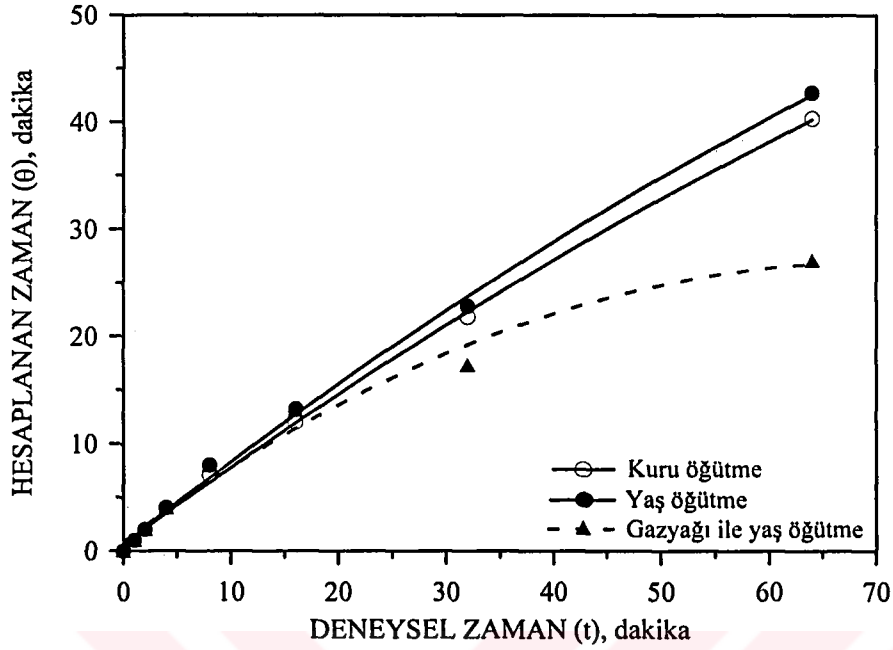
Şekil 116, 117 ve 118’de verilmiştir. Simülâtör ile hesaplanan zaman, deneysel zamandan daima küçük bulunmaktadır ($\theta \leq t$).



Şekil 116. -600+425 µm besleme boyutundaki kömür için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki

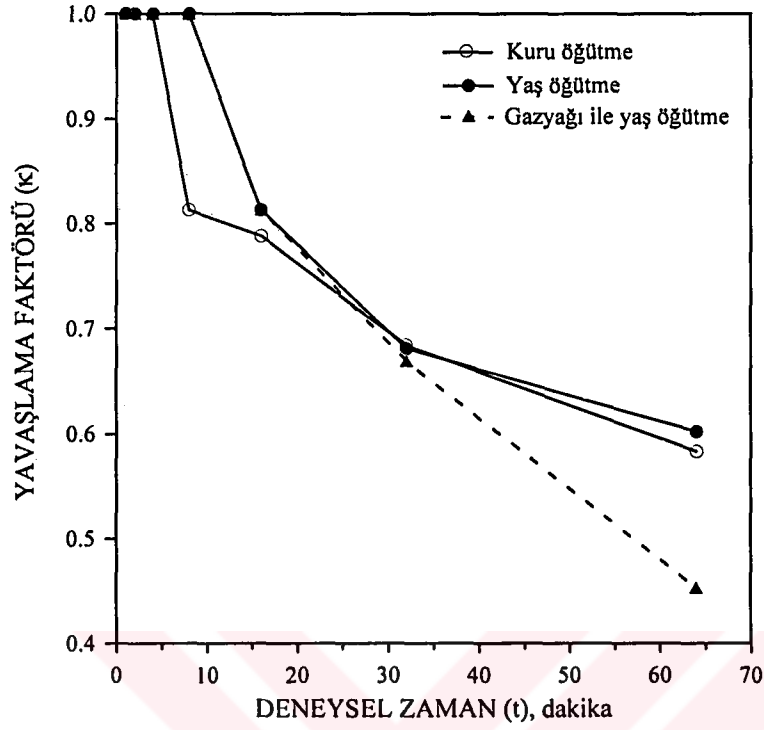


Şekil 117. -425+300 µm besleme boyutundaki kömür için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki

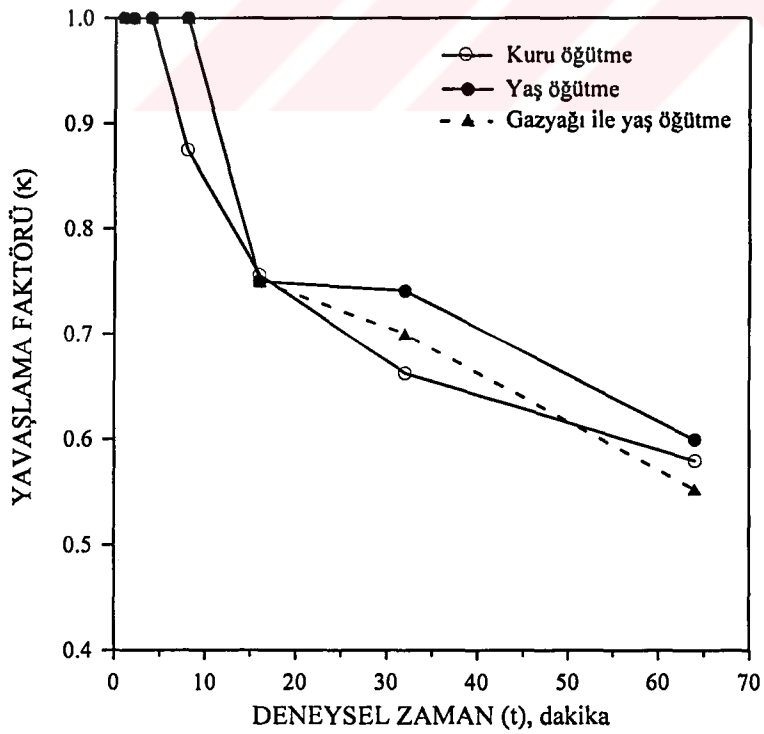


Şekil 118. -300+212 μm besleme boyutundaki kömür için hesaplanan zaman ile deneysel zaman arasındaki ilişki

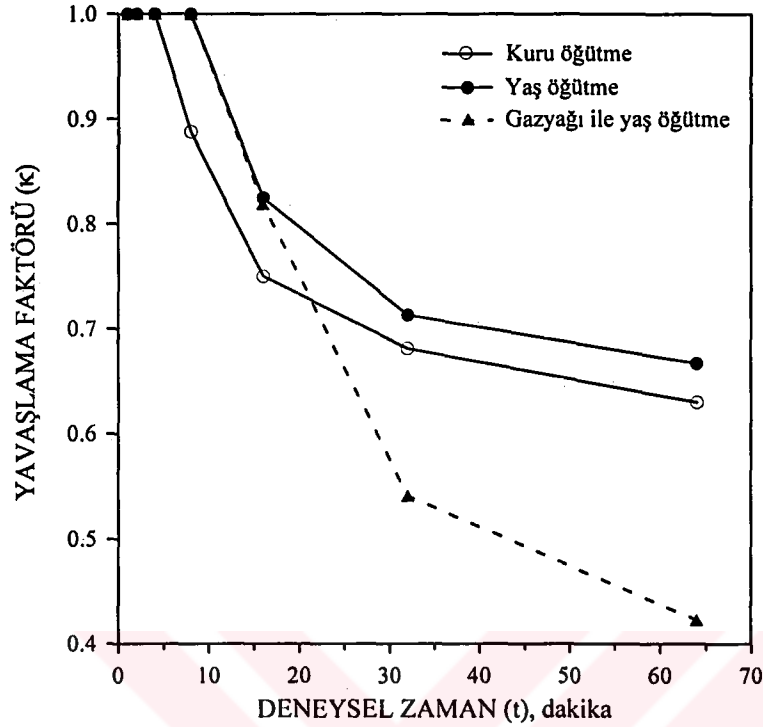
Yavaşlama faktörünün (κ) deneysel zaman ile değişimi ise -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları için sırasıyla Şekil 119, 120 ve 121’de verilmiştir. Söz konusu şekillerde görüldüğü gibi öğütme süresi arttıkça κ değeri azalmaktadır, yani öğütme işlemi ilerledikçe yavaşlama etkisi daha da belirginleşmektedir.



Şekil 119. -600+425 μm besleme boyutundaki kömür için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi

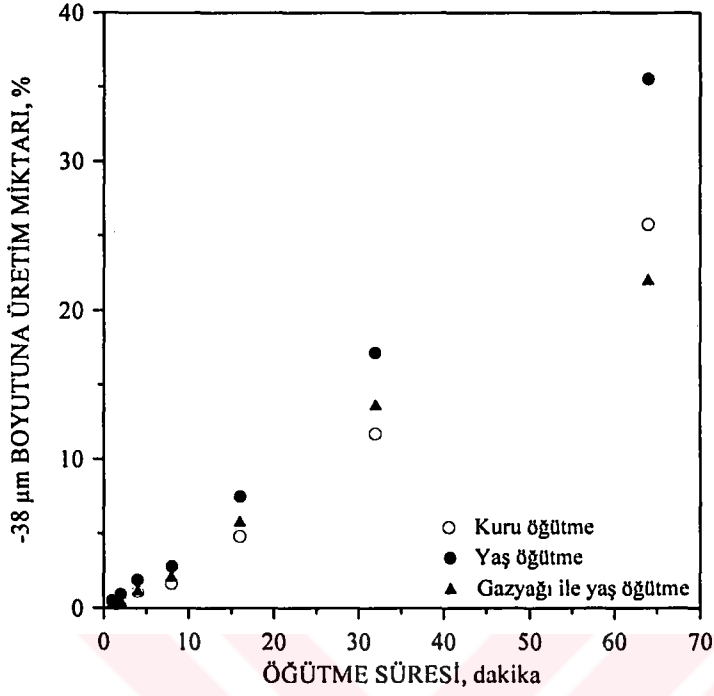


Şekil 120. -425+300 μm besleme boyutundaki kömür için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi

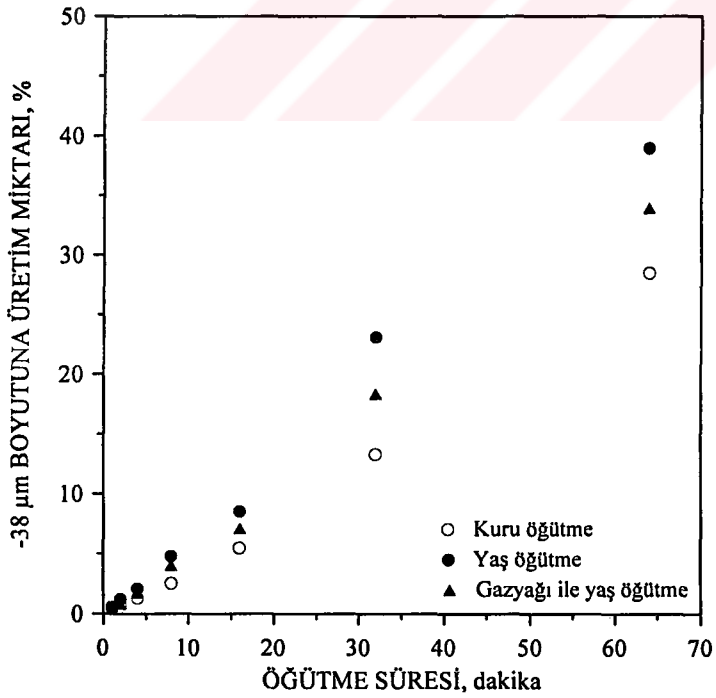


Şekil 121. -300+212 μm besleme boyutundaki kömür için deneysel zaman ile yavaşlama faktörünün değişimi

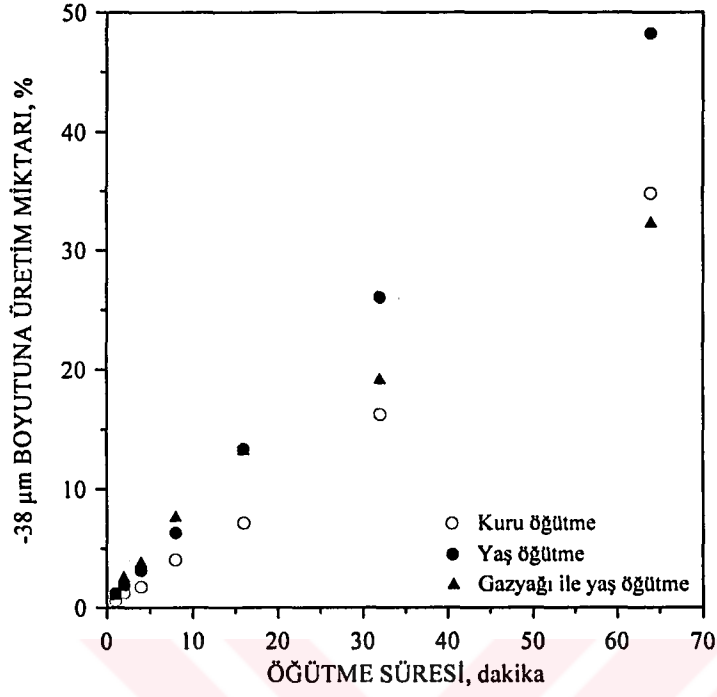
-600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutu kömürün öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesi sonucu -38 μm tane boyutuna geçen miktarlar sırasıyla Şekil 122, 123 ve 124'de verilmiştir. Söz konusu şekillerde görüldüğü gibi kömürün yaş öğütülmesi ile kuru öğütmeye göre -38 μm boyutuna geçen malzeme miktarı daha fazladır. Gazyağı ilavesi ile yapılan yaş öğütme işleminde ise yaş öğütmeye oranla kırılma hızlarının azalmasına paralel olarak -38 μm tane boyutuna geçen malzeme miktarı da azalmaktadır. -300+212 μm besleme boyutu kömürün ise gazyağı ile yaş öğütülmesinde 16 dakikalık öğütme süresine kadar kırılma hızlarının yaş öğütmeye göre yüksek olmasına paralel olarak, -38 μm boyutu malzeme miktarı da artmaktadır. Ancak, daha ileri öğütme sürelerinde yavaşlama etkisinin yaş öğütmeye oranla daha yüksek oluşu nedeniyle azalma görülmektedir.



Şekil 122. -600+425 µm besleme boyutundaki kömürün öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları



Şekil 123. -425+300 µm besleme boyutundaki kömürün öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları



Şekil 124. -300+212 µm besleme boyutundaki kömürün öğütme süresine bağlı olarak kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmesi sonucu -38 µm boyutuna geçen üretim miktarları

3.2. Öğütme ve Simülasyon Bulgularının Değerlendirilmesi ve Tartışılması

Kalsit, barit ve linyit kömürünün kırılma parametrelerinin (S_i ve $B_{i,j}$) belirlenmesi için yapılan öğütme deneyleri (kuru, yaş ve kimyasal maddeler yardımıyla yaş öğütme) ve ürünlerin tane boyut dağılımları ile bunların simülasyonu çalışmalarından aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

1. Çalışılan minerallerden kalsit, barit ve kömürün kırılma parametrelerinden biri olan ve kırılma hızlarının büyüklüğünü tanımlayan a_T değeri dikkate alınarak kolaydan zora doğru bir kırılma sıralaması yapıldığında önce barit, sonra kalsit ve en sonunda kömür gelmektedir. a_T değerinin büyüklüğü kırılma hızlarının da büyüklüğünü ifade etmekte ve bu değer her üç öğütme tipi içinde baritten kömüre doğru aynı eğilimde azalmaktadır (Tablo 11). Yine her üç mineral için yaş öğütme işlemi ile belirlenen a_T değeri, kuru öğütme için belirlenenden yüksek olup, bu yaş öğütme işleminin kuru öğütmeden daha hızlı olduğunu ifade etmektedir. Kalsit ve barit mineralinin kimyasal madde ile yaş öğütülmesi için belirlenen a_T değerleri, yaş öğütme için belirlenen değerlerden yüksektir, ancak kömür için düşüktür. Bu ise kalsit ve barit mineralinin kimyasal madde ile yaş öğütülmesiyle elde edilen kırılma hızlarının yaş öğütmeden hızlı olduğunu, kömür için ise kullanılan kimyasal maddenin kırılma hızlarını azalttığını ifade etmektedir.

Tablo 11. Barit, kalsit ve kömürün kırılma parametreleri ile kırılma özelliklerinin karşılaştırılması

Mineral	Kuru öğütme				Yaş öğütme				Kimyasal madde ile yaş öğütme			
	a_T , dak ⁻¹	γ	ϕ	β	a_T , dak ⁻¹	γ	ϕ	β	a_T , dak ⁻¹	γ	ϕ	β
Barit	0.349	0.85	0.56	4.90	0.369	0.71	0.52	5.04	0.379	0.70	0.50	5.18
Kalsit*	0.270	1.10	0.55	5.10	0.335	0.94	0.58	5.17	0.363	0.93	0.56	5.34
Kömür	0.127	1.58	0.58	7.11	0.135	1.45	0.63	6.45	0.119	1.61	0.65	6.90

* Kimyasal madde: SDDS ile bulunan değerler

2. Ürün boyut dağılımının inceliğini ifade eden ve boyut dağılımının karakterine çok duyarlı olan B_{ij} parametresi γ 'dır. γ değerinin azalması, ürün tane boyut dağılımının inceliğinin artmasını ifade eder. Bu parametre, çalışılan mineraller için karşılaştırıldığında; en ince ürün boyut dağılımı veren mineralin barit, sonra kalsit ve en sonunda da kömürün geldiği anlaşılmaktadır (Tablo 11). Ayrıca, her üç mineralin yaş öğütme için belirlenen γ değerinin kuru öğütme için belirlenenden düşük olduğu, yani yaş öğütme işlemi ile daha ince tane boyut dağılımına sahip ürün elde edildiği anlaşılmaktadır. Yine barit ve kalsit için kimyasal madde ile yaş öğütme için belirlenen γ değerinin, yaş öğütme için belirlenenden nispeten düşük olduğu görülmektedir. Ancak kömür için bu değer artmakta, yani kullanılan kimyasalın (gazyağı) ürün tane boyut dağılımının inceliğini azalttığı (öğütmeyi olumsuz yönde etkilediği) belirlenmiştir.

B_{ij} parametresi β ise her üç mineral için ve her üç öğütme tipinde de baritten kömüre doğru artmaktadır. β değerinin artması, besleme boyutuna yakın boyutların kırılmaya karşı olan direncinin artmasını ifade eder. Yani, daha kolay kırılan barit minerali için bu değer en düşük, zor kırılan kömür için ise bu değer en yüksektir. Ayrıca, β değeri yine kalsit ve barit minerali için kuru öğütmeden kimyasal madde ile yaş öğütmeye doğru artmaktadır. Bu kuru öğütme işleminde besleme boyutuna yakın boyutların daha az dirence maruz kaldığını ifade eder. Ancak, kömürde bu ilişki açık değildir. Literatürde de, kuvarsın kuru öğütülmesi için belirlenen β değerleri, yaş öğütülmesine göre daha küçük bulunmuştur (Austin ve Ark., 1990; Yekeler ve Ark., 2001).

Besleme boyutuna yakın boyutların daha alt boyutlara nasıl geçtiğini ifade eden bir diğer parametre olan ϕ değeri arttıkça, bu boyutların daha yüksek oranda alt boyutlara geçtiği literatürde ifade edilmektedir. Ayrıca, ϕ değerinin bazen besleme boyutunun inceliğiyle arttığı belirtilmiştir (Austin ve Ark., 1984). ϕ değeri, çalışılan mineraller için değerlendirildiğinde; genel olarak baritten kömüre doğru bu değer arttığı görülmektedir. Örneğin, barit mineralinin yaş öğütülmesi için bu değer 0.52 iken, kömür için 0.63'tür. Her

ne kadar literatürde, ϕ değerinin besleme boyutuna yakın boyutların kırılmasını tanımladığı ifade edilse de, ürün boyut dağılımının inceliğinin artması “düşük γ - yüksek ϕ ” tanımı ile de yapılmaktadır (Austin ve Ark., 1984; Klimpel, 1997b). Bu tanıma göre, ϕ değerinin barit minerali için daha yüksek olması beklenir. Ancak, daha düşük olmasının nedeni, γ değerlerinin incelenmesiyle açıklanabilir. Aynı öğütme tipi için baritin γ değeri 0.71, kömürün ise 1.45'tir. Yani, kömürün γ değeri barit için belirlenenden yaklaşık iki kat daha fazladır. γ , kırılma dağılım eğrisinin eğimi, ϕ ise kesişme değeri olup, kömürün γ değerinin (doğrunun eğimi) barite göre çok yüksek olduğu için (eğim çok fazla) daha yüksek ϕ değeri vermesi normaldir. Aynı durum, kalsit ile barit minerali için de söylenebilir. Tablo 12'de bazı malzemelere ait kırılma dağılım parametreleri verilmiş olup, benzer durum literatür sonuçlarında da gözlenmektedir. Tablo 12 genel olarak değerlendirildiğinde; en düşük γ değerine sahip Pennsylvania kireçtaşının en düşük ϕ değerine ve düşük bir β değerine sahip olduğu; en yüksek γ değerine sahip North Carolina kuvarsının ise en yüksek ϕ ve β değerine sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, ürün tane boyut dağılımının inceliğinin ifadesinde ϕ değerinin kullanılmasının tam olarak net bir ilişki vermediği açıktır. Kırılma dağılım parametreleri ile minerallerin karşılaştırılmasında ürün boyut dağılımını asıl tanımlayan γ değerinin çok önemli olduğu, β ve ϕ değerlerinin ise nispeten karşılaştırmalarda etkin olmadığı (sadece besleme boyutuna yakın boyutların tanımlanmasında uygun olduğu) söylenebilir.

Tablo 12. Bazı malzemelere ait kırılma dağılım parametreleri
(Austin ve Ark., 1984)

Mineral	Kırılma dağılım parametreleri		
	γ	ϕ	β
Pennsylvania kireçtaşı	0.65	0.28	3.2
Bakır cevheri	0.70	0.40	4.3
Klinker L	0.75	0.34	4.0
Lower Freeport kömür	0.80	0.50	2.3
Klinker P	0.85	0.34	4.0
Belle Ayre So. Wyoming kömür	0.90	0.40	2.8
Ohio No. 9 kömür	0.95	0.50	3.5
Shamokin antrasit	1.00	0.40	3.1
Curuf klinker P	1.25	0.58	4.3
North Carolina kuvars	1.30	0.58	5.8

3. Kalsit, barit ve linyit kömürü üzerinde yapılan öğütme çalışmalarında, kullanılan porselen değirmende 600 μm besleme tane boyutundan büyük besleme boyutları için (-1700+1180 μm , -1180+850 μm ve -850+600 μm besleme boyutları) kırılma hızlarının azaldığı ve birinci derece olmayan kırılma kinetiğinin izlendiği belirlenmiştir. Yani, öğütme işlemi bu tane boyutundan sonra normal kırılma bölgesinden anormal kırılma bölgesine geçmektedir. Bunun nedeni, artık bilyalar tarafından tanelerin kavranıp kırılmasının zorlaşmasıdır. Literatürde 25 mm'lik çelik bilyalar için bu geçiş boyutunun yaklaşık olarak 1 mm'nin üzerinde verilmesine rağmen (Austin ve Ark., 1984), değirmen çapı ve bilya yoğunluğu da bu değer üzerinde etkilidir. Bu durum, kullanılan porselen değirmenin çapının nispeten düşük olması (128 mm) nedeniyle, değirmende meydana gelen katarakt etki sırasında darbe etkisinin iri tanelerin kırılmasında yetersiz kalmasına bağlanabilir. Aynı şekilde, kullanılan porselen bilya yoğunluğunun düşük olması da (3.75 gr/cm^3) uygulanan kuvvetin azalmasına neden olmaktadır.
4. Kullanılan porselen değirmen ve porselen öğütücü ortam ile kuru öğütme işlemi için elde edilen kırılma hızları, benzer koşullarda çelik değirmende ve çelik öğütücü ortam için bulunan (Yekeler ve Ark., 1997) kırılma hızlarına

göre ortalama 2.5 kat daha yavaş kalmaktadır. Bilya yoğunluğunun azalması ile kırılma hızlarının azaldığı literatürde belirtilmektedir (Austin ve Ark., 1984).

5. Çalışılan her üç mineral için normal kırılma bölgesinde (-600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları) yapılan kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütme testlerinde üst boyutun kırılma hızlarının birinci derece kırılma kinetiği izlediği belirlenmiştir. Ancak, kömürün kimyasal madde ile yaş öğütülmesinde 16 dakikalık öğütme süresinden sonra yavaşlama eğilimine girilmektedir.
6. Kalsit, barit ve kömür için normal kırılma bölgesinde yaş öğütme işlemi kuru öğütmeden daha hızlıdır. Besleme boyutuna bağlı olarak belirlenen $S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$ oranları Tablo 13'de verilmiştir. Söz konusu tablodan görüldüğü gibi değirmene beslenen tane boyutu incelidikçe bu oran, her üç mineral için de artmaktadır. Yani, yaş öğütme işlemi ince besleme boyutlarının öğütülmesinde daha etkin olmaktadır. Ayrıca, kalsit mineralinin yaş öğütülmesinin kuru öğütmeye göre diğer minerallerle karşılaştırıldığında daha hızlı olduğu belirlenmiştir.

Tablo 13. Değirmen besleme boyutuna bağlı olarak $S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$ oranları

Besleme tane boyutu, μm	$S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$		
	Kalsit	Barit	Kömür
-1700+1180		0.87	0.50
-1180+850	1.28	0.90	0.50
-850+600	1.18	0.99	0.61
-600+425	1.25	1.07	1.07
-425+300	1.28	1.15	1.11
-300+212	1.31	1.21	1.13

7. Anormal kırılma bölgesinde ise kalsit mineralinin yaş öğütülmesi kuru öğütmeye oranla daha hızlı iken, barit ve kömürün kuru öğütülmesi yaş

öğütmeden daha hızlı olmaktadır (Tablo 13). Bu durum, yaş öğütme işleminin kalsit için daha uygun olmasına (normal kırılma bölgesinde $S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$ oranları diğer minerallere göre daha yüksek) bir ölçüde bağlanabilir.

8. Kimyasal madde ile yaş öğütme testlerinde; kalsit mineralinin öğütülmesinde sodyum dodesil sülfat (SDDS), sodyum-oleat, Aero 845 ve oleik asit; barit mineralinin öğütülmesinde sodyum dodesil sülfat ve kömürün öğütülmesinde ise gazyağının etkisi araştırılmış olup, besleme boyutuna bağlı olarak $S_{i\text{-kimyasal}}/S_{i\text{-yaş}}$ oranları Tablo 14’de özetlenmiştir.

Tablo 14. Değirmen besleme boyutuna bağlı olarak $S_{i\text{-kimyasal}}/S_{i\text{-yaş}}$ oranları

Besleme tane boyutu, μm	$S_{i\text{-kimyasal}}/S_{i\text{-yaş}}$					
	Kalsit				Barit	Kömür
	SDDS	Sodyum-oleat	Aero 845	Oleik asit	SDDS	Gazyağı
-1700+1180					0.86	0.84
-1180+850	0.85	0.89	0.91	0.89	0.88	0.88
-850+600	0.92	0.94	0.99	0.94	0.90	0.95
-600+425	1.08	1.03	1.07	1.05	1.03	0.89
-425+300	1.11	1.05	1.05	1.09	1.04	0.93
-300+212	1.04	1.06	1.04		1.07	1.07

Kalsit ve barit mineralleri için kullanılan kimyasal maddeler, normal kırılma bölgesinde kırılma hızlarını artırmaktadır. Bu artış oranı, barit ve kısmen kömür için değirmen besleme tane boyutu inceldikçe artmaktadır. Ancak, kalsit için bu ilişki kullanılan kimyasal madde tipine göre farklılık göstermektedir.

Kömürün öğütülmesinde ise -300+212 μm besleme boyutu kısmen hariç gazyağı, öğütme işlemini yavaşlatmıştır. Bunun nedeni; öğütme ürünleri üzerinde yapılan ıslanma deney sonuçlarına dayanılarak, gazyağının kullanılan kömür için yeterince uygun bir kimyasal madde olmadığı veya kömür yüzeylerinin okside olması ve öğütme sırasında gelişen yavaşlama etkisinin gazyağı tarafından artırılması gösterilebilir. Barit mineraliyle karşılaştırıldığında, kimyasal maddenin ince boyutlarda daha etkili olması,

normal kırılma bölgesinde değirmene beslenen kömürün tane boyutu inceldikçe gazyağının yavaşlatıcı etkisinin azalarak -300+212 μm tane boyutunda da olumlu etki göstermesi, bu görüşü desteklemektedir. Ancak, birinci derece kırılma bölgesinde gözlenen bu olumlu etki, 16 dakikalık öğütme süresinden sonra olumsuz etkiye dönüşmektedir.

Kullanılan kimyasalların yaş öğütmeye göre kırılma hızlarını artırma oranı 1.03-1.11 kat arasında değişmektedir. Yaş öğütmenin kuru öğütmeye oranla 1.07-1.31 kat hızlı olması baz alındığında, bu oranın beklenen bir durum olması muhtemeldir. Çünkü sadece sisteme kimyasal madde ilavesi yapılmakta, herhangi başka bir koşulda değişiklik yapılmamaktadır. Lowrison (1979) ise öğütmeye yardımcı kimyasal maddeler kullanılarak öğütme oranında %20'lere kadar bir artış elde edilebileceğini ifade etmiştir.

Literatürde, "Rehbinder etkisi" olarak bilinen mekanizma, yüzey aktif maddelerin adsorpsiyonu sonucu katıların yüzey serbest enerjisinin azalması esasına dayanır (Rehbinder, 1931). Ufalama işlemlerinde malzemelerin kırılması demek yeni yüzeylerin oluşturulması demektir, bunun için gerekli enerji miktarı oluşturulan yüzeylerin yüzey serbest enerjisiyle orantılıdır (Ryncarz ve Laskowski, 1977; El-Shall ve Somasundaran, 1984). Yüzey serbest enerjisi nasıl olursa olsun azaldığı takdirde, aynı yüzey alanını oluşturmak için gerekli enerji miktarının da daha az olacağı beklenilebilir. Bu kural üzerine, öğütme sırasında minerallere yüzey aktif madde adsorpsiyonunun öğütme işleminin etkinliğini artıracığı ifade edilir (El-Shall ve Somasundaran, 1984).

9. Anormal kırılma bölgesinde (-1700+1180 μm , -1180+850 μm ve 850+600 μm besleme boyutları) her üç mineral için de kullanılan kimyasal maddeler öğütmeyi olumsuz yönde etkilemekte olup, kırılma hızları yaş öğütmeden yavaş kalmaktadır (Tablo 14). Bunun nedeni değirmene beslenen bu boyut fraksiyonlarının çalışılan öğütücü ortama göre iri olması ve öğütmede etkin olan mekanizmalardan biri olan kavramanın (*nipping*) kimyasal madde varlığında daha da etkin olamaması gösterilebilir. Çünkü, kimyasal

maddelerin öğütülen malzeme ve bilyalar üzerine de adsorplanması, bu birimler arasındaki dinamik sürtünmeyi azaltmaktadır. Böylelikle, anormal kırılma bölgesinde kavramanın daha da zorlaşması sözkonusudur. Tablo 14'de görüldüğü gibi kullanılan kimyasal maddenin olumsuz etkisi kalsit ve barit minerali (ve kısmen kömür) için anormal kırılma bölgesinden normal kırılma bölgesine yaklaşıldıkça azalarak, normal kırılma bölgesinde 1'den büyük bir değer almaktadır.

10. Kalsit, barit ve kömürün $-600+425 \mu\text{m}$, $-425+300 \mu\text{m}$ ve $-300+212 \mu\text{m}$ besleme boyutlarının değirmende öğütülmesi ile elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımlarının simülasyonu PSUSIM adlı paket program (Austin ve Ark., 1989) ile yapılmıştır. Öğütme testleri ile belirlenen kırılma parametreleri, birinci derece ve birinci derece olmayan kırılma bölgeleri için ürün tane boyut dağılımlarının simülasyonunda kullanıldığında, simülasyon sonuçları ile deneysel değerler birbirleriyle çok iyi uyum sağlamaktadır.

Değirmenlerde öğütme süresi ilerledikçe, üretilen ince malzeme miktarının artması öğütme işleminin yavaşlamasına neden olmaktadır. Yavaşlama etkisi; bilyaların ince malzemeyle kaplanması, ince tanelerin oluşturduğu yatağın akışkana benzer özellik göstermesi, özellikle kuru öğütmede ince tanelerin peletlenerek daha büyük taneler oluşturması ve yaş öğütme işleminde pulp viskozitesinin artması sonucu değirmen içinde malzemenin hareketinin zorlaşması şeklinde kendini gösterebilir. Bunların sonucunda, taneler bilyaların çarpışma bölgesinden kaçarak kırılma için gerekli olan darbeye maruz kalmazlar veya bu darbe kuvvetinin üzerlerindeki etkisi azalır ve sonuçta öğütme zorlaşarak yavaşlama eğilimine girmektedir.

Simülasyon programı yardımıyla öğütme işleminde yavaşlama etkisinin incelenmesi ile aşağıdaki bulgulara ulaşılabılır.

11. Simülasyon programı ile kalsit minerali için yavaşlama etkisi nedeniyle oluşan birinci derece olmayan kırılma bölgesi, -600+425 μm besleme boyutunun kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütülmesinde 4 dakikalık öğütme süresinden itibaren; -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutları için ise 8 dakikalık öğütme süresinden itibaren başladığı, belirlenmiştir.
12. Barit minerali için yavaşlama etkisi -600+425 μm besleme boyutunun kuru öğütülmesi için 2 dakika, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülmesi için ise 4 dakikalık öğütme süresinden itibaren; -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutlarının ise kuru öğütülmesinde 4 dakika, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülmesinde ise 8 dakikalık öğütme süresinden itibaren başlamaktadır.
13. Kömürün ise yavaşlama etkisi, -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyutlarının kuru öğütülmesinde 8 dakika, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülmesinde ise 16 dakikalık öğütme süresinden itibaren başladığı simülasyon programı ile belirlenmiştir.
14. Barit ve kömür için kuru öğütmede yavaşlama etkisinin, yaş öğütmeden daha erken sürelerde başladığı belirtilmiştir (Bulgu 12 ve 13). Yani, yaş öğütme işlemi, değirmende süreye bağlı olarak artan ince tane miktarının yavaşlatıcı etkisini geciktirmektedir. Ancak, kalsit mineralinin kuru ve yaş öğütülmesinde aynı sürelerde yavaşlama etkisi başlamaktadır (Bulgu 11). Her üç mineral için de aslında yaş öğütme ile daha ince tane boyutlarına daha kısa sürede ulaşılmaktadır, yani yaş öğütme işlemi değirmende gelişen yavaşlama etkisini geciktirmektedir. Ancak, kalsitin yaş öğütülmesinin kuru öğütülmesine oranla, barit ve kömür ile karşılaştırıldığında daha etkili olması nedeniyle aynı sürelerde yavaşlama etkisi başlamaktadır. Tablo 11'de verilen a_T değerleri ($x_0=0.65$ mm tane boyutuna karşılık gelen kırılma hızı değeri,

dak⁻¹) değerlendirildiğinde; kalsit için $a_{T\text{-yaş}}/a_{T\text{-kuru}}$ oranı 1.24 iken, barit ve kömür için 1.06'dır. Yine, Tablo 13'deki $S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$ oranları değerlendirildiğinde en yüksek oranın kalsit için ortalama 1.28, barit ve kömür için sırasıyla ortalama 1.14 ve 1.10 olduğu belirlenir. Bu nedenle kalsit mineralinin yaş öğütülmesi ile değirmende oluşan ince tane üretimi daha hızlı artmakta ve buna paralel olarak da yavaşlama etkisi daha erken sürelerde (kuru öğütme ile aynı sürede) başlamaktadır. Literatür sonuçları değerlendirildiğinde; kuvarsın yaş öğütülmesinin kuru öğütmeye oranla 1.5 kat daha hızlı olduğu ve simülasyon ile de yavaşlama eğiliminin kuru öğütmeden daha erken sürelerde başladığı ifade edilmiştir (Austin ve Ark., 1990; Yekeler ve Ark., 2001).

Literatür sonuçları ile yapılan çalışmaların sonuçları değerlendirildiğinde; bir mineral için $S_{i\text{-yaş}}/S_{i\text{-kuru}}$ oranı arttıkça, yaş öğütme işleminde kuru öğütmeden daha erken sürelerde yavaşlama etkisinin gözlemlendiği (kuvars); bu oran azaldıkça bu sürelerin birbirine hemen hemen eşit olduğu (kalsit) ve sonunda kuru öğütme işleminde yavaşlama eğiliminin daha erken sürelerde başladığı (barit ve kömür) söylenebilir.

15. Barit, kalsit ve kömürün a_T değerleri dikkate alındığında en yüksek değerin barite, sonra kalsite ve en sonunda kömüre ait olduğu belirlenmiştir. B_{ij} parametresi olan γ (incelik faktörü) barit minerali için en küçük, sonra kalsit ve en yüksek ise kömür için bulunmuştur (Tablo 11). Barit, kalsit ve kömür için yavaşlama etkisinin başlangıç süreleri genel olarak dikkate alındığında ise önce baritin, sonra kalsitin ve en sonra da kömürün yavaşlama eğilimine girdiği yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda belirlenmiştir. Yani, a_T değeri en yüksek (en hızlı kırılan) ve γ değeri en küçük (en ince boyut dağılımı veren) olan barit minerali nispeten en önce yavaşlama etkisine maruz kalmakta; a_T değeri en küçük (en yavaş kırılan) ve γ değeri en yüksek (en iri boyut dağılımı veren) olan kömür ise en geç yavaşlama etkisine maruz kalmaktadır.

16. Simülasyon programı ile bulunan hesaplanan zamanın (θ) artması, yavaşlama faktörü (κ) değerinin büyük olmasına; bu ise öğütmenin hızlı olduğuna ve/veya yavaşlama etkisinin az olduğuna işaret eder. Hesaplanan zaman (θ)-deneysel zaman (t) eğrileri ve yavaşlatıcı faktör (κ)-deneysel zaman eğrileri dikkate alınır; kalsit mineralinin kuru öğütülmesi ile bulunan θ değerlerinin, yaş öğütme ile bulunan değerlerden yüksek olmasının nedeni Bulgu (14)'de verilen ifadeler nedeniyle (Şekil 64, 65, 66, 67, 68 ve 69). Yani, yaş öğütme daha hızlı olduğu için yavaşlama etkisi de erken ve daha güçlü olarak kendini hissettirmektedir. Ancak, uzun öğütme sürelerinde (64 dakika) kuru öğütme için belirlenen θ değeri yaş öğütme için belirlenenden küçük kalmaktadır. Bu ise çok ince öğütmenin yaş öğütme ile daha kolay olduğunu ifade etmektedir (Şekil 64).

Barit (Şekil 90, 91, 92, 93, 94 ve 95) ve kömür (Şekil 116, 117, 118, 119, 120 ve 121) için ise yaş öğütme için bulunan θ değerleri, kuru öğütme için bulunan değerlerden büyük ve κ değerleri de daha yüksektir. Bu sonuçlar, yine Bulgu (14)'te verilen ifadelerle uyumludur.

Kimyasal madde ile yaş öğütme ve yaş öğütme için belirlenen θ değerleri, kalsit ve barit mineralleri için genel olarak birbirine yakındır. Ancak, kalsit için belirlenen SDDS ile yaş öğütmeye ait θ değerleri, yaş öğütme için elde edilen değerlerden biraz daha yüksektir, fakat diğer kimyasal maddeler (sodyum oleat, Aero 845 ve oleik asit) ile elde edilen değerler nispeten daha düşük olup, benzer eğilim barit minerali için de söz konusudur.

Kalsit ve barit mineralleri için κ değerleri genel olarak değerlendirilirse, kimyasal madde ile yaş öğütme işlemleriyle elde edilen değerlerin yaş öğütmeye göre daha küçük olduğu bulunmuştur. Buna paralel olarak θ değerlerinin de düşük olması, kimyasal madde ile yaş öğütme işlemlerinde yavaşlatıcı etkinin yaş öğütmeye oranla daha fazla olduğunu ifade etmektedir. Ancak, ürün tane boyut dağılımı inceliğinin kimyasal madde kullanılarak kalsit ve barit mineralleri için düşük oranda arttığı bulunmuştur. Bu ters ilişki, simülasyon programına girilen üst boyutların kırılma hızını tanımlayan a_T

değerinin kimyasal madde ile yaş öğütme için daha yüksek olmasına rağmen, bu değer in ürün inceliğine tam olarak yansımayaşından kaynaklanmaktadır. Yani üst boyutların kimyasal maddeler ile nispeten daha hızlı kırılması söz konusudur. Ayrıca, simülasyon programında ürün inceliğini tayin eden γ değeri, kimyasal madde ile yaş öğütme ve yaş öğütme için birbirine çok yakın bulunmuştur (Tablo 11).

Kömür için ise kullanılan kimyasal madde (gazyağı) öğütme işlemini belirgin bir şekilde olumsuz etkilemekte (a_T değeri daha düşük ve γ değeri daha yüksek) (Tablo 11 ve 14) ve bu simülasyon sonuçlarında da kendini açık olarak göstermektedir. Yani, kimyasal madde ile yaş öğütme için belirlenen θ ve κ değerleri yaş öğütmeye oranla daha düşük bulunmuştur. Ayrıca, öğütme süresi ilerledikçe bu olumsuz etki daha da belirginleşmektedir.

17. Kalsit, barit ve kömürün değirmene beslenen boyut fraksiyonunun (üst boyut) kırılma hızlarının birinci derece kırılma kinetiği izlemesine rağmen, öğütme süresinin ilerlemesine bağlı olarak değirmende ince tane miktarının çoğalması sonucunda yavaşlama etkisinin oluştuğu simülasyon programıyla yapılan çalışmalardan belirlenmiştir. Buna neden olarak, ince malzemenin öğütmeyi yavaşlatıcı etkilerine ilaveten, değirmene beslenen tane boyutu fraksiyonunun değirmendeki en iri boyuta sahip olması sebebiyle, kendisinden daha ince boyuta sahip tanelerin kırılmasını nispeten bir kalkan görevi görerek yavaşlatması da gösterilebilir.

3.3. Minerallerin İslanma Parametresinin (Kritik İslanma Yüzey Gerilimi, γ_c) Belirlenmesi

Kalsit, barit ve kömürün ıslanma özelliklerinin belirlenmesinde ıslanmayı karakterize eden kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerleri iki önemli metot olan Zisman temas açısı ölçüm yöntemi ve flotasyon tekniği ile belirlenmiştir.

3.3.1. Kalsit

Kalsit mineralinin ıslanma özelliklerinin belirlenmesi için değirmende normal kırılma davranışı gösteren -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyut fraksiyonlarının kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülmüş ürünleri kullanılmıştır. Kuru öğütme için 32. dakika ürünü, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ve sodyum oleat ile yaş öğütme için ise 16. dakika ürünleri üzerinde ıslanma özellikleri belirlenmiştir (Çünkü bu öğütme süresi sonunda elde edilen ürünler -212 μm boyut fraksiyonu olup, flotasyon ve ıslanma deneyleri için elverişli tane boyutudur). Elde edilen sonuçlar Tablo 15’de özetlenmiştir.

Kalsit mineralinin kuru, yaş ve kimyasal maddeler ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünler üzerinde yapılan temas açısı ölçümleri ve flotasyon deneylerinin sonuçları sırasıyla Ek 7.A ve Ek 7.B’de verilmiştir.

3.3.1.1. Temas açısı ölçüm yöntemiyle γ_c ’nin belirlenmesi

Zisman temas açısı ölçüm yöntemi ile değirmende kuru, yaş ve kimyasal madde olarak sodyum-oleatın kullanıldığı yaş öğütme ürünleri üzerinde belirlenen γ_c değerleri Şekil 125, 126 ve 127’de gösterilmiştir. Ayrıca, söz konusu şekillerde mineralin hidrofobluk derecesinin bir işareti olan doğrunun eğimi de ($\text{eğim}=-m_c$) verilmiştir. Bu sonuçlardan, değirmene beslenen tane boyutu inceldikçe, γ_c değerlerinin arttığı ve m_c değerlerinin ise azaldığı anlaşılmaktadır (Şekil 128). Bu ilişki, aşağıdaki ampirik eşitlik ile verilebilir:

Tablo 15. Kalsit mineralinin temas açısı ölçüm ve flotasyon yöntemi ile belirlenen γ_c değerleri

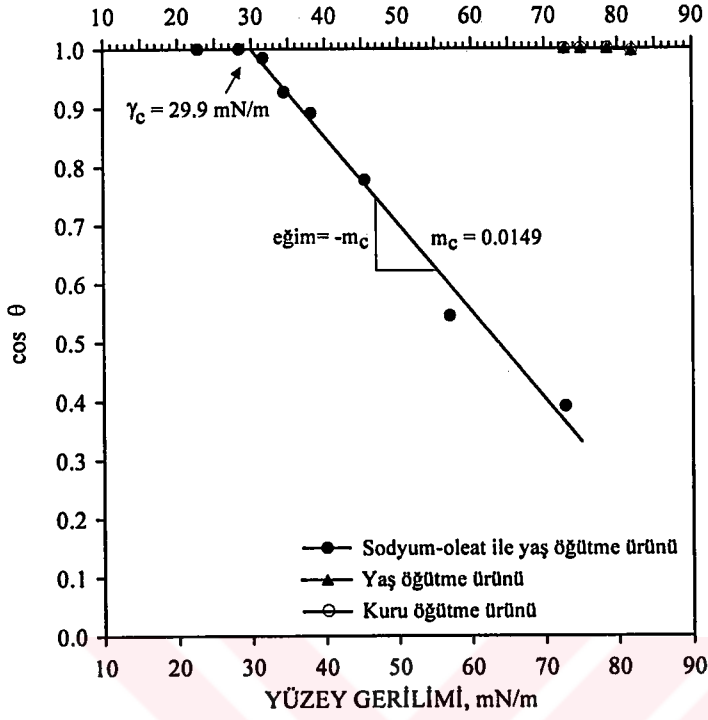
Öğütme şekli	Değirmene beslenen boyut, μm	Tespit edilen γ_c değerleri, mN/m		γ_c tespitinde kullanılan çözeltiler	Açıklama
		Temas açısı ölçüm yöntemi	Flotasyon yöntemi		
Kuru öğütme	-600+425	>72	>72	Saf su, %5, 10 ve 26 NaCl (ağırlıkça)	$\gamma_c > 72$ mN/m, hidrofilik davranış
	-425+300	>72	>72		
	-300+212	>72	>72		
Yaş öğütme	-600+425	>72	>72	Saf su, %5, 10 ve 26 NaCl (ağırlıkça)	$\gamma_c > 72$ mN/m, hidrofilik davranış
	-425+300	>72	>72		
	-300+212	>72	>72		
SDDS ile yaş öğütme, (2×10^{-4} M)	-600+425	-	34.0	Saf su, %10, 25, 38, 50 ve 62 Metil alkol (ağırlıkça)	$\gamma_c < 72$ mN/m, hidrofobik davranış
	-425+300	-	34.7		
	-300+212	-	34.9		
Sodyum-oleat ile yaş öğütme, (3.5×10^{-4} M)	-600+425	29.9	30.9	Saf su, %10, 25, 38, 50, 62 ve 75 Metil alkol (ağırlıkça)	$\gamma_c < 72$ mN/m, hidrofobik davranış
	-425+300	30.2	31.1		
	-300+212	30.5	31.4		

$$m_c = 3.8 \times 10^{-5} x_i - 0.0081 \quad (\text{Kimyasal madde: Sodyum-oleat}) \quad (45)$$

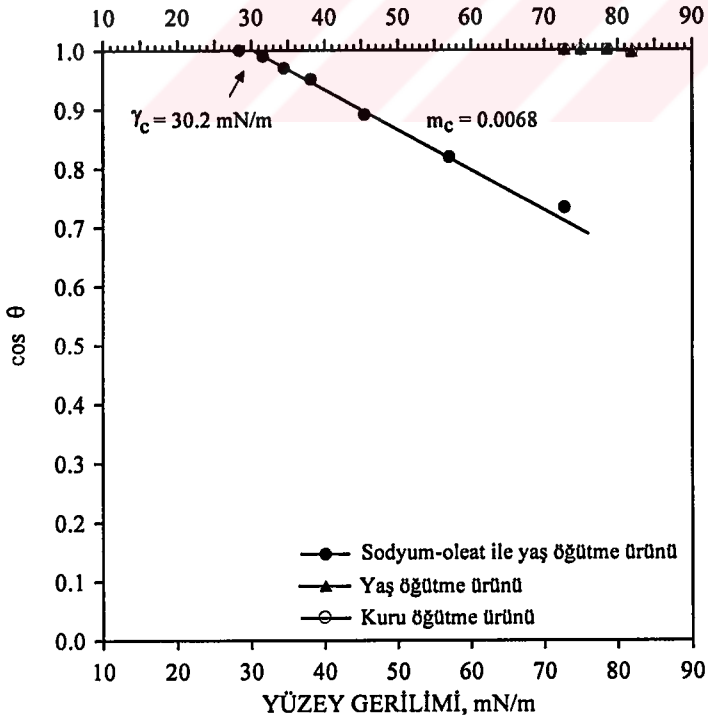
Burada; m_c Zisman temas açısı ölçüm eğrisinin eğimi, x_i ise değirmene beslenen tane boyutudur (μm).

Değirmende kuru ve yaş öğütülen ürünlerden yapılan pelet yüzeylerinin ise saf su, %5 NaCl ve %15 NaCl'lik çözeltiler tarafından tamamıyla ıslatıldığı, ancak %26'lık NaCl çözeltisi ile 4-5°'lik temas açılarının elde edildiği belirlenmiştir. Yani bu ürünlerin kritik ıslanma yüzey gerilimi değerleri 72 mN/m'den yüksektir.

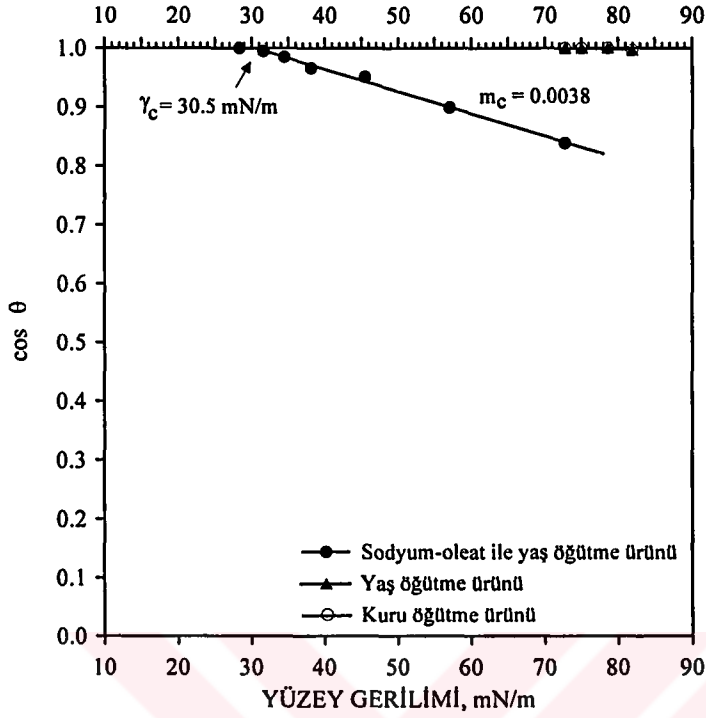
Kimyasal madde olarak sodyum dodesil sülfatın (SDDS) kullanıldığı temas açısı ölçümlerinde ise temas açısı okunamamıştır.



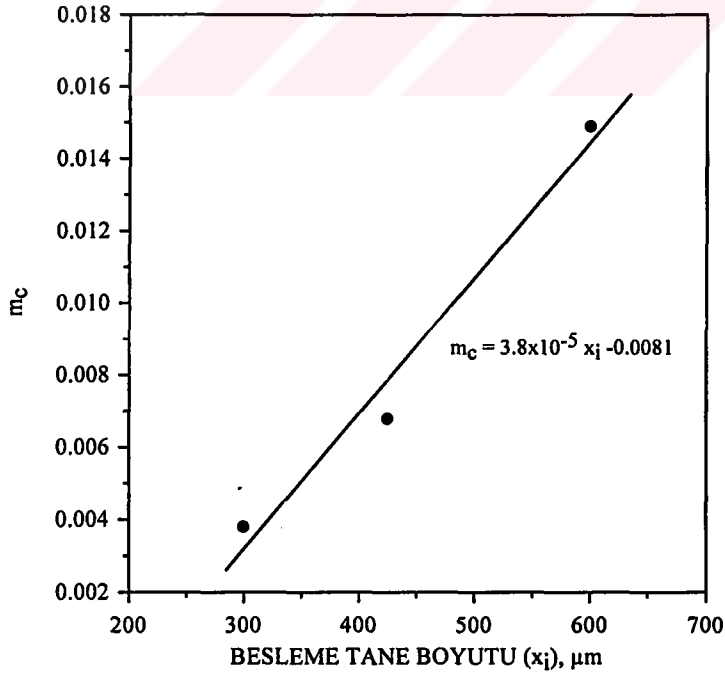
Şekil 125. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kalsit ürününün ıslanma diyagramı (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)



Şekil 126. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kalsit ürününün ıslanma diyagramı (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)



Şekil 127. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen $-300+212 \mu\text{m}$ besleme boyutu kalsit ürününün ıslanma diyagramı (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)



Şekil 128. Kalsit minerali için temas açısı ölçümleri ile belirlenen m_c değerleri ile x_i arasındaki ilişki (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)

3.3.1.2. Mikroflotasyon testleriyle γ_c 'nin belirlenmesi

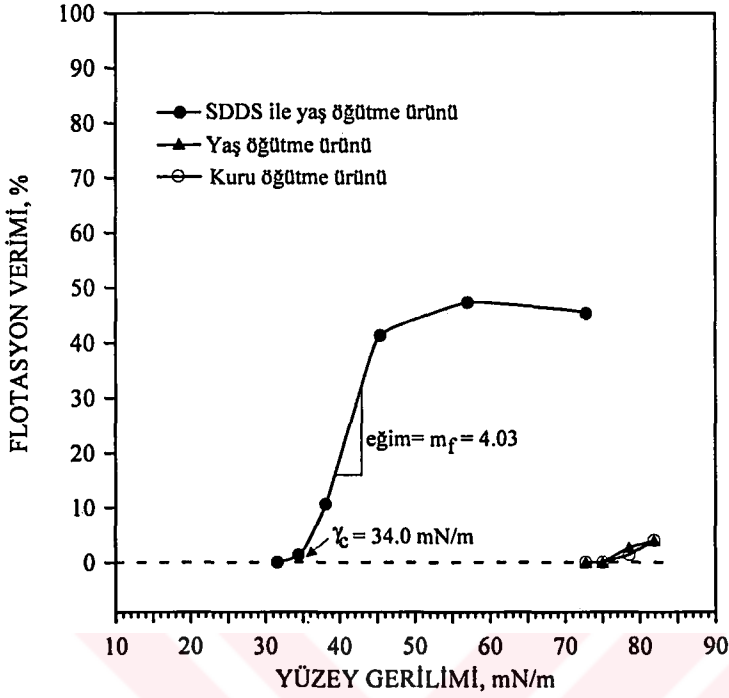
Flotasyon yöntemi ile değirmende kuru, yaş ve kimyasal madde olarak sodyum dodesil sülfatın (SDDS) kullanıldığı yaş öğütme ürünleri üzerinde belirlenen γ_c değerleri Şekil 129, 130 ve 131'de, kimyasal madde olarak sodyum-oleatın kullanıldığı ürünler için belirlenen γ_c değerleri ise Şekil 132, 133 ve 134'de gösterilmiştir. Şekil 135 ve 136'da ise değirmene beslenen boyuta karşı flotasyon verimi eğrisinin eğimi (eğim= m_f) arasındaki ilişkiler verilmiştir. Temas açısı ölçüm yöntemi ile belirlenen benzer sonuç, yani değirmen besleme boyutu incelirken, γ_c değerlerinin arttığı ve m_f değerlerinin ise azaldığı belirlenmiştir. Bu ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

$$m_f = 0.00029 x_i + 3.861 \quad (\text{Kimyasal madde: Sodyum dodesil sülfat}) \quad (46)$$

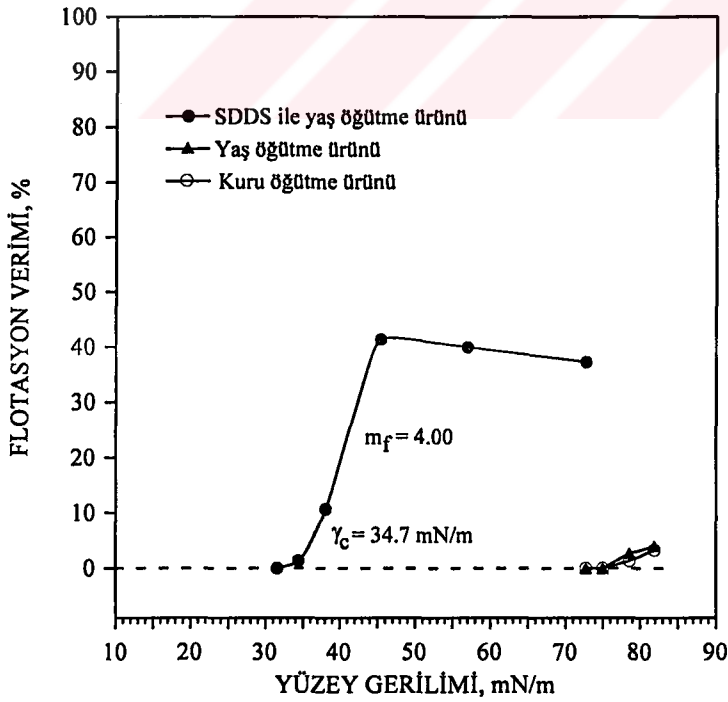
$$m_f = 0.00138 x_i + 5.857 \quad (\text{Kimyasal madde: Sodyum-oleat}) \quad (47)$$

Burada; m_f flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi, x_i ise değirmene beslenen tane boyutudur (μm).

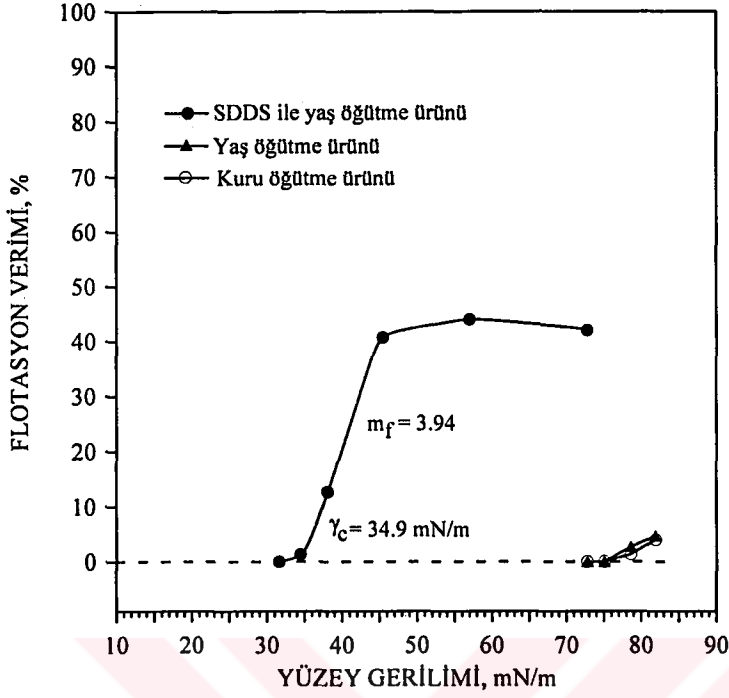
Kalsit mineralinin kuru ve yaş öğütüldüğü ürünler ise saf su, %5 NaCl, %15 NaCl ve %26'lık NaCl çözeltileri ile flotasyon işlemine tabi tutulmuştur. %15'lik tuz çözeltileri ile %1.5-2.5 civarında, %26'lık tuz çözeltisi ile de %3.5-4.5 civarında verimler elde edilmiştir. Yani, bu ürünlerin kritik ıslanma yüzey gerilimi değerleri temas açısı ölçüm yöntemi ile belirlendiği gibi 72 mN/m'den yüksektir.



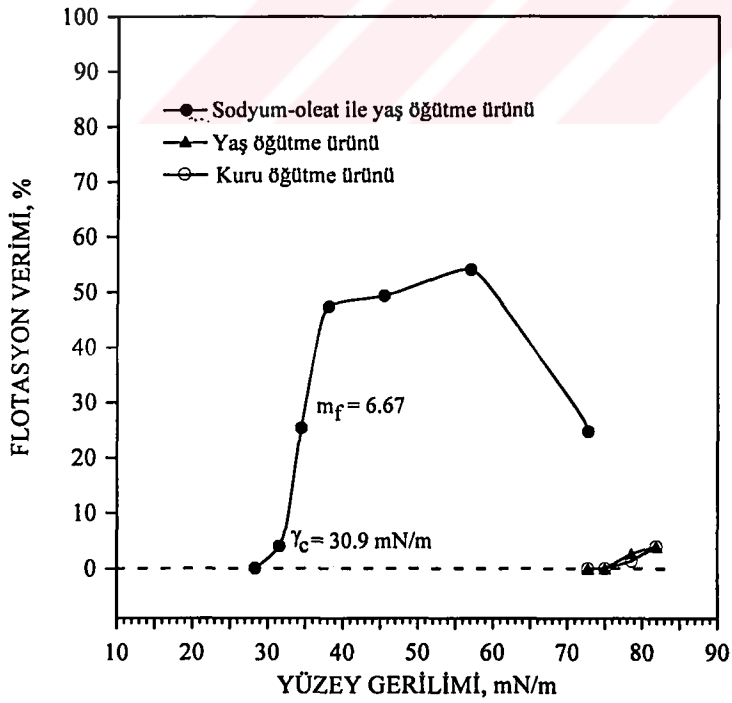
Şekil 129. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen $-600+425 \mu\text{m}$ besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: Sodyum dodesil sülfat)



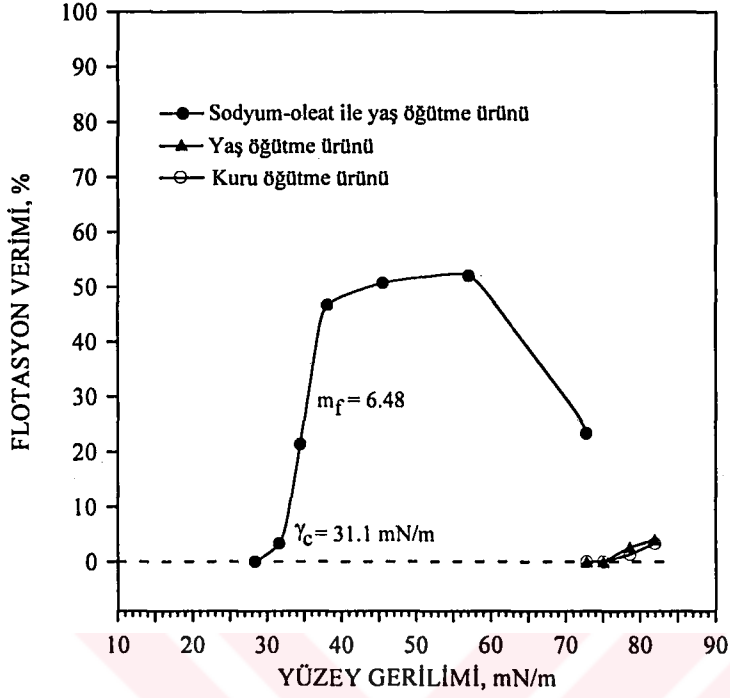
Şekil 130. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen $-425+300 \mu\text{m}$ besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: Sodyum dodesil sülfat)



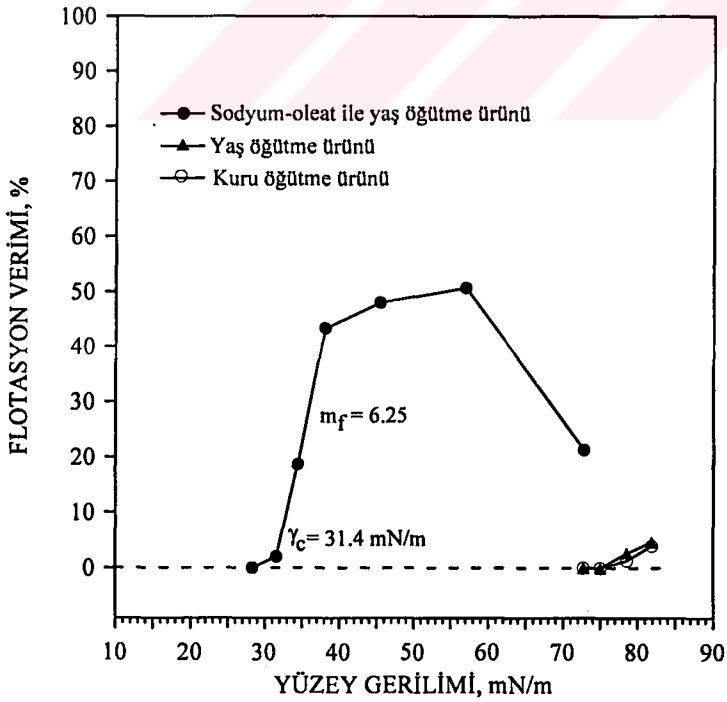
Şekil 131. γ_c değerin belirlenmesi için öğütülen $-300+212 \mu\text{m}$ besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: Sodyum dodesil sülfat)



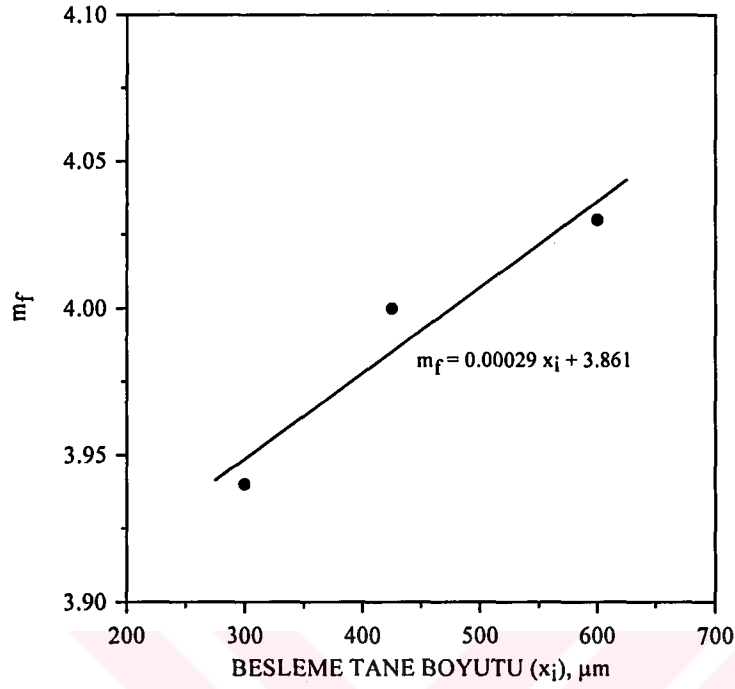
Şekil 132. γ_c değerin belirlenmesi için öğütülen $-600+425 \mu\text{m}$ besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)



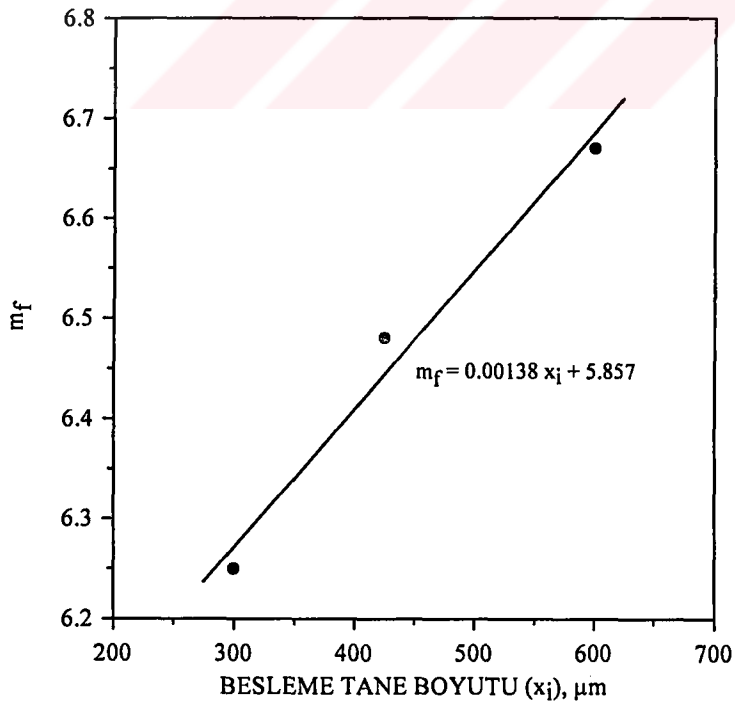
Şekil 133. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -425+300 µm besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)



Şekil 134. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -300+212 µm besleme boyutu kalsit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)



Şekil 135. Kalsit minerali için flotasyon testleri ile belirlenen m_f değerleri ile x_i arasındaki ilişki (Kimyasal madde: Sodyum dodesil sülfat)



Şekil 136. Kalsit minerali için flotasyon testleri ile belirlenen m_f değerleri ile x_i arasındaki ilişki (Kimyasal madde: Sodyum-oleat)

3.3.2. Barit

Barit mineralinin ıslanma özelliklerinin belirlenmesi için değirmende normal kırılma davranışı gösteren -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyut fraksiyonlarının kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülmüş ürünleri kullanılmıştır. Kuru öğütme için 32. dakika ürünü, yaş ve sodyum dodesil sülfat (SDDS) ile yaş öğütme için ise 16. dakika ürünleri üzerinde ıslanma özellikleri belirlenmiştir (Çünkü bu öğütme süresi sonunda elde edilen ürünler -212 μm boyut fraksiyonu olup, flotasyon ve ıslanma deneyleri için elverişli tane boyutudur). Elde edilen sonuçlar Tablo 16'da özetlenmiştir.

Barit mineralinin kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünler üzerinde yapılan temas açısı ölçümleri ve flotasyon deneylerinin sonuçları sırasıyla Ek 8.A ve Ek 8.B'de verilmiştir.

Tablo 16. Barit mineralinin temas açısı ölçüm ve flotasyon yöntemi ile belirlenen γ_c değerleri

Öğütme şekli	Değirmene beslenen boyut, μm	Tespit edilen γ_c değerleri, mN/m		γ_c tespitinde kullanılan çözeltiler	Açıklama
		Temas açısı ölçüm yöntemi	Flotasyon yöntemi		
Kuru öğütme	-600+425	>72	>72	Saf su, %5, 10 ve 26 NaCl (ağırlıkça)	$\gamma_c > 72$ mN/m, hidrofilik davranış
	-425+300	>72	>72		
	-300+212	>72	>72		
Yaş öğütme	-600+425	>72	>72	Saf su, %5, 10 ve 26 NaCl (ağırlıkça)	$\gamma_c > 72$ mN/m, hidrofilik davranış
	-425+300	>72	>72		
	-300+212	>72	>72		
SDDS ile yaş öğütme, (1×10^{-3} M)	-600+425	29.9	34.0	Saf su, %10, 25, 38, 50 ve 62 Metil alkol (ağırlıkça)	$\gamma_c < 72$ mN/m, hidrofobik davranış
	-425+300	30.7	34.2		
	-300+212	31.2	34.5		

3.3.2.1. Temas açısı ölçüm yöntemiyle γ_c 'nin belirlenmesi

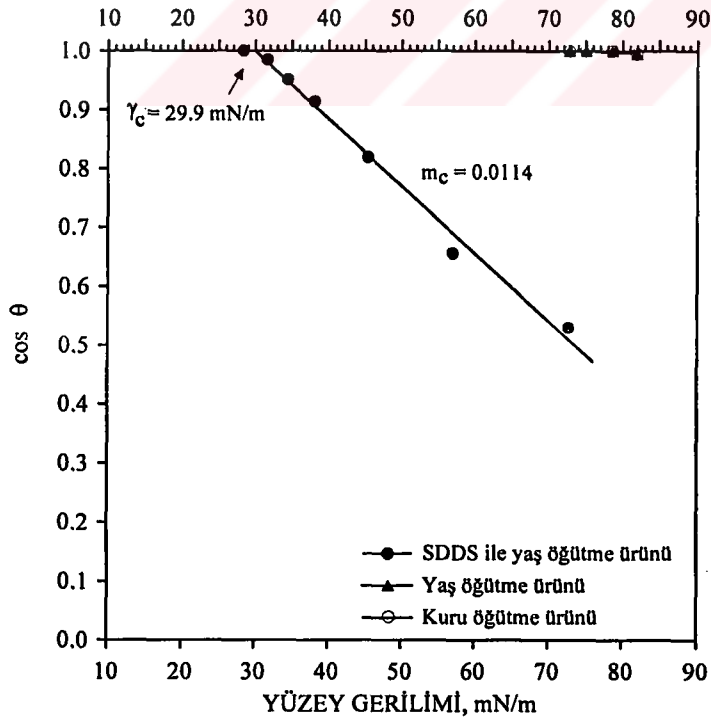
Zisman temas açısı ölçüm yöntemi ile değirmende kuru, yaş ve kimyasal madde olarak sodyum dodesil sülfatın (SDDS) kullanıldığı yaş öğütme ürünleri üzerinde belirlenen γ_c değerleri Şekil 137, 138 ve 139'da gösterilmiştir. Ayrıca,

söz konusu şekillerde mineralin hidrofobluk derecesinin bir işareti olan doğrunun eğimi de (eğim= $-m_c$) verilmiştir. Bu sonuçlardan, değirmene beslenen tane boyutu incelidikçe, γ_c değerlerinin arttığı ve m_c değerlerinin ise azaldığı anlaşılmaktadır (Şekil 140). Bu ilişki, aşağıdaki ampirik eşitlik ile verilebilir:

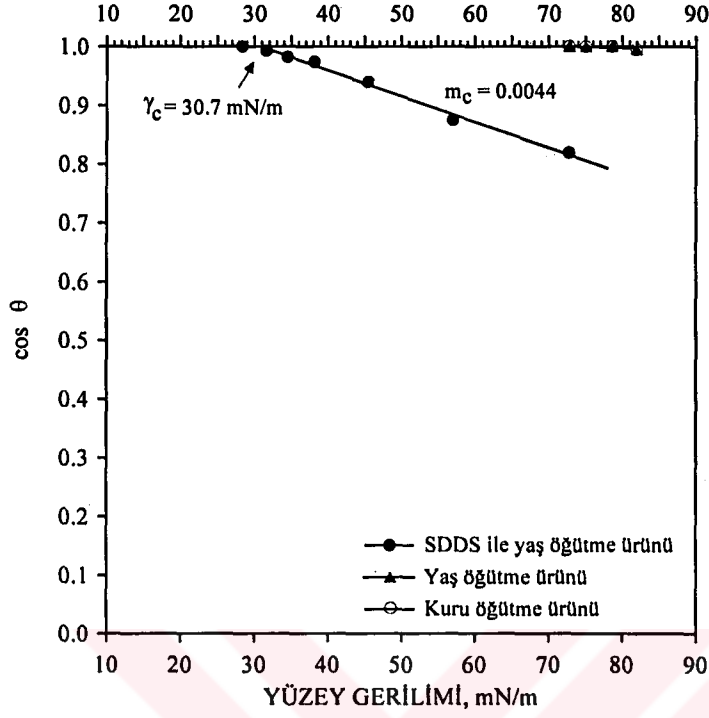
$$m_c = 2.7 \times 10^{-5} x_i - 0.0056 \quad (48)$$

Burada; m_c Zisman temas açısı ölçüm eğrisinin eğimi, x_i ise değirmene beslenen tane boyutudur (μm).

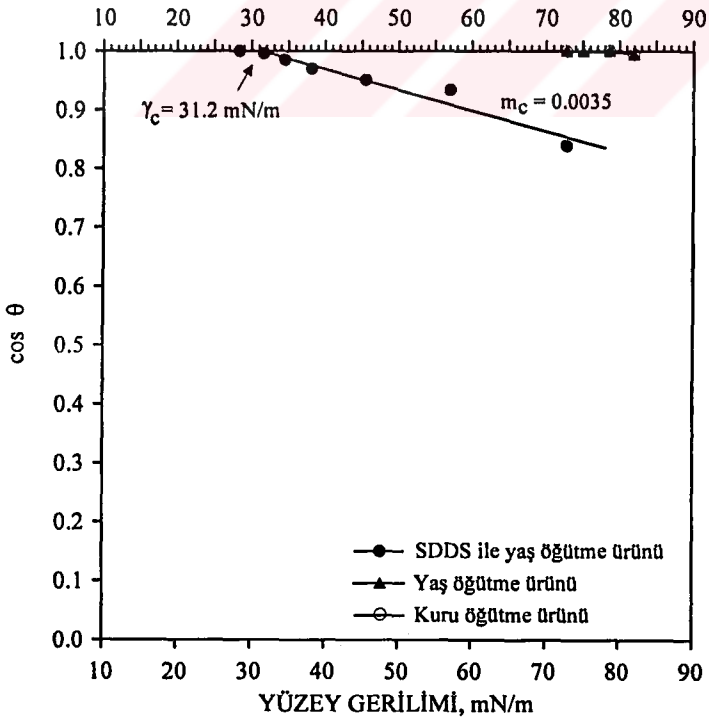
Değirmende kuru ve yaş öğütülen ürünlerden yapılan pelet yüzeylerinin ise saf su, %5 NaCl ve %15 NaCl'lik çözeltiler tarafından tamamıyla ıslatıldığı, ancak %26'lık NaCl çözeltisi ile 5-6°'lik temas açılarının elde edildiği belirlenmiştir. Yani bu ürünlerin kritik ıslanma yüzey gerilimi değerleri 72 mN/m'den yüksektir.



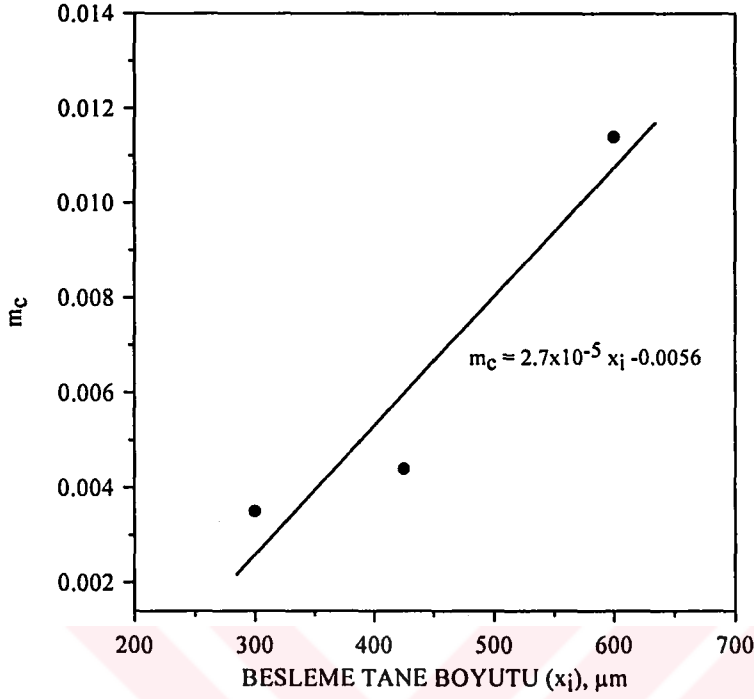
Şekil 137. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -600+425 μm besleme boyutu barit ürününün ıslanma diyagramı



Şekil 138. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -425+300 μm besleme boyutu barit ürününün ıslanma diyagramı



Şekil 139. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -300+212 μm besleme boyutu barit ürününün ıslanma diyagramı



Şekil 140. Barit minerali için temas açısı ölçümleri ile belirlenen m_c değerleri ile x_i arasındaki ilişki

3.3.2.2. Mikroflotasyon testleriyle γ_c 'nin belirlenmesi

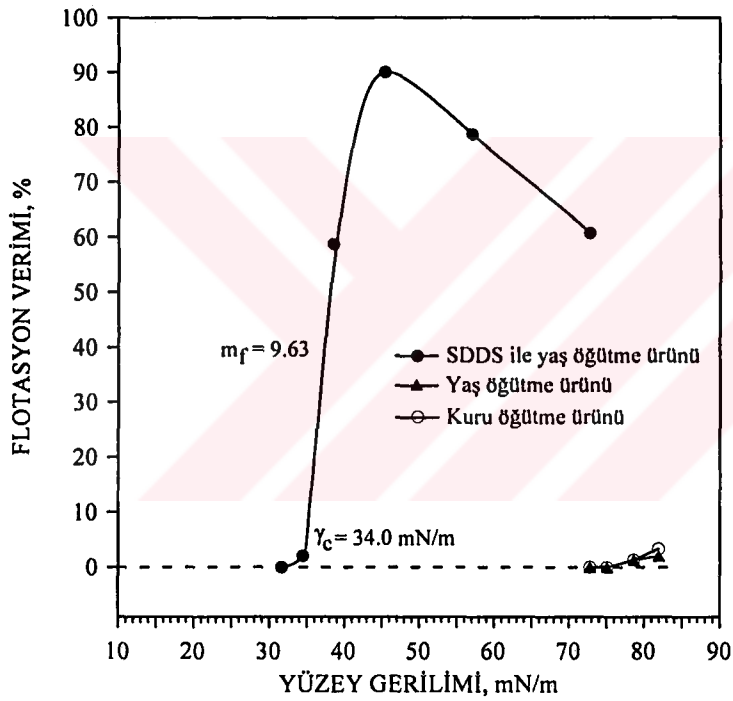
Flotasyon yöntemi ile değirmende kuru, yağ ve kimyasal madde olarak sodyum dodesil sülfatın (SDDS) kullanıldığı yağ öğütme ürünleri üzerinde belirlenen γ_c değerleri Şekil 141, 142 ve 143'de gösterilmiştir. Şekil 144'de ise değirmene beslenen boyuta karşı flotasyon verimi eğrisinin eğimi (eğim= m_f) arasındaki ilişki verilmiştir. Temas açısı ölçüm yöntemi ile belirlenen benzer sonuç, yani değirmen besleme boyutu incelirken, γ_c değerlerinin arttığı ve m_f değerlerinin ise azaldığı anlaşılmaktadır. Bu ilişki, aşağıdaki ampirik eşitlik ile verilebilir:

$$m_f = 0.00229 x_i + 8.284$$

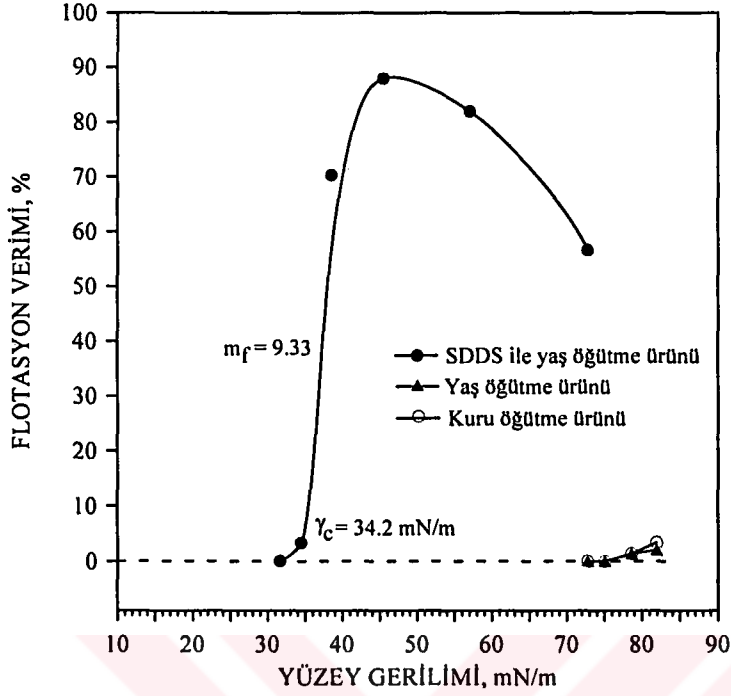
(49)

Burada; m_f flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi, x_i ise değirmene beslenen tane boyutudur (μm).

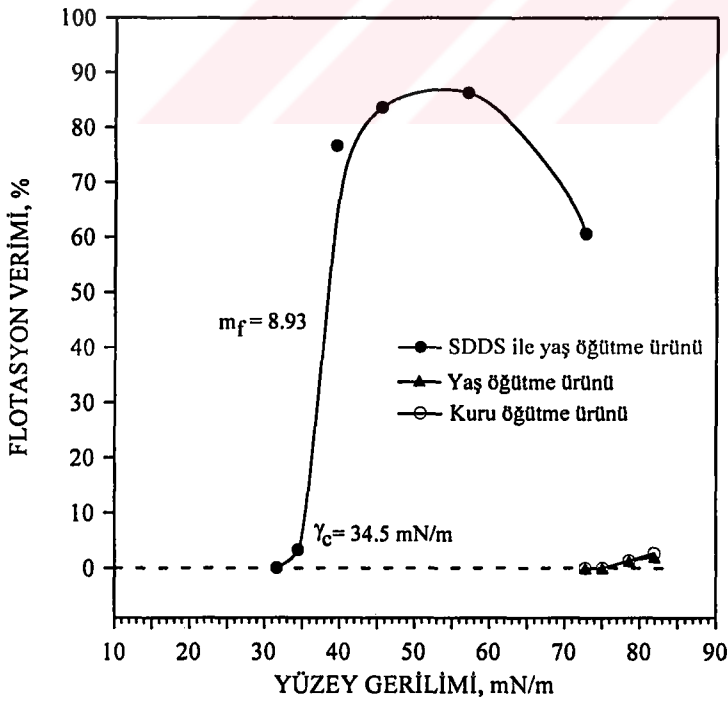
Barit mineralinin kuru ve yaş öğütüldüğü ürünler ise saf su, %5 NaCl, %15 NaCl ve %26'lık NaCl çözeltileri ile flotasyon işlemine tabi tutulmuştur. %15'lik tuz çözeltileri ile %1.5 civarında, %26'lık tuz çözeltisi ile de %2-3.5 civarında verimler elde edilmiştir. Yani, bu ürünlerin kritik ıslanma yüzey gerilimi değerleri temas açısı ölçüm yöntemi ile belirlendiği gibi 72 mN/m'den yüksektir.



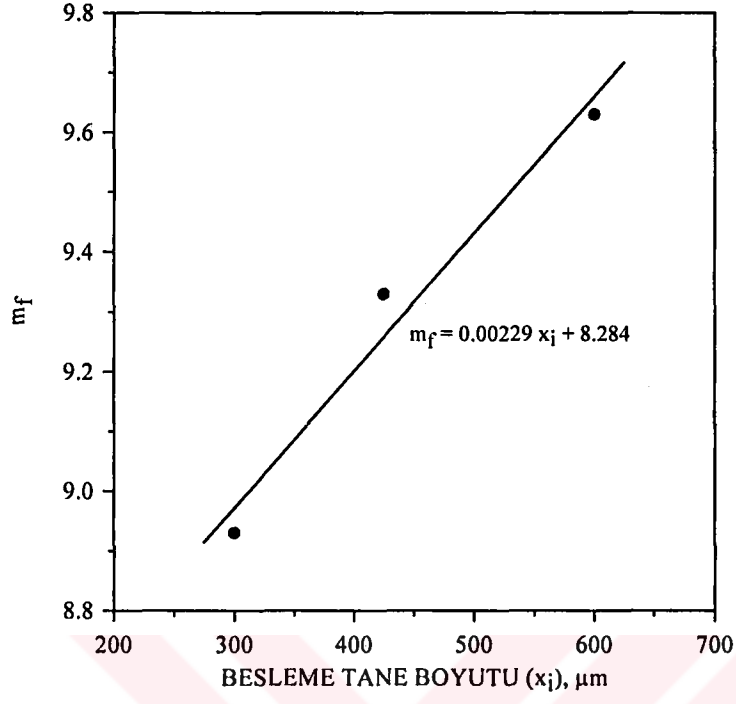
Şekil 141. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -600+425 μm besleme boyutu barit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



Şekil 142. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -425+300 µm besleme boyutu barit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



Şekil 143. γ_c değerinin belirlenmesi için öğütülen -300+212 µm besleme boyutu barit ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



Şekil 144. Barit minerali için flotasyon testleri ile belirlenen m_f değerleri ile x_i arasındaki ilişki

3.3.3. Kömür

Kömürün ıslanma özelliklerinin belirlenmesi için değirmende normal kırılma davranışı gösteren -600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm besleme boyut fraksiyonlarının kuru, yaş ve gazyağı ile yaş öğütülmüş 64. dakika ürünleri kullanılmıştır (Çünkü bu öğütme süresi sonunda elde edilen ürünler -212 μm boyut fraksiyonu olup, flotasyon ve ıslanma deneyleri için elverişli tane boyutudur). Elde edilen sonuçlar Tablo 17’de özetlenmiştir.

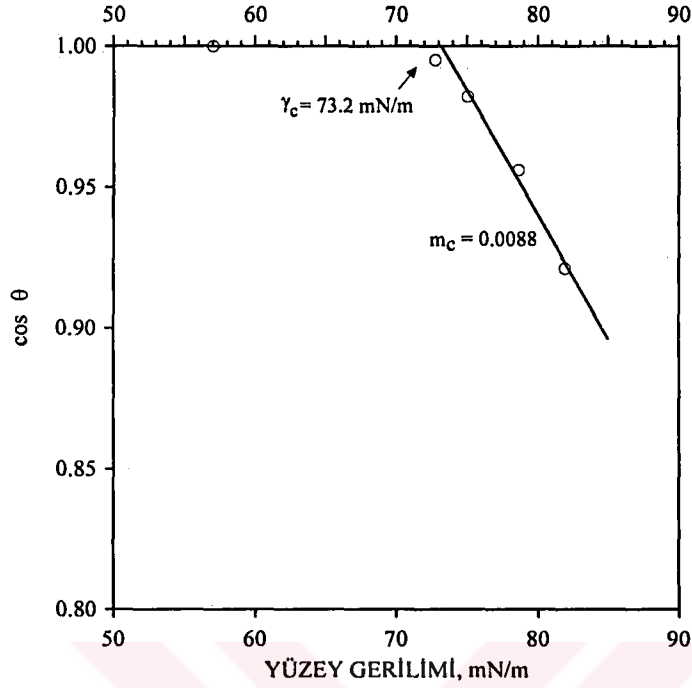
Kömürün kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünler üzerinde yapılan temas açısı ölçümleri ve flotasyon deneylerinin sonuçları sırasıyla Ek 9.A ve Ek 9.B’de verilmiştir.

Tablo 17. Kömürün temas açısı ölçüm ve flotasyon yöntemi ile belirlenen γ_c değerleri

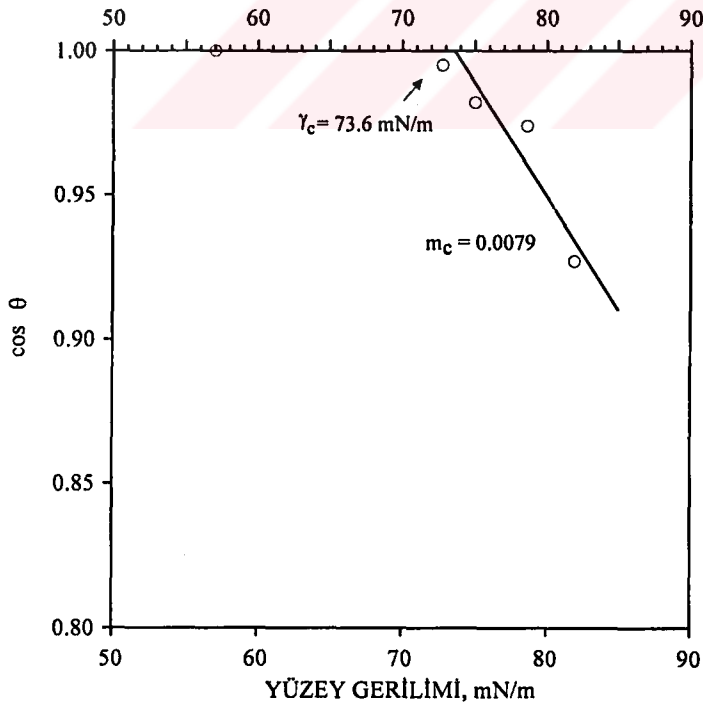
Öğütme şekli	Değirmene beslenen boyut, μm	Tespit edilen γ_c değerleri, mN/m		γ_c tespitinde kullanılan çözeltiler	Açıklama
		Temas açısı ölçüm yöntemi	Flotasyon yöntemi		
Kuru öğütme	-600+425	73.2	71.9	%10 Metil alkol, Saf su, %5, 10 ve 26 NaCl (ağ.)	$\gamma_c > 72$ mN/m, hidrofilik davranış
	-425+300	73.6	72.5		
	-300+212	73.1	73.0		
Yaş öğütme	-600+425	72.4	72.5	%10 Metil alkol, Saf su, %5, 10 ve 26 NaCl (ağ.)	$\gamma_c > 72$ mN/m, hidrofilik davranış
	-425+300	72.1	72.6		
	-300+212	73.3	72.7		
Gazyağı ile yaş öğütme, (485 mg/L)	-600+425	72.5	71.1	%10 ve 25 Metil alkol, Saf su, %5, 10 ve 26 NaCl (ağırlıkça)	$\gamma_c \cong 72$ mN/m, hidrofilik davranış
	-425+300	72.6	70.8		
	-300+212	72.4	71.0		

3.3.3.1. Temas açısı ölçüm yöntemiyle γ_c 'nin belirlenmesi

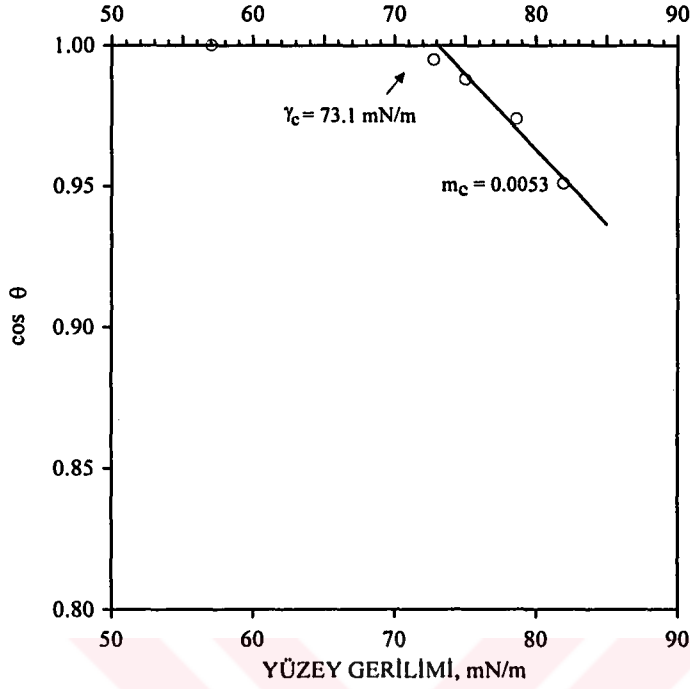
Zisman temas açısı ölçüm yöntemi ile belirlenen γ_c değerleri; değirmende kuru öğütülen numuneler için Şekil 145, 146 ve 147’de, yaş öğütülen numuneler için Şekil 148, 149 ve 150’de, gazyağı ile yaş öğütülen numuneler için ise Şekil 151, 152 ve 153’de gösterilmiştir. Ayrıca, söz konusu şekillerde mineralin hidrofobluk derecesinin bir işareti olan doğrunun eğimi de ($eğim = -m_c$) verilmiştir.



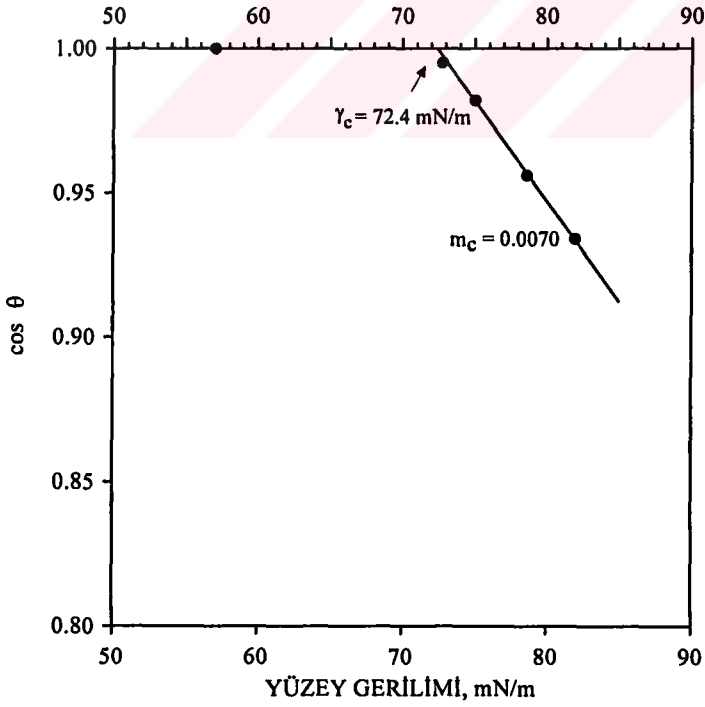
Şekil 145. γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı



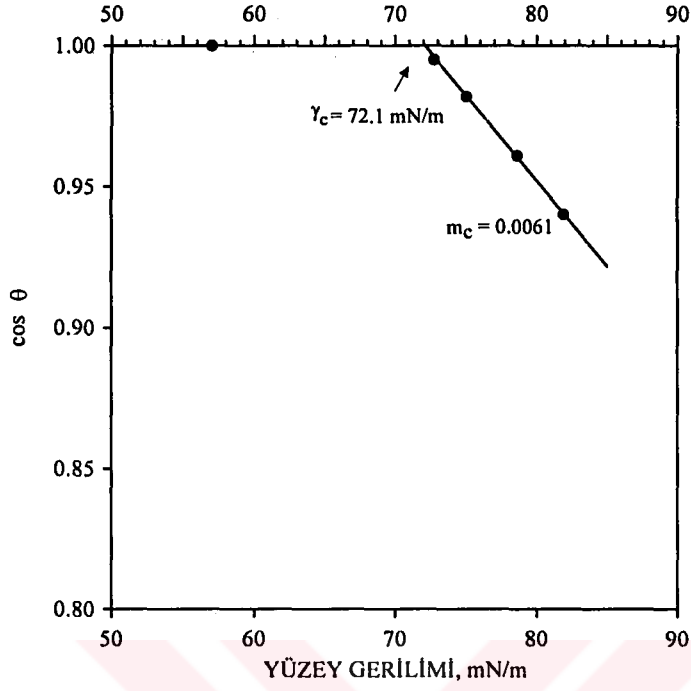
Şekil 146. γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı



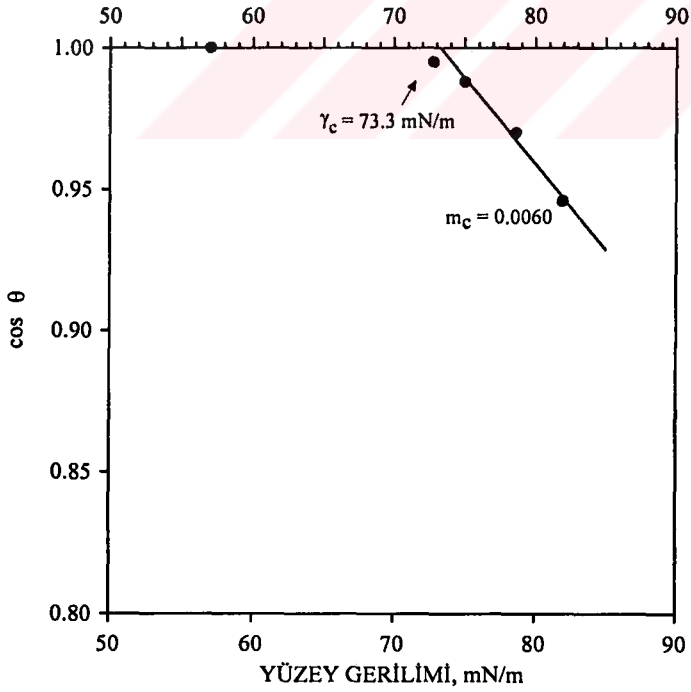
Şekil 147. γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı



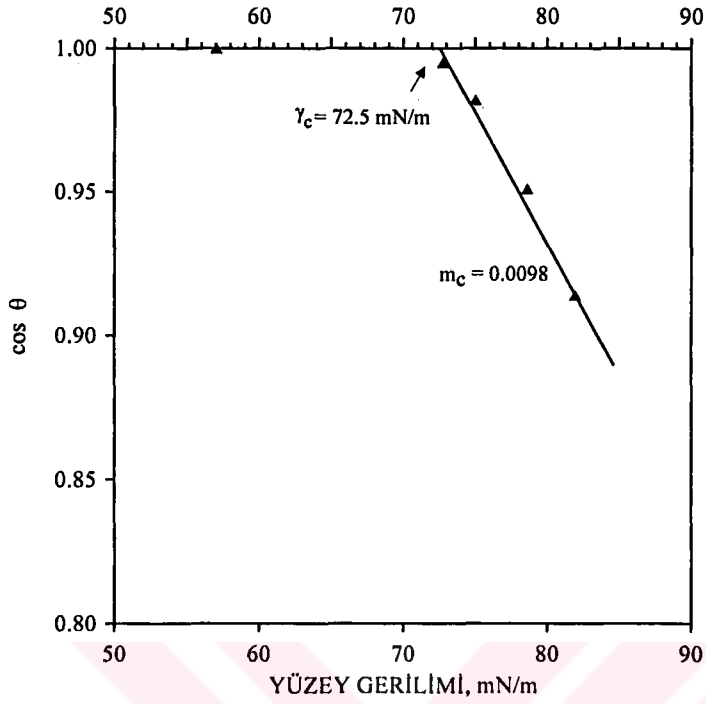
Şekil 148. γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı



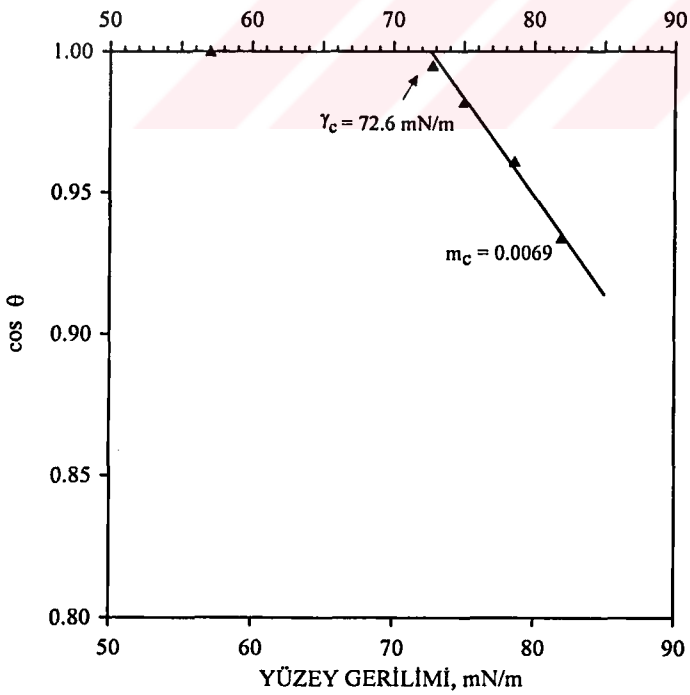
Şekil 149. γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen $-425+300 \mu\text{m}$ besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı



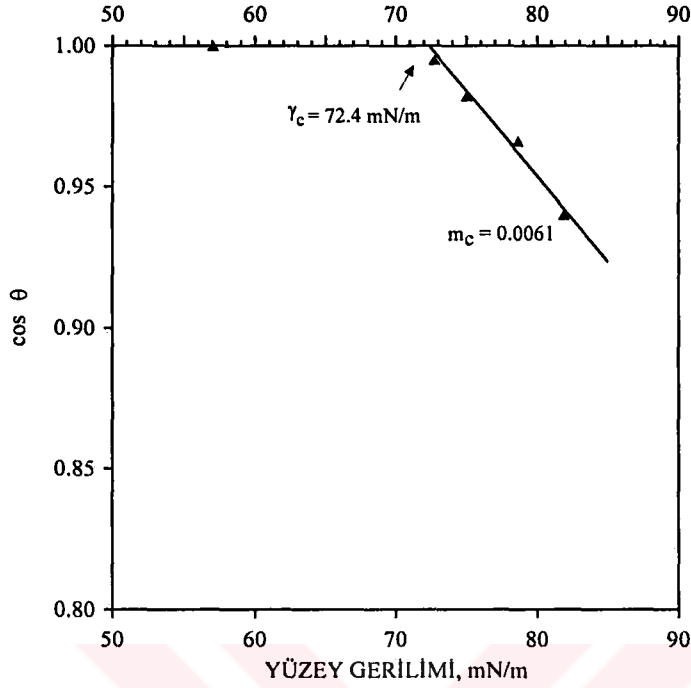
Şekil 150. γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen $-300+212 \mu\text{m}$ besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı



Şekil 151. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -600+425 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı



Şekil 152. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı



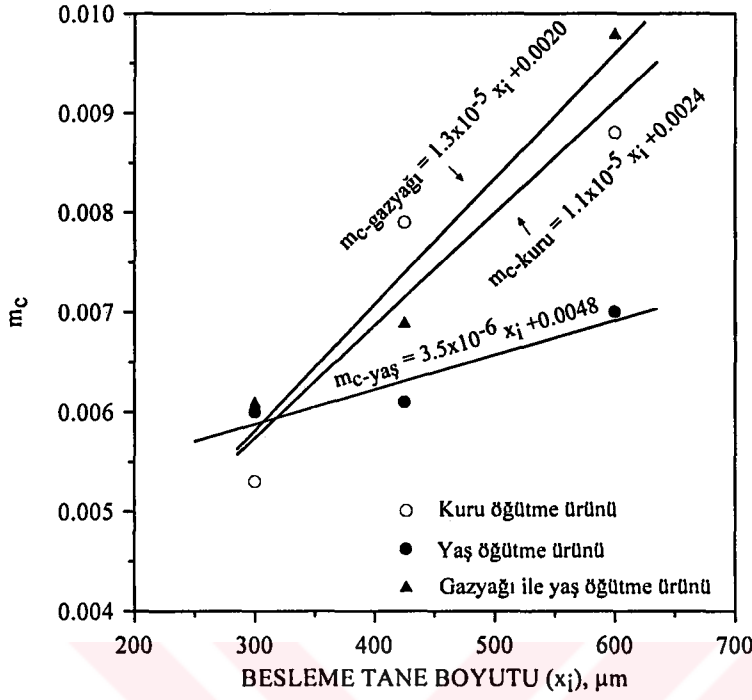
Şekil 153. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün ıslanma diyagramı

Mineralin hidrofobluk derecesinin bir işareti olan Zisman temas açısı ölçüm eğrisinin eğimi (m_c) ile değirmene beslenen tane boyutu (x_i) arasındaki ilişkiler Şekil 154'de verilmiştir. Söz konusu şekilde görüldüğü gibi, değirmene beslenen boyut incelirken, m_c değerlerinin de azaldığı anlaşılmaktadır. Bu ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

$$m_c = 1.1 \times 10^{-5} x_i + 0.0024 \quad (\text{Kuru öğütme}) \quad (50)$$

$$m_c = 3.5 \times 10^{-6} x_i + 0.0048 \quad (\text{Yaş öğütme}) \quad (51)$$

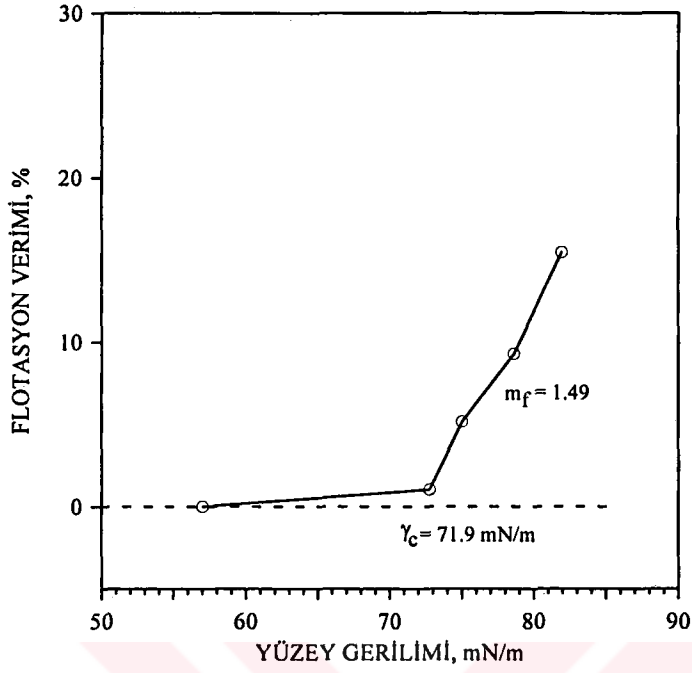
$$m_c = 1.3 \times 10^{-5} x_i + 0.0020 \quad (\text{Gazyağı ile yaş öğütme}) \quad (52)$$



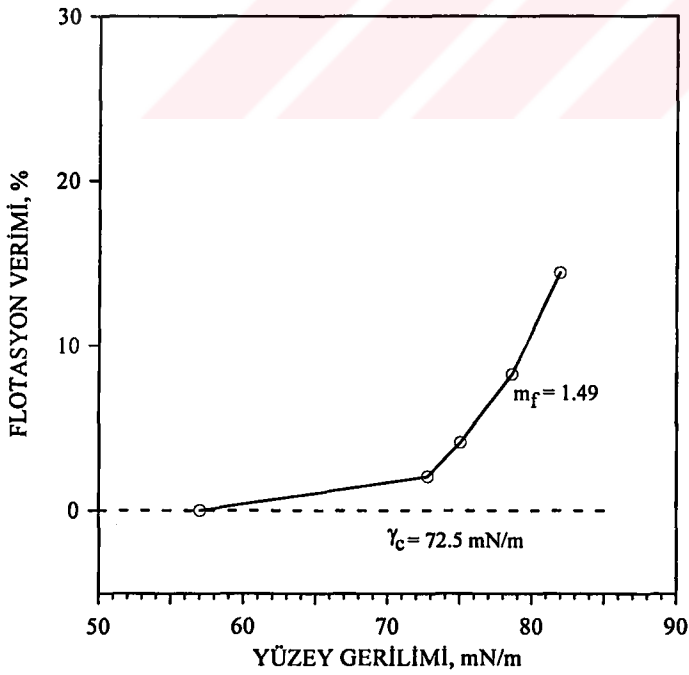
Şekil 154. Kömür için temas açısı ölçümleri ile belirlenen m_c değerleri ile x_i arasındaki ilişki

3.3.3.2. Mikroflotasyon testleriyle γ_c 'nin belirlenmesi

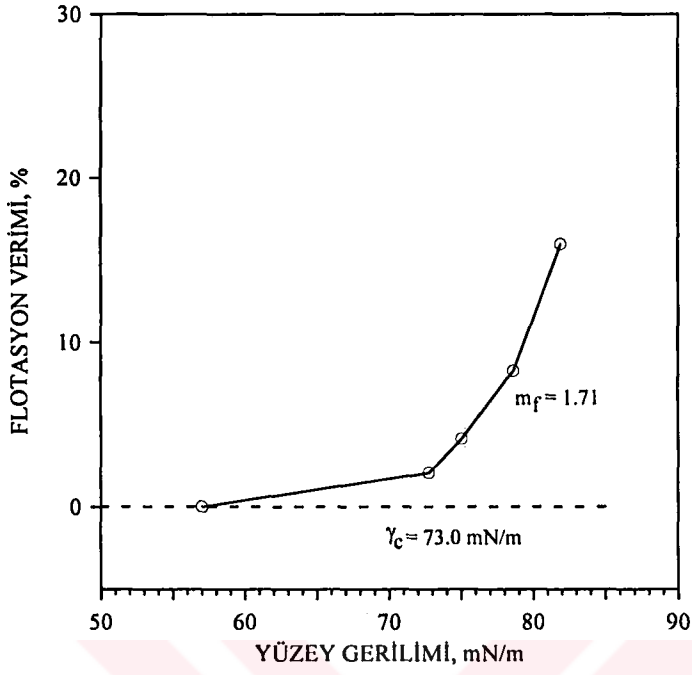
Flotasyon yöntemi ile kömür için belirlenen γ_c değerleri; değirmende kuru öğütülen numuneler için Şekil 155, 156 ve 157'de, yaş öğütülen numuneler için Şekil 158, 159 ve 160'da ve gazyağı ile yaş öğütülen numuneler için ise Şekil 161, 162 ve 163'de gösterilmiştir.



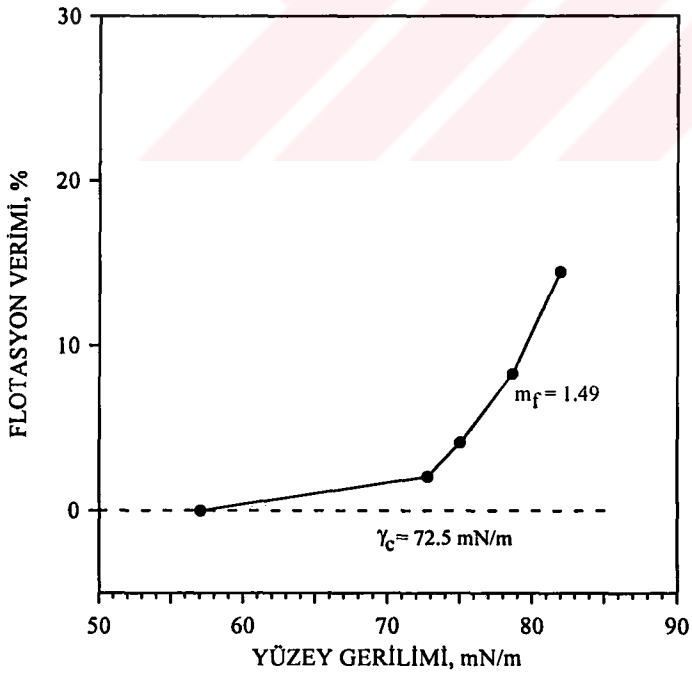
Şekil 155. γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -600+425 µm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



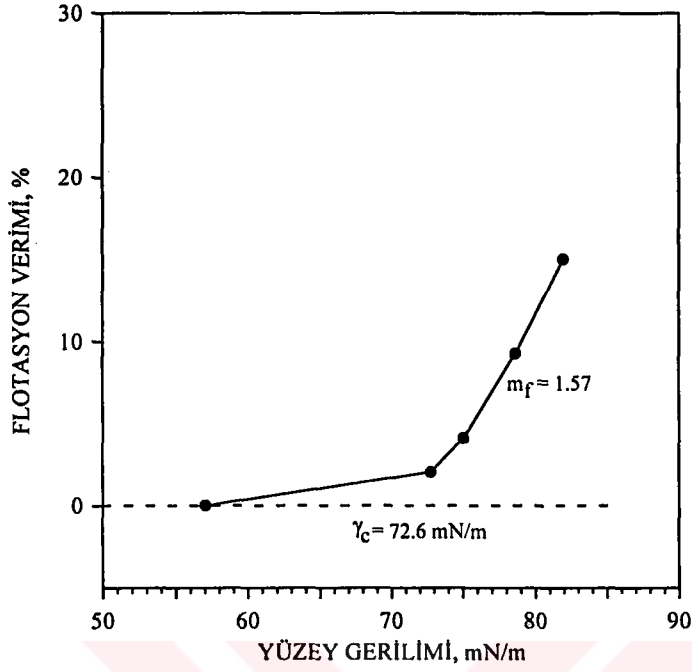
Şekil 156. γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütülen -425+300 µm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



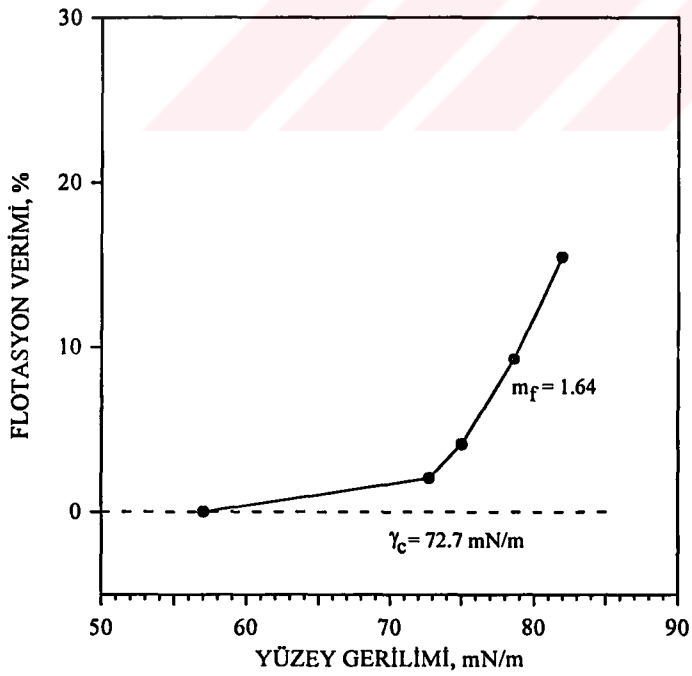
Şekil 157. γ_c değerinin belirlenmesi için kuru öğütölen -300+212 μm besleme boyutu kömür türünün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



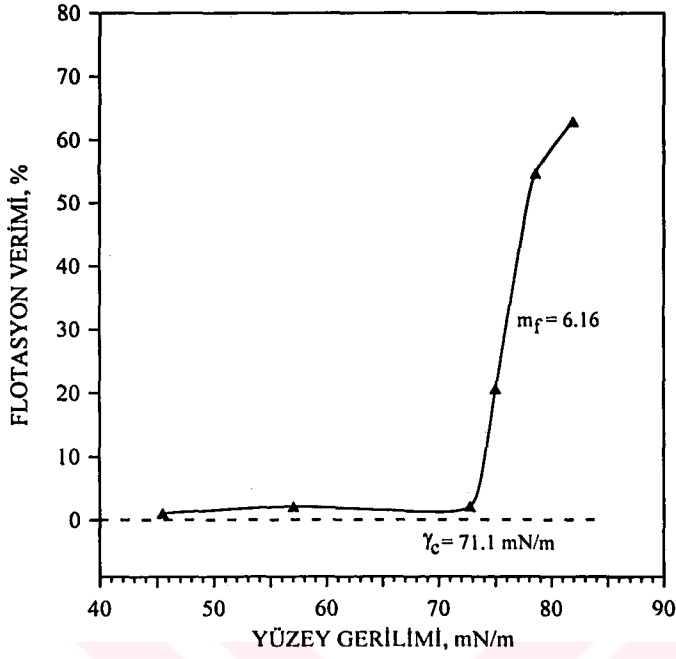
Şekil 158. γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütölen -600+425 μm besleme boyutu kömür türünün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



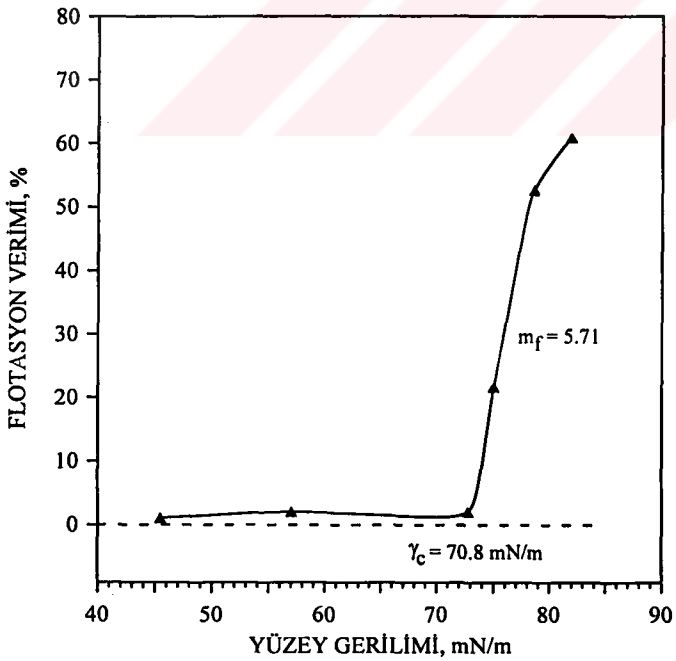
Şekil 159. γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen -425+300 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



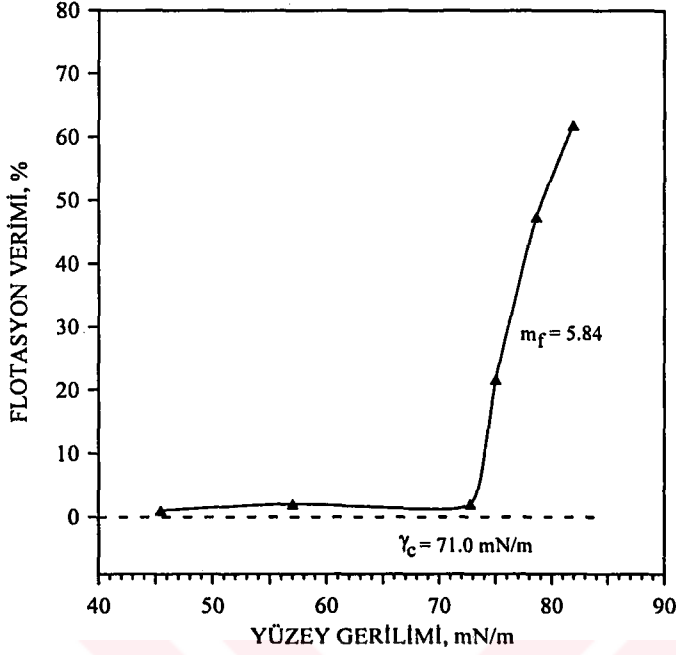
Şekil 160. γ_c değerinin belirlenmesi için yaş öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



Şekil 161. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -600+425 μ m besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



Şekil 162. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -425+300 μ m besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi



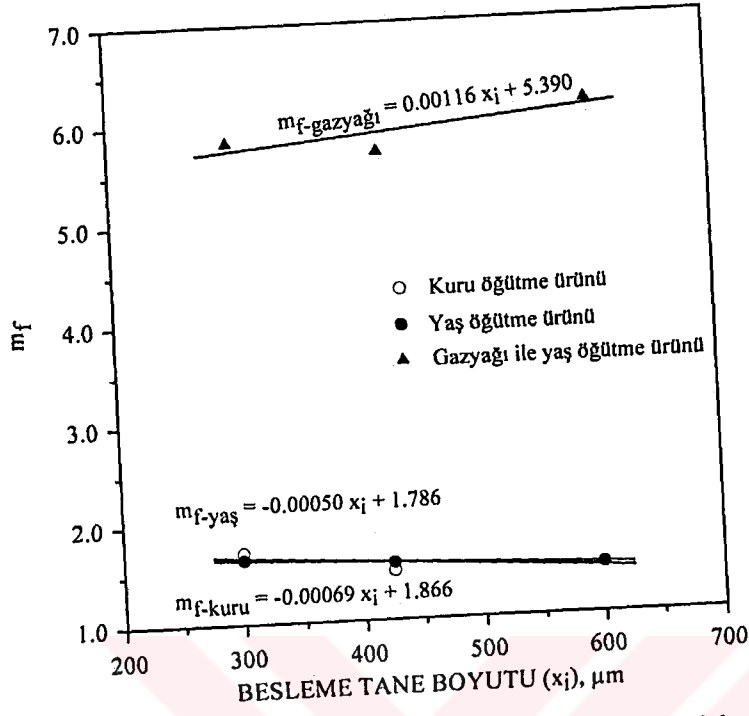
Şekil 163. γ_c değerinin belirlenmesi için gazyağı ile yaş öğütülen -300+212 μm besleme boyutu kömür ürününün yüzey gerilimine karşı flotasyon verimi eğrisi

Flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi (eğim= m_f) ile değirmene beslenen tane boyutu (x_i) arasındaki ilişkiler Şekil 164'de verilmiştir. Söz konusu şekilde görüldüğü gibi, gazyağı ile yaş öğütme için belirlenen ilişki temas açısı ölçümleri ile belirlenen ilişkiye kısmen benzerken; kuru ve yaş öğütme için belirlenen ilişkiler uyum göstermemektedir. Elde edilen ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

$$m_f = -0.00069 x_i + 1.866 \quad (\text{Kuru öğütme}) \quad (53)$$

$$m_f = -0.00050 x_i + 1.786 \quad (\text{Yaş öğütme}) \quad (54)$$

$$m_f = 0.00116 x_i + 5.390 \quad (\text{Gazyağı ile yaş öğütme}) \quad (55)$$



Şekil 164. Kömür için flotasyon testleri ile belirlenen m_f değerleri ile x_i arasındaki ilişki

3.4. İslanma Deney Bulgularının Değerlendirilmesi ve Tartışılması

Minerallerin ıslanma özelliklerini karakterize eden kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerlerinin belirlenmesi için yapılan temas açısı ölçümleri ve flotasyon testlerinden aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

1. Çalışılan minerallerden kalsit, barit ve kömür hidrofilik minerallerdir; yani kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerleri 72 mN/m'den büyüktür. Kalsit ve barit mineralleri %15 NaCl'lik ($\gamma_{SH}=78.62$ mN/m) çözeltisi tarafından hala ıslanırken, %26'lık NaCl çözeltisi ($\gamma_{SH}=81.95$ mN/m) ile 4-6°'lik temas açılarını zorlukla oluşturduğundan söz edilebilir. Kömür ise saf su ($\gamma_{SH}=72.78$ mN/m) ile 5-7°'lik temas açıları oluştururken, %26 NaCl çözeltisi ($\gamma_{SH}=81.95$ mN/m) ile 18-23°'lik temas açıları oluşturmuştur. Bu nedenle, kalsit ve barit minerallerinin kuru ve yaş öğütülmüş ürünlerinin doğal halde γ_c değerleri tespit edilememiştir. Ancak, kömürün γ_c değerinin, değirmene beslenen farklı boyut ürünleri için kuru öğütme ürünlerinde temas açısı ölçüm yöntemiyle 73.1-73.6 mN/m aralığında, flotasyon yöntemiyle 71.9-73.0 aralığında; yaş öğütme ürünlerinde ise temas açısı ölçüm metoduyla 72.1-73.3 mN/m aralığında iken, flotasyon metoduyla da 72.5-72.7 mN/m aralığında olduğu belirlenmiştir. Değerler birbirine yakın olmakla beraber, kömürün kuru öğütülmesi için belirlenen kritik ıslanma yüzey gerilimi değerlerinin yaş öğütme için belirlenenlerden biraz daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kömürün de γ_c değerinin 72 mN/m değerine yakın olması sebebiyle hidrofilik karakterde olduğunu söylenebilir.
2. Sodyum-oleat çözeltisi (3.5×10^{-4} M) ile muamele edilen kalsit mineralinin, γ_c değerlerinin, değirmene beslenen farklı boyut ürünleri için temas açısı ölçüm tekniğiyle 29.9-30.5 mN/m aralığında; flotasyon ile de 30.9-31.4 mN/m aralığında olduğu belirlenmiştir. Sodyum dodesil sülfat (SDDS) çözeltisi (2×10^{-4} M) ile muamele edilen kalsit mineralinin γ_c değerleri ise temas açısı ölçümüyle belirlenemezken, flotasyon yöntemiyle 34.0-34.9 mN/m aralığında olduğu tespit edilmiştir (Tablo 15).

3. Sodyum dodesil sülfat (SDDS) çözeltisi (1×10^{-3} M) ile muamele edilen barit mineralinin γ_c değerlerinin, değirmen farklı besleme boyutu ürünleri için temas açısı ölçümleri ile 29.9-31.2 mN/m aralığında; flotasyon testleri ile de 34.0-34.5 mN/m aralığında olduğu belirlenmiştir (Tablo 16).
4. Gazyağı çözeltisi (485 mg/L) ile muamele edilen linyit kömürünün γ_c değerlerinin, değirmen farklı besleme boyutu ürünleri için temas açısı ölçümleri ile 72.4-72.6 mN/m aralığında; flotasyon testleri ile de 70.8-71.1 mN/m aralığında olduğu tespit edilmiştir (Tablo 17).
5. Yukarıda verilen ifadeler değerlendirildiğinde, kalsit ve barit mineralinin kimyasal maddeler ile muamelesi sonucunda γ_c değerlerinin büyük ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Ancak, kömür için bu azalma çok düşük oranda kalmıştır. $\cos \theta$ -yüzey gerilimi eğrisinin eğimi olup hidrofobluk derecesini ifade eden m_c değerlerinde ise yine düşük oranda bir artış; yaş öğütme ürünleri için ortalama m_c değeri 0.0064 iken, gazyağı ile yaş öğütme ürünleri için ortalama 0.0076 olmaktadır. Yani, gazyağı çözeltisi ile muamele edilen kömür yüzeylerinde alkol çözeltileriyle temas açısı okunamazken, tuz çözeltileri ile ölçülen temas açıları, yaş ve kuru öğütme ürünleri üzerinde ölçülen açılara göre çok az bir artış ($2-3^\circ$) göstermiştir. Bu durum kömür yüzeylerinin oksitlenmesine bağlanabilir. Flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi olup verimdeki artışı ifade eden m_f değerlerinde ise, yüksek bir artış; kömürün yaş öğütme ürünleri için ortalama m_f değeri 1.57 iken, gazyağı ile yaş öğütme ürünleri için 5.90 olmaktadır. Gazyağı kullanılan bu flotasyon testlerinde, alkollü çözeltilerde ve saf suda verim sifıra yakın olurken, tuz çözeltilerinde tuz konsantrasyonunun artmasına paralel olarak % verim değerleri de büyük ölçüde artmış, ancak γ_c değerlerinde çok az bir düşüş olmuştur. Bu durum, inorganik tuzların ilavesiyle kömürün yüzebilirliğinin artırılması ile izah edilebilir. Özellikle yüksek tuz konsantrasyonlarında (0.1 mol/L'den yüksek) flotasyon işlemi, hava kabarcıkları ve taneler arasındaki elektrostatik etkileşimler ile kontrol edilir. Henüz tam olarak açıklanamamasına rağmen olası bir açıklama; tuz ilavesiyle yüzebilirliğin artması, taneleri çevreleyen hidrate olmuş tabakaların kararlılığının bozulmasından kaynaklandığı

şeklinde. Tuz ilavesiyle elektriksel çift tabakanın sıkıştırılması, sonrasında hava kabarcıkları ve taneler arasındaki sıvı filmlerinin incelmeye ve kopmasına neden olmakta ve böylelikle yüzebilirliğin arttığı ifade edilmektedir (Brown, 1962; Klassen ve Mokrousov, 1963; Blake ve Kitchener, 1972; Li ve Somasundaran, 1992).

6. Kalsit ve barit mineralinin kimyasal maddeler ile yapılan flotasyon testlerinin tamamında gözlenen bir özellik, %10-25 metil alkol konsantrasyonunda maksimuma ulaşan %verim değerlerinin, alkol konsantrasyonunun azaltılmasıyla düşmeye başlamasıdır. Yüzey geriliminin artmasıyla flotasyon verim değerlerinin artması beklenirken (Yarar ve Kaoma, 1984); verimdeki bu azalmanın nedeni, alkolün nispeten düşük konsantrasyonlarda (%10-25) köpürtücü etkisi (daha küçük ve dengeli köpük) göstererek verim değerlerini artırmasına bağlanmıştır. Bu konsantrasyon değerinden daha yüksek alkol konsantrasyonlarında ise verim değerleri azalarak beklenen eğilimi göstermiştir.
7. Kalsit (Şekil 128) ve barit (Şekil 140) mineralleri için şekillerde görüldüğü gibi değirmene beslenen tane boyutu incelidikçe, azalan m_c değeriyle birlikte γ_c değerleri artmaktadır. Mineralin hidrofobluk derecesini ifade eden m_c değerinin azalması ve γ_c 'değerinin artması, elde edilen ürünün (katının) daha az hidrofobik olduğunu ifade eder. Kömür için ise (Şekil 154) değirmene beslenen tane boyutu incelidikçe, yine m_c değerleri azalmakta, ancak γ_c değerlerinin eğiliminde net bir ilişkiye rastlanmamıştır.
8. Kalsit (Şekil 135 ve 136) ve barit (Şekil 144) mineralleri için söz konusu şekillerde görüldüğü gibi değirmene beslenen tane boyutu incelidikçe, azalan m_f değeriyle birlikte γ_c değerleri artmaktadır. Yani, elde edilen ürün nispeten daha az yüzmektedir. Ancak, kömür için kuru ve yaş öğütme ürünlerinde belirlenen ilişkiler, kalsit ve barit minerali ile benzerlik taşımazken, gazyağı ile yaş öğütme ürünleri üzerindeki ilişki ise kısmen uyum sağlamaktadır (Şekil 164).

3.5. Kırılma Parametreleri ile İslanma Parametresinin Korelasyonu

Kalsit, barit ve kömürün öğütme testleri sonucu elde edilen kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ parametresi γ) ile temas açısı ölçümleri ve flotasyon testlerinden elde edilen ıslanma parametresi (γ_c) arasında olabilecek herhangi bir ilişki ve/veya ilişkiler araştırılmıştır. Ayrıca, özgül kırılma hızı (S_i) ile temas açısı ölçümlerinden bulunan m_c değeri ($\cos \theta$ -yüzey gerilimi eğrisinin eğimi) ve flotasyon testlerinden elde edilen m_f değeri (flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi) arasında anlamlı ilişkilerin var olup olmadığı araştırılmıştır.

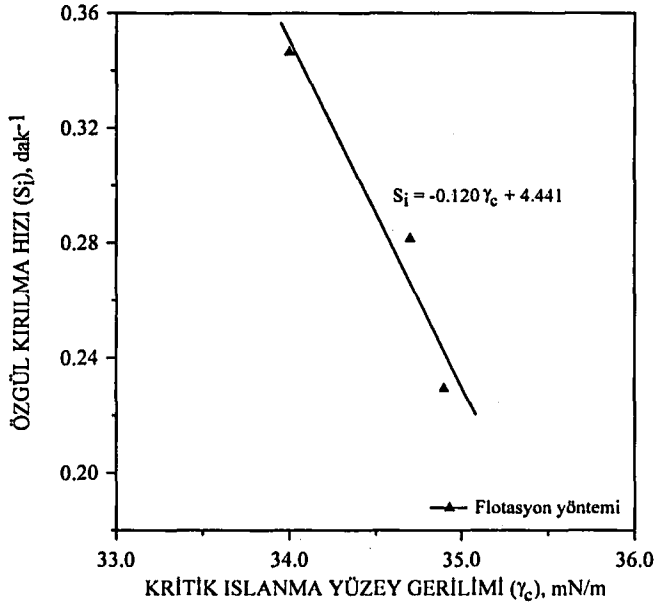
3.5.1. Kalsit için korelasyonlar

Kalsit mineralinin, -600+425 μm , -425+300 μm , -300+212 μm besleme fraksiyonlarının değirmende sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ve sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızı (S_i) değerleri ve bu boyut fraksiyonlarının öğütülmesiyle elde edilen ürünler üzerinde temas açısı ölçümleri ve flotasyon testleri ile tespit edilen kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerleri arasındaki ilişki Şekil 165 ve 166'da verilmiştir. Söz konusu şekillerde görüldüğü gibi, özgül kırılma hızı (S_i) arttıkça kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri azalmaktadır. Yani, kırılma hızı yüksek olan besleme boyutunun ürünü daha düşük kritik ıslanma yüzey gerilimine sahip olup, daha hidrofobik olduğu görülmektedir. Bir başka ifadeyle, kritik ıslanma yüzey geriliminin düşük olduğu, yani daha hidrofobik olan ürün, daha hızlı kırılmıştır. S_i ile γ_c arasında bulunan ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

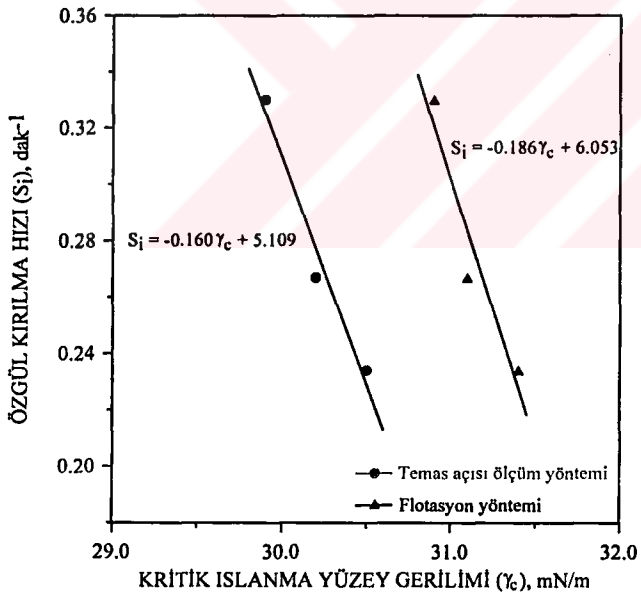
$$S_i = -0.120 \gamma_c + 4.441 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; sodyum dodesil sülfat ile}) \quad (56)$$

$$S_i = -0.160 \gamma_c + 5.109 \quad (\text{Temas açısı ölçüm yöntemi; sodyum-oleat ile}) \quad (57)$$

$$S_i = -0.186 \gamma_c + 6.053 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; sodyum-oleat ile}) \quad (58)$$



Şekil 165. Kalsit minerali için S_i ile γ_c arasındaki ilişki (SDDS ile)



Şekil 166. Kalsit minerali için S_i ile γ_c arasındaki ilişki (Sodyum-oleat ile)

Kalsit minerali için $\cos \theta$ -yüzey gerilimi eğrisinin eğimi olan m_c ile S_i arasındaki ilişki Şekil 167'de, flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi olan m_f ile S_i arasındaki ilişki ise Şekil 168 ve 169'da verilmiştir.

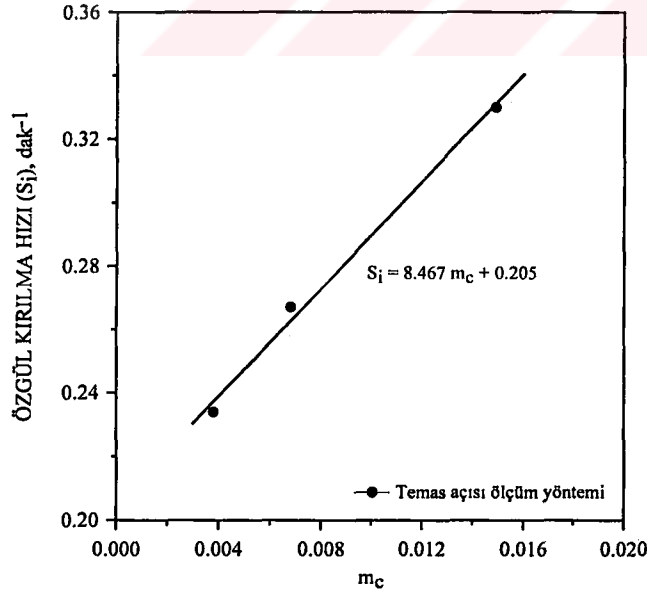
Özgül kırılma hızı (S_i) arttıkça hidrofobluk katsayısı veya derecesi olan m_c değeri de artmaktadır; m_c değerinin artması demek, okunan temas açılarının daha büyük olduğunu ifade etmektedir. Yani kırılma hızı yüksek olan-düşük kritik ıslanma yüzey gerilimli (γ_c) ürün, daha hidrofobiktir (Şekil 167). Şekil 168 ve 169'da görüldüğü gibi, özgül kırılma hızı (S_i) arttıkça m_f değeri de artmaktadır. Yani kırılma hızı yüksek olan-düşük kritik ıslanma yüzey gerilimli (daha hidrofobik) ürün, flotasyon testlerinde daha yüksek verimle yüzmektedir.

Özgül kırılma hızı S_i ile m_c ve m_f arasındaki ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

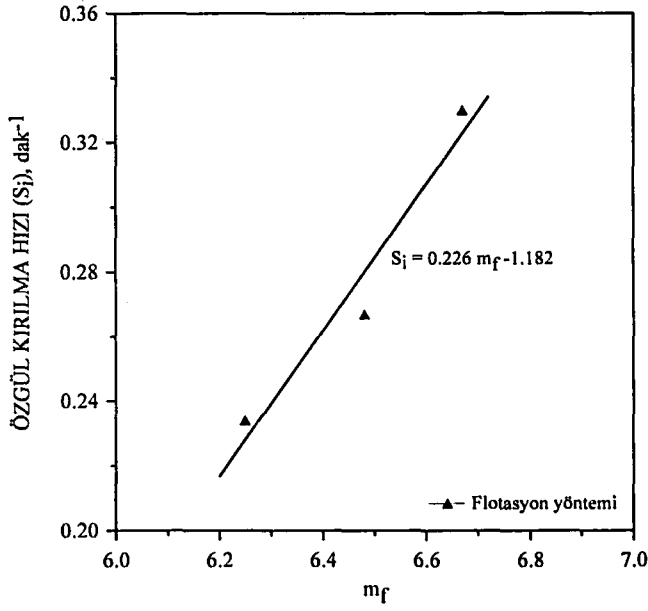
$$S_i = 8.467 m_c + 0.205 \quad (\text{Temas açısı ölçüm yöntemi; sodyum-oleat ile}) \quad (59)$$

$$S_i = 0.226 m_f - 1.182 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; sodyum-oleat ile}) \quad (60)$$

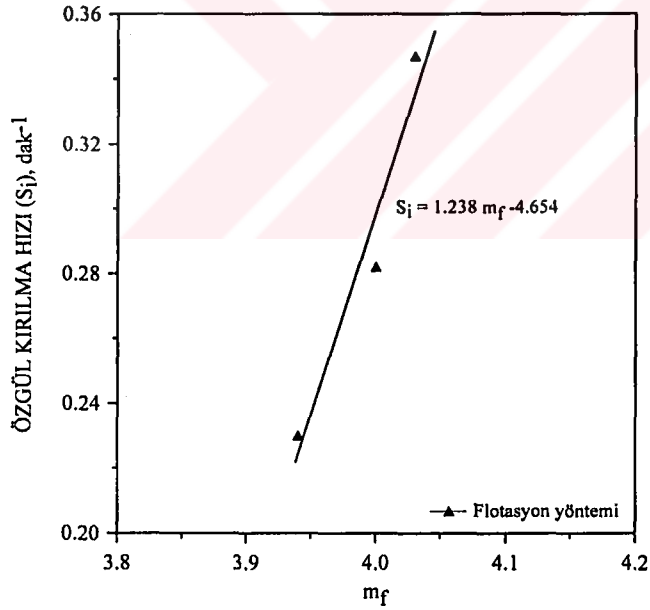
$$S_i = 1.238 m_f - 4.654 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; sodyum dodesil sülfat ile}) \quad (61)$$



Şekil 167. Kalsit minerali için S_i ile m_c arasındaki ilişki (Sodyum-oleat ile)

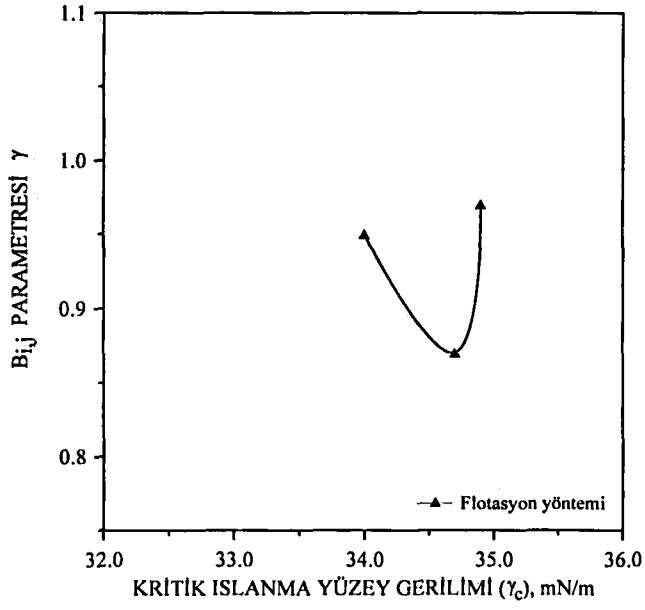


Şekil 168. Kalsit minerali için S_i ile m_f arasındaki ilişki (Sodyum-oleat ile)

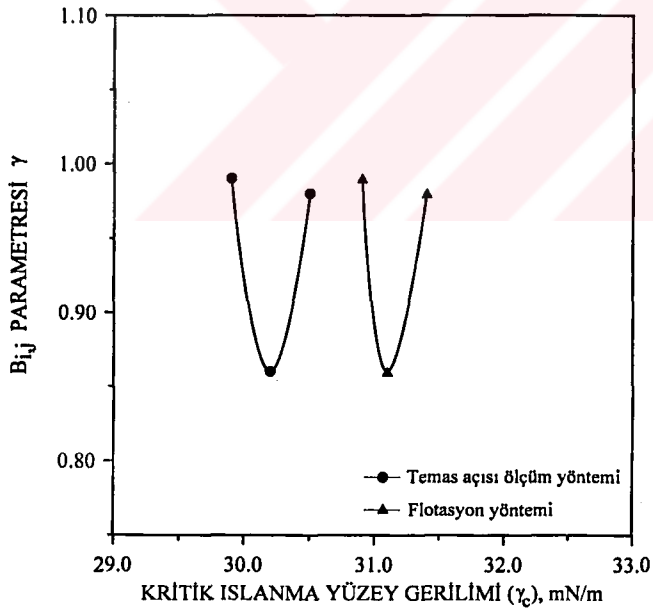


Şekil 169. Kalsit minerali için S_i ile m_f arasındaki ilişki (SDDS ile)

Şekil 170 ve 171'de ise kalsit mineralinin B_{ij} parametresi olan γ değeri (incelik faktörü) ile kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri arasındaki ilişkiler verilmiştir. Ancak, kalsit minerali için bu iki faktör arasında anlamlı bir ilişki yapılan çalışmalarda bulunamamıştır.



Şekil 170. Kalsit minerali için B_{ij} parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki (SDDS ile)



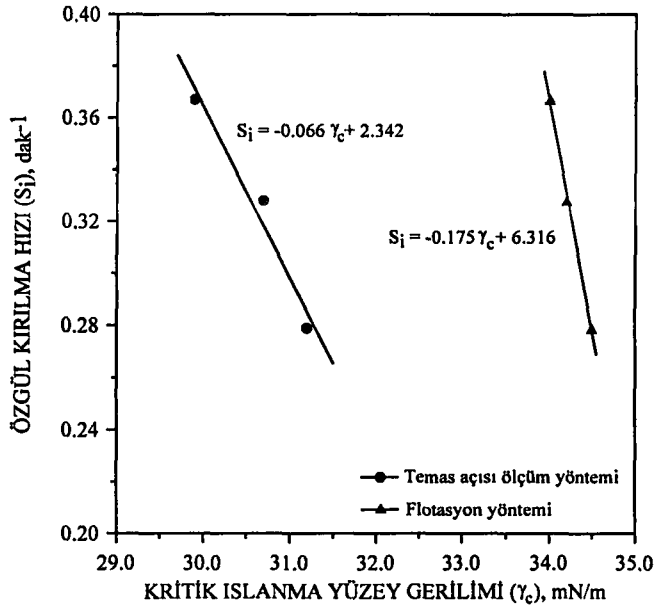
Şekil 171. Kalsit minerali için B_{ij} parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki (Sodyum-oleat ile)

3.5.2. Barit için korelasyonlar

Barit mineralinin, -600+425 μm , -425+300 μm , -300+212 μm besleme fraksiyonlarının değirmende sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızı (S_i) değerleri ve bu boyut fraksiyonlarının öğütülmesi ile elde edilen ürünler üzerinde temas açısı ölçümleri ve flotasyon testleri ile tespit edilen kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerleri arasındaki ilişki Şekil 172'de verilmiştir. Şekil 172'de görüldüğü gibi, özgül kırılma hızı (S_i) arttıkça kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri azalmaktadır. Yani, kırılma hızı yüksek olan besleme boyutunun ürünü daha düşük kritik ıslanma yüzey gerilimine sahip olup, daha hidrofobik karakterdedir. Başka bir ifadeyle, kritik ıslanma yüzey geriliminin düşük olduğu, yani daha hidrofobik olan ürün, daha hızlı kırılmıştır. S_i ile γ_c arasında belirlenen ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

$$S_i = -0.066 \gamma_c + 2.342 \quad (\text{Temas açısı ölçüm yöntemi}) \quad (62)$$

$$S_i = -0.175 \gamma_c + 6.316 \quad (\text{Flotasyon yöntemi}) \quad (63)$$



Şekil 172. Barit minerali için S_i ile γ_c arasındaki ilişki

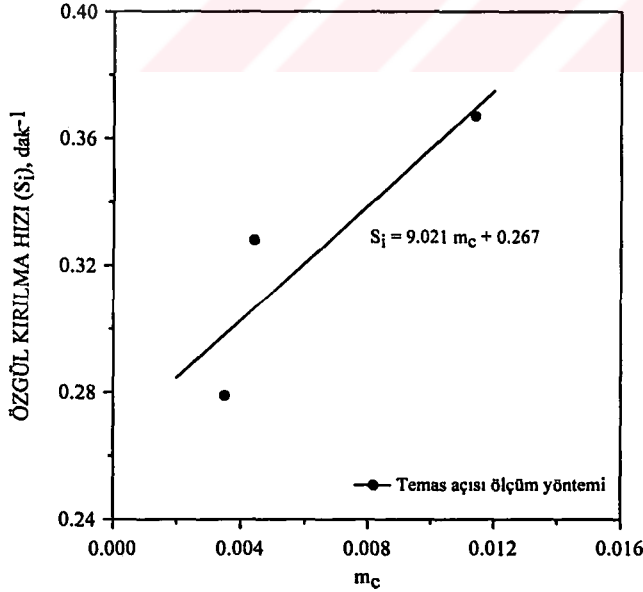
Barit minerali için $\cos \theta$ -yüzey gerilimi eğrisinin eğimi olan m_c ile S_i arasındaki ilişki Şekil 173'de, flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi olan m_f ile S_i arasındaki ilişki ise Şekil 174'de verilmiştir.

Özgül kırılma hızı arttıkça hidrobluk derecesi olan m_c değeri de artmaktadır. Yani kırılma hızı yüksek olan-düşük kritik ıslanma yüzey gerilimli (γ_c) ürün daha hidrofobiktir (Şekil 173). Şekil 174'de görüldüğü gibi özgül kırılma hızı arttıkça m_f değeri de artmaktadır. Yani kırılma hızı yüksek olan-düşük kritik ıslanma yüzey gerilimli (daha hidrofobik) ürün, flotasyon testlerinde daha yüksek verimle yüzmektedir.

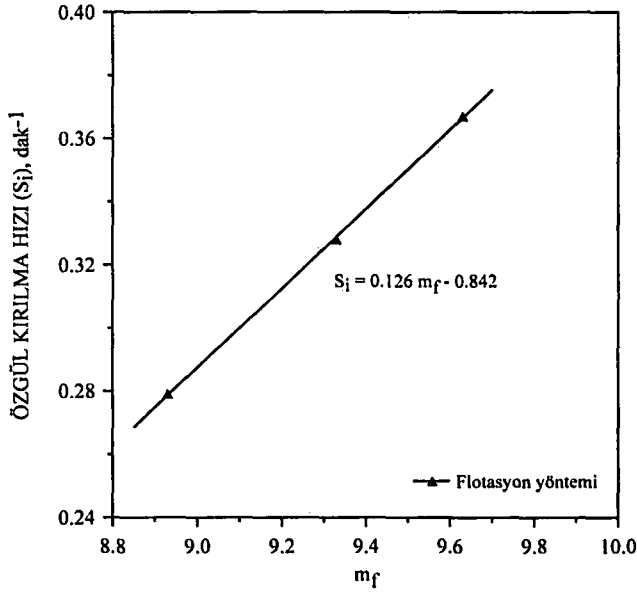
Özgül kırılma hızı S_i ile m_c ve m_f arasındaki ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

$$S_i = 9.021 m_c + 0.267 \quad (\text{Temas açısı ölçüm yöntemi}) \quad (64)$$

$$S_i = 0.126 m_f - 0.842 \quad (\text{Flotasyon yöntemi}) \quad (65)$$



Şekil 173. Barit minerali için S_i ile m_c arasındaki ilişki

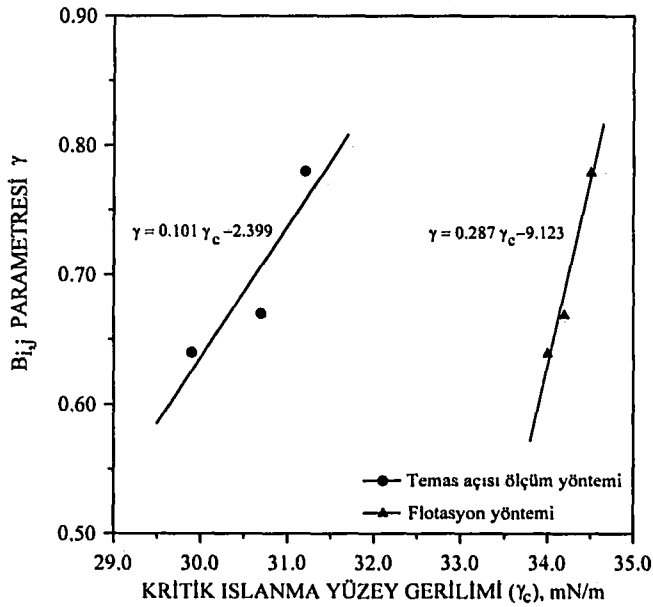


Şekil 174. Barit minerali için S_i ile m_f arasındaki ilişki

Şekil 175’de ise, barit mineralinin B_{ij} parametresi olan γ değeri (incelik faktörü) ile kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri arasındaki ilişki verilmiştir. Daha hidrofobik olan ürünün (katının), daha yüksek özgül kırılma hızına sahip olmasına paralel olarak, daha ince boyut dağılımı sunduğu (düşük γ değeri nedeniyle) şekilde görülmektedir. Bir başka ifadeyle, kritik ıslanma yüzey gerilimi düşük olan daha hidrofobik ürün, γ değeri bakımından daha ince boyut dağılımına sahiptir. Bu durum aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

$$\gamma = 0.101 \gamma_c - 2.399 \quad (\text{Temas açısı ölçüm yöntemi}) \quad (66)$$

$$\gamma = 0.287 \gamma_c - 9.123 \quad (\text{Flotasyon yöntemi}) \quad (67)$$



Şekil 175. Barit minerali için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki

3.5.3. Kömür için korelasyonlar

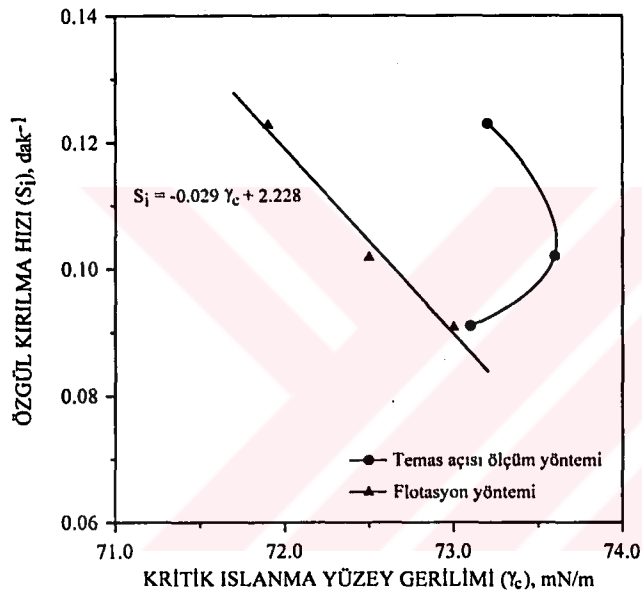
Kömürün, -600+425 μm , -425+300 μm , -300+212 μm besleme boyut fraksiyonlarının değirmende kuru, yaş ve gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen özgül kırılma hızı (S_i) değerleri ve bu boyut gruplarının öğütülmesi ile elde edilen ürünler üzerinde temas açısı ölçümleri ve flotasyon testleri ile tespit edilen kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerleri arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 176, 177 ve 178'de verilmiştir.

Şekil 176 ve 177'de görüldüğü gibi, kömürün kuru ve yaş öğütülmesi için belirlenen S_i ile flotasyon testlerinden elde edilen γ_c arasındaki ilişkiler, kırılma hızı yüksek olan besleme boyutu ürününün, daha düşük kritik ıslanma yüzey gerilimine sahip olduğunu ifade etmektedir. Ancak, temas açısı ölçümleriyle anlamlı ilişkiler belirlenememiştir. Gazyağı ile yaş öğütme için yine temas açısı ölçümleriyle anlamlı bir ilişki belirlenemezken, flotasyon testleri ile belirlenen eğilim ters yöndedir. Belirlenen anlamlı ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

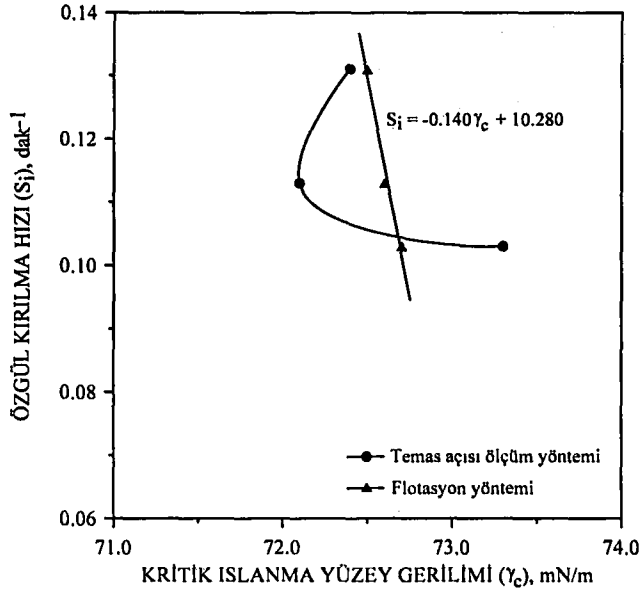
$$S_i = -0.029 \gamma_c + 2.228 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; kuru öğütme için}) \quad (68)$$

$$S_i = -0.140 \gamma_c + 10.280 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; yaş öğütme için}) \quad (69)$$

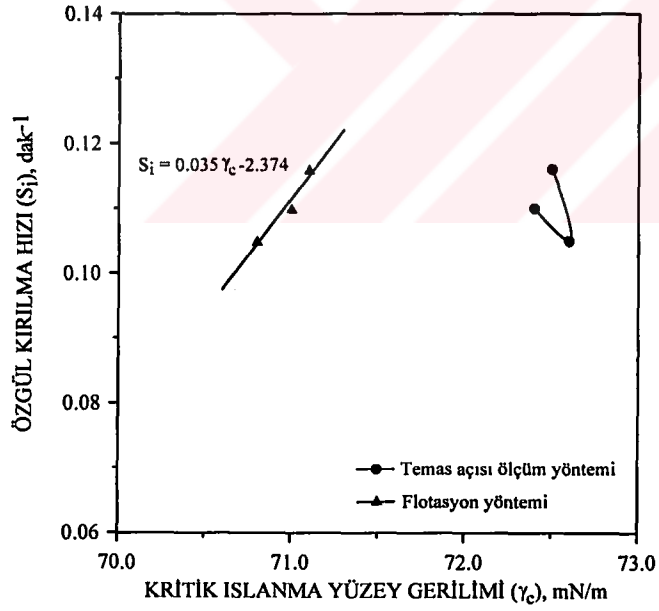
$$S_i = 0.035 \gamma_c - 2.374 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; gazyağı ile yaş öğütme için}) \quad (70)$$



Şekil 176. Kömürün kuru öğütülmesi için S_i ile γ_c arasındaki ilişki



Şekil 177. Kömürün yaş öğütülmesi için S_i ile γ_c arasındaki ilişki

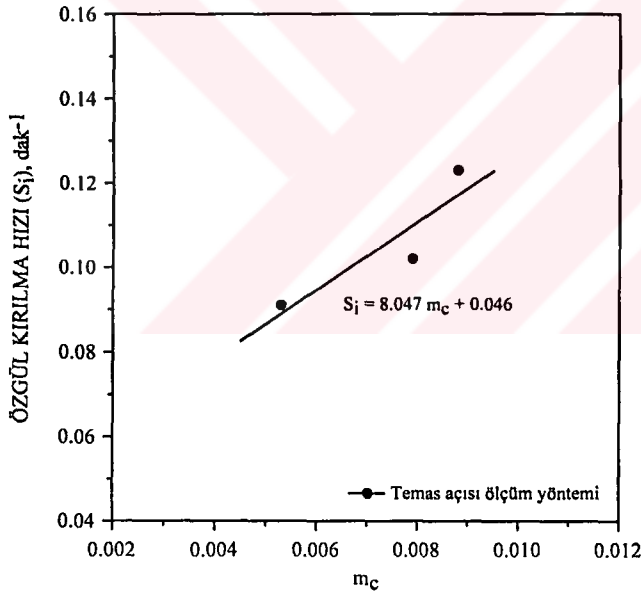


Şekil 178. Kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesi için S_i ile γ_c arasındaki ilişki

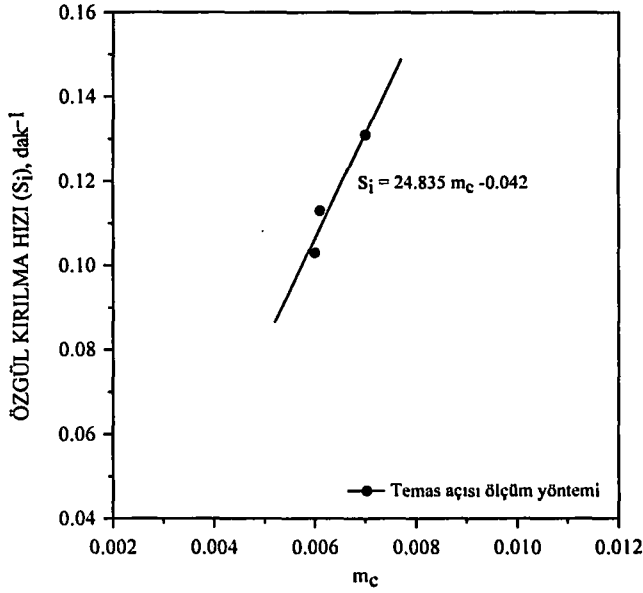
$\cos \theta$ -yüzey gerilimi eğrisinin eğimi olan m_c ile S_i arasındaki ilişki kuru öğütme için Şekil 179, yaş öğütme için Şekil 180 ve gazyağı ile yaş öğütme için ise Şekil 181’de verilmiştir. Şekil 179 ve 180’de görüldüğü gibi özgül kırılma hızı arttıkça hidrofobluk derecesi olan m_c değeri de artmaktadır. Gazyağı ile yaş öğütme için ise anlamlı bir ilişki belirlenememiştir (Şekil 181). Belirlenen anlamlı ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

$$S_i = 8.047 m_c + 0.046 \quad (\text{Temas açısı ölçüm yöntemi; kuru öğütme için}) \quad (71)$$

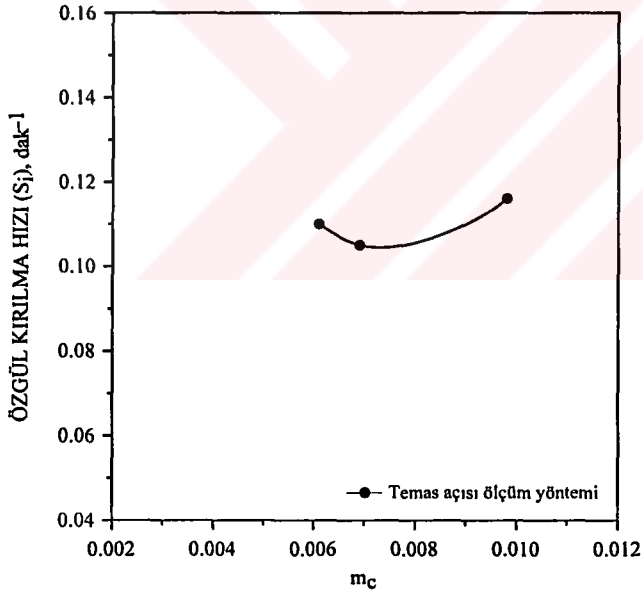
$$S_i = 24.835 m_c - 0.042 \quad (\text{Temas açısı ölçüm yöntemi; yaş öğütme için}) \quad (72)$$



Şekil 179. Kömürün kuru öğütülmesi için S_i ile m_c arasındaki ilişki



Şekil 180. Kömürün yaş öğütülmesi için S_i ile m_c arasındaki ilişki



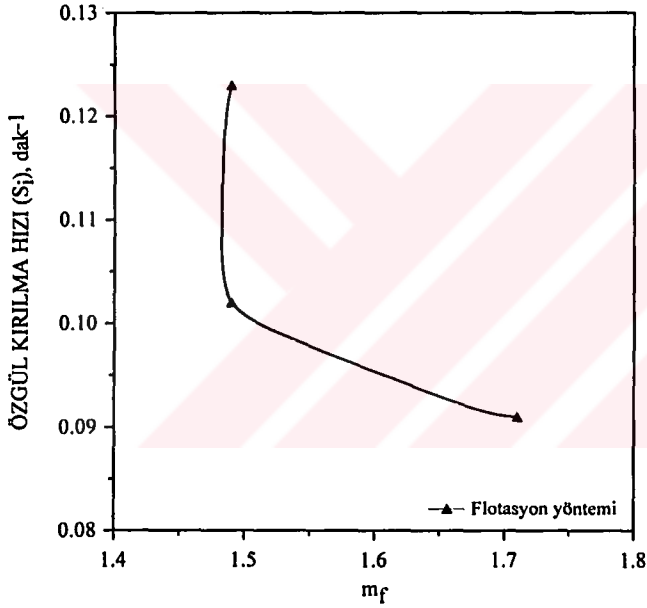
Şekil 181. Kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesi için S_i ile m_c arasındaki ilişki

Flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi olan m_f ile S_i arasındaki ilişki kuru öğütme için Şekil 182, yaş öğütme için Şekil 183 ve gazyağı ile yaş öğütme için ise Şekil 184'de verilmiştir. Kuru öğütme için anlamlı bir ilişki elde edilememiştir (Şekil 182). Yaş öğütme için temas açısı ölçümleriyle belirlenen ilişkinin (Şekil 180) aksi yönde bir eğilim mevcuttur (Şekil 183). Gazyağı ile yaş

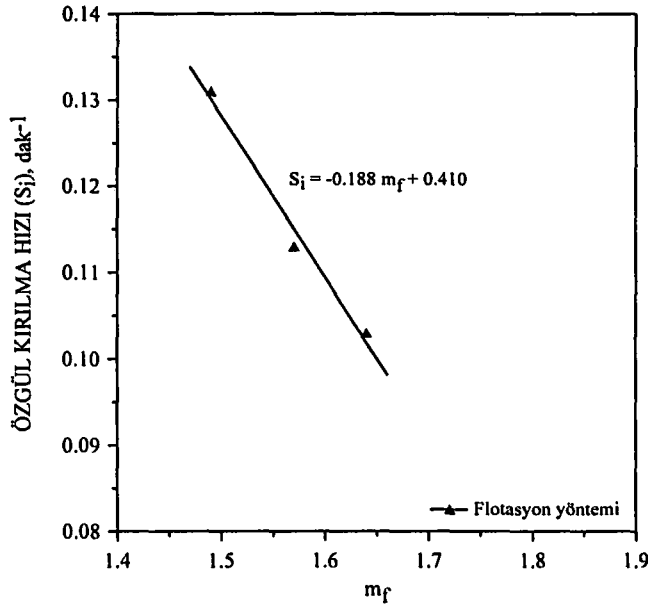
öğütme için temas açısı ölçümüyle anlamlı bir ilişki belirlenemezken (Şekil 181), flotasyon testleri ile belirlenen ilişki, özgül kırılma hızı arttıkça m_f değerinin de artması eğilimidir (Şekil 184). Belirlenen anlamlı ilişkiler, aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

$$S_i = -0.188 m_f + 0.410 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; yaş öğütme için}) \quad (73)$$

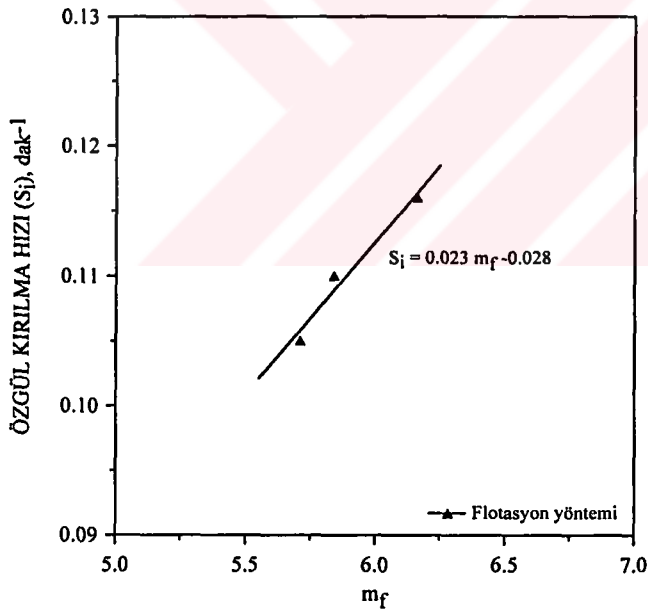
$$S_i = 0.023 m_f - 0.028 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; gazyağı ile yaş öğütme için}) \quad (74)$$



Şekil 182. Kömürün kuru öğütülmesi için S_i ile m_f arasındaki ilişki



Şekil 183. Kömürün yaş öğütülmesi için S_i ile m_f arasındaki ilişki



Şekil 184. Kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesi için S_i ile m_f arasındaki ilişki

B_{ij} parametresi olan γ değeri (incelik faktörü) ile kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri arasındaki ilişki kuru öğütme için Şekil 185, yaş öğütme için Şekil 186 ve gazyağı ile yaş öğütme için ise Şekil 187'de verilmiştir. Kuru ve yaş öğütme için temas açısı ölçüm yöntemiyle anlamlı ilişkiler belirlenemezken,

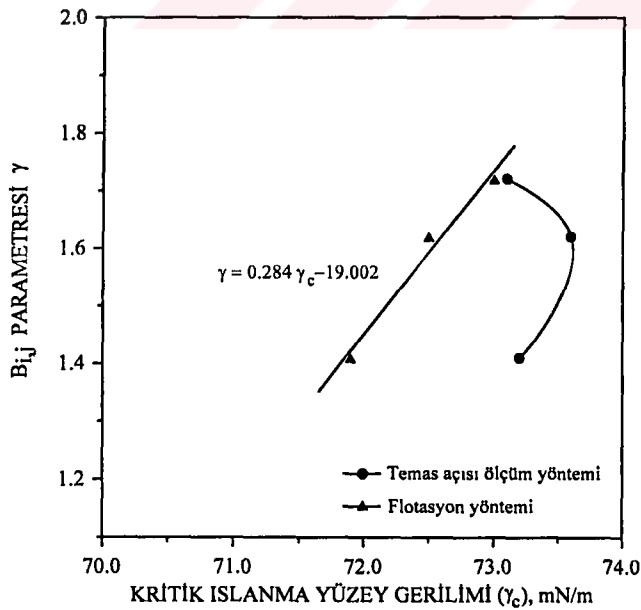
flotasyon testleri ile kritik ıslanma yüzey gerilimi düşük olan ürünün, γ değeri bakımından daha ince (düşük γ) boyut dağılımı verdiği belirlenmiştir (Şekil 185 ve 186). Bu ifadeye gazyağı ile yaş öğütme için ise temas açısı ölçümleri ile belirlenen ilişki uymaktadır, ancak flotasyon testleri ile belirlenen ilişki aksi eğilimdedir (Şekil 187). Belirlenen anlamlı ilişkiler ise aşağıdaki ampirik eşitlikler ile verilebilir:

$$\gamma = 0.284 \gamma_c - 19.002 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; kuru öğütme için}) \quad (75)$$

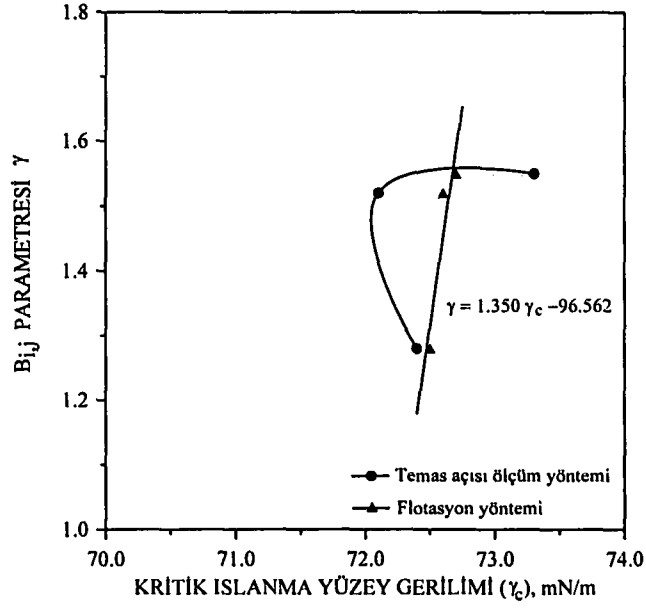
$$\gamma = 1.350 \gamma_c - 96.562 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; yaş öğütme için}) \quad (76)$$

$$\gamma = 1.450 \gamma_c - 103.513 \quad (\text{Temas açısı ölçüm yöntemi; gazyağı ile yaş öğütme için}) \quad (77)$$

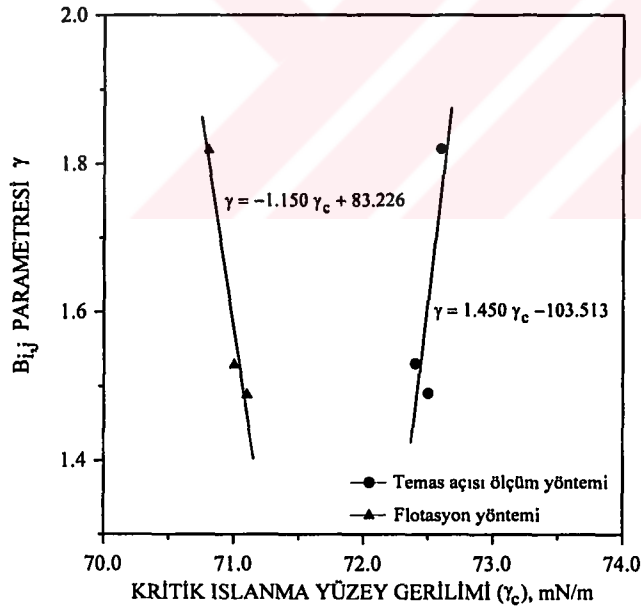
$$\gamma = -1.150 \gamma_c + 83.226 \quad (\text{Flotasyon yöntemi; gazyağı ile yaş öğütme için}) \quad (78)$$



Şekil 185. Kömürün kuru öğütülmesi için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki



Şekil 186. Kömürün yaş öğütülmesi için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki



Şekil 187. Kömürün gazyağı ile yaş öğütülmesi için $B_{i,j}$ parametresi olan γ değeri ile γ_c arasındaki ilişki

3.6. Korelasyon Bulgularının Değerlendirilmesi ve Tartışılması

Kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ parametresi olan γ) ile temas açısı ölçümleri ve flotasyon testleri ile belirlenen kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) parametresi arasında kurulan korelasyonlarla ilgili olarak aşağıdaki ifadeler verilebilir. Ayrıca, temas açısı ölçümleri ile bulunan m_c değeri ($\cos \theta$ -yüzey gerilimi eğrisinin eğimi) ve flotasyon testlerinden elde edilen m_f değeri (flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi) ile özgül kırılma hızı (S_i) arasındaki korelasyonlarla ilgili olarak aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

1. Kalsit (Şekil 165 ve 166) ve barit (Şekil 172) minerali için özgül kırılma hızı (S_i) arttıkça, kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değeri azalmaktadır. Yani, kırılma hızı yüksek olan besleme tane boyutunun ürünü daha düşük kritik ıslanma yüzey gerilimine sahip olup, daha hidrofobiktir. Bir başka ifadeyle de, kritik ıslanma yüzey geriliminin düşük olduğu yani daha hidrofobik olan ürün, daha hızlı (kolay) kırılmıştır.

Kömürün kuru ve yaş öğütülmesi için belirlenen S_i ile flotasyon testlerinden elde edilen γ_c değerleri arasındaki ilişkiler, kalsit ve barit minerali için belirlenen benzer eğilimi gösterirken, temas açısı ölçümleriyle belirlenen ilişkiler anlamlı değildir (Şekil 176 ve 177). Gazyağı ile yaş öğütme için yine temas açısı ölçümleriyle anlamlı bir ilişki tespit edilemezken, flotasyon testleri ile belirlenen eğilim ters yöndedir (Şekil 178).

2. Barit minerali için daha hidrofobik olan ürünün daha yüksek özgül kırılma hızına sahip olmasına paralel olarak daha ince boyut dağılımı verdiği belirlenmiştir (Şekil 175). Bir başka ifadeyle, kritik ıslanma yüzey gerilimi düşük, yani daha hidrofobik olan değirmen ürünü, γ değeri bakımından daha ince boyut dağılımına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Kömürün kuru ve yaş öğütme ürünleri için temas açısı ölçüm yöntemiyle anlamlı ilişkiler belirlenemezken, flotasyon testleri ile belirlenen ilişkiler barit minerali için belirlenen benzer eğilimi göstermiştir (Şekil 185 ve 186). Bu

ifadeye gazyağı ile yaş öğütme için temas açısı ölçümü yöntemiyle belirlenen ilişki de uymaktadır, ancak flotasyon testleri ile belirlenen ilişki zıt eğilimdedir (Şekil 187). Kalsit minerali için ise anlamlı ilişkiler belirlenememiştir (Şekil 170 ve 171).

3. Kalsit (Şekil 167) ve barit (Şekil 173) minerali için özgül kırılma hızı arttıkça hidrofobluk derecesi olan m_c değeri de artmaktadır. m_c değerinin artması, okunan temas açılarının daha büyük olduğunu temsil etmektedir. Yani, kırılma hızı yüksek olan besleme boyutunun ürünü daha yüksek temas açıları vermekte olup, daha hidrofobik olmaktadır. Yine, kalsit (Şekil 168 ve 169) ve barit (Şekil 174) minerali için özgül kırılma hızı arttıkça m_f değeri de artmaktadır. Yani kırılma hızı yüksek olan besleme boyutunun ürünü nispeten daha yüksek verimle yüzmektedir.

Kömürün ise kuru ve yaş öğütmesi için S_i ile m_c arasındaki ilişki kalsit ve barit minerali ile benzer eğilimi gösterirken (Şekil 179 ve 180), gazyağı ile yaş öğütme için ise anlamlı bir ilişki belirlenememiştir (Şekil 181). Kömürün kuru öğütülmesi için S_i ile m_f arasında yine anlamlı bir ilişki elde edilemezken (Şekil 182), yaş öğütülmesi için kalsit ve barit mineralinde belirlenen ilişkinin ters yönünde bir eğilim mevcuttur (Şekil 183). Gazyağı ile yaş öğütme için belirlenen ilişki ise kalsit ve barit minerali ile benzer eğilimi taşımaktadır (Şekil 184).

4. Kalsit ve barit mineralleri ile belirlenen korelasyonlar çok büyük benzerlik taşıırken, kömürde bu ilişkiler açık değildir. Bu, kömürün kalsit ve barit minerali ile karşılaştırıldığında saflığının düşük olmasına (veya heterojen bir madde olmasına) bağlanabilir. Çünkü, gerek temas açısı ölçümlerinde ve gerekse flotasyon testlerinde katıya bağlı yapısal ve yüzey özelliklerinin farklı olması nedeniyle bu olabilmektedir. Ayrıca, gazyağının öğütme işleminde kullanılması da kömürün öğütülmesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, açık bir ilişkinin (korelasyonun) kurulabilmesi zordur.

4. SONUÇLAR

Üç aşamadan oluşan bu tez çalışmasında; ilk olarak, kalsit, barit ve linyit kömürünün laboratuvar ölçekli porselen bilyalı değirmende kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülmesiyle kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$) ve öğütme ürünlerinin tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Elde edilen bu kırılma parametrelerinin yardımıyla, ürünlerin boyut dağılımlarının PSUSIM adlı paket program kullanılarak simülasyonları yapılmıştır. İkinci aşamada, değirmende kuru, yaş ve kimyasal madde ile yaş öğütülen farklı besleme boyutu fraksiyonu ürünlerinin ıslanmayı karakterize eden kritik ıslanma yüzey gerilimi değerleri (γ_c) temas açısı ölçümü ve flotasyon tekniği ile belirlenmiştir. Son aşamada ise, öğütme testlerinden elde edilen kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ parametresi olan γ) ile temas açısı ölçümleri ve flotasyon testlerinden elde edilen kritik ıslanma yüzey gerilimi parametresi (γ_c) arasındaki korelasyonlar bulunmuştur.

- Minerallerin kırılma hızlarının büyüklüğünü tanımlayan a_T değeri dikkate alınarak, barit ($a_{T-kuru} = 0.349 \text{ dak}^{-1}$) mineralinin en hızlı, sonra kalsit ($a_{T-kuru} = 0.270 \text{ dak}^{-1}$) ve en yavaş kömürün ($a_{T-kuru} = 0.127 \text{ dak}^{-1}$) kırıldığı belirlenmiştir. Her üç mineral için de yaş öğütme işlemi ile belirlenen a_T değeri, kuru öğütme için belirlenenden yüksektir. Ayrıca, kalsit ve barit mineralinin kimyasal madde ile yaş öğütülmesi için belirlenen a_T değerleri, yaş öğütme için belirlenen değerlerden yüksektir, ancak kömür için düşüktür. Bu ise kalsit ve barit mineralinin kimyasal madde ile yaş öğütülmesiyle elde edilen kırılma hızlarının yaş öğütmeden hızlı olduğunu, kömür için ise kullanılan kimyasal maddenin kırılma hızlarını azalttığını ifade etmektedir. Literatürde, "Rehbinder etkisi" olarak bilinen mekanizma yüzey aktif maddelerin adsorpsiyonu sonucu katıların yüzey serbest enerjilerinin azalması esasına dayanır ve böylelikle kırılmanın kolaylaştığı ifade edilir. Kalsit ve barit mineralinin kullanılan kimyasal maddelerle özgül kırılma hızları artmaktadır. Ancak, kömür için kullanılan kimyasal maddenin (gazyağı) uygun olmadığı ve/veya kömür yüzeylerinin okside olması buna neden olmaktadır.

- Ürün boyut dağılımının inceliğini ifade eden $B_{i,j}$ parametresi γ 'dır. γ değerinin azalması, ürün tane boyut dağılımının inceliğinin artması demektir. Çalışılan mineraller için γ değeri karşılaştırıldığında; en ince ürün boyut dağılımı veren mineralin barit ($\gamma_{\text{kuru}} = 0.85$), sonra kalsit ($\gamma_{\text{kuru}} = 1.10$) ve en iri boyut dağılımını ise kömürün ($\gamma_{\text{kuru}} = 1.58$) verdiği belirlenmiştir. Ayrıca, her üç mineralin yaş öğütme için belirlenen γ değerinin kuru öğütme için belirlenenenden düşük olduğu, yani yaş öğütme işlemi ile daha ince tane boyut dağılımına sahip ürün elde edildiği anlaşılmaktadır. Yine barit ve kalsit için kimyasal madde ile yaş öğütme için belirlenen γ değerinin, yaş öğütme için belirlenenenden nispeten düşük olduğu görülmektedir. Ancak kömür için bu değer artmakta, yani kullanılan kimyasal maddenin (gazyağı) ürün tane boyut dağılımının inceliğini azalttığı (öğütmeyi olumsuz yönde etkilediği) belirlenmiştir.
- Öğütme testleri ile belirlenen kırılma parametreleri ile birinci derece ve birinci derece olmayan kırılma bölgeleri için ürün tane boyu dağılımlarının simülasyonları yapıldığında, simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla benzer dağılımları vererek uyumlu olduğu görülmüştür. Simülasyon çalışmaları ile barit, kalsit ve kömür için yavaşlama etkisinin başlangıç süreleri genel olarak dikkate alındığında ise önce baritin, sonra kalsitin ve en sonra da kömürün yavaşlama eğilimine girdiği belirlenmiştir. Yani, a_T değeri en yüksek (en hızlı kırılan) ve γ değeri en küçük (en ince boyut dağılımı veren) olan barit mineralinin daha hızlı ve yüksek oranda ince malzeme üreterek en önce yavaşlama etkisine maruz kaldığı; a_T değeri en küçük (en yavaş kırılan) ve γ değeri en yüksek (en iri boyut dağılımı veren) olan kömür ise en geç yavaşlama etkisine maruz kaldığı belirlenmiştir.
- Çalışılan minerallerden kalsit, barit ve kömürün temas açısı ölçüm ve flotasyon yöntemi ile hidrofilik davranış gösterdiği belirlenmiştir. Yani, kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) değerleri 72 mN/m'den büyüktür. Kalsit ve barit

mineralinin kimyasal maddeler ile muamelesi sonucunda γ_c değerlerinin büyük ölçüde azaldığı yani hidrofobik davranış gösterdikleri ($\gamma_c < 72$ mN/m) tespit edilmiştir. Kömürün ise gazyağı ile yağ öğütme ürünlerinin flotasyon testlerinde, saf suda verim sifıra yakın olurken, tuz çözeltilerinde tuz konsantrasyonunun artmasına paralel olarak % verim değerleri de büyük ölçüde artmıştır. Bu durum, literatürde tuz ilavesiyle elektriksel çift tabakanın sıkıştırılması, sonrasında hava kabarcıkları ve taneler arasındaki sıvı filmlerinin incelerek kopmasına neden olarak yüzebilirliği artırdığı şeklinde ifade edilmektedir.

- Kalsit ve barit mineralleri için değirmene beslenen tane boyutu incelidikçe, azalan m_c değeri ($\cos \theta$ -yüzey gerilimi eğrisinin eğimi) ve m_f (flotasyon verimi-yüzey gerilimi eğrisinin eğimi) değeriyle birlikte γ_c değerleri artmaktadır. Mineralin hidrofobluk derecesini ifade eden m_c değerinin azalması ve γ_c 'değerinin artması, elde edilen ürünün (katının) daha az hidrofobik olduğunu ve nispeten daha düşük verimle yüzdüğünü (düşük m_f) ifade eder. Kömür için ise bazı benzer sonuçlar bulunmuştur.
- Bu minerallerin kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ parametresi olan γ) ile ıslanma parametresinin (γ_c) anlamlı korelasyonlarının olduğu belirlenmiştir. Özgül kırılma hızı (S_i) ile kritik ıslanma yüzey gerilimi (γ_c) parametresi arasında kurulan korelasyon, kalsit ve barit minerali için özgül kırılma hızı arttıkça, kritik ıslanma yüzey gerilimi değerinin azalması yönündedir. Yani, kırılma hızı yüksek olan besleme tane boyutunun ürünü daha düşük kritik ıslanma yüzey gerilimine sahip olup, daha hidrofobik olmaktadır. Bir başka ifadeyle de, kritik ıslanma yüzey geriliminin düşük olduğu yani daha hidrofobik olan ürün, daha hızlı (kolay) kırılmıştır.

- Barit minerali için diğler bir ilişki, toplam kırılma dağılım fonksiyonunun ($B_{i,j}$) incelik parametresi olan γ ile γ_c arasında bulunmuştur; yani γ_c azalırken $B_{i,j}$ parametresi olan γ 'da azalmaktadır. Bu daha hidrofobik olan ürünün, daha ince boyut dağılımı verdiğini ifade etmektedir. Bir başka ifadeyle, kritik ıslanma yüzey gerilimi düşük, yani daha hidrofobik olan değirmen ürününün, γ değeri bakımından daha ince boyut dağılımına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Fakat kalsit için benzer bir ilişki bulunamamıştır.
- Kalsit ve barit minerali için özgül kırılma hızı arttıkça hidrofobluk derecesi olan m_c değeri de artmaktadır. m_c değerinin artması, okunan temas açılarının daha büyük olduğunu temsil etmektedir. Yani, kırılma hızı yüksek olan besleme boyutunun ürünü daha yüksek temas açıları vermekte olup, daha hidrofobik olmaktadır. Yine, kalsit ve barit minerali için özgül kırılma hızı arttıkça m_f değeri de artmaktadır. Yani kırılma hızı yüksek olan besleme boyutunun ürünü nispeten daha yüksek verimle yüzmektedir.
- Kırılma parametreleri ile ıslanma parametresinin ilişkilendirilmesine yönelik çalışmalardan, kalsit ve barit mineralleri ile belirlenen korelasyonlar çok büyük benzerlik taşıırken, kömürde bu ilişkilerin açık olmadığı belirlenmiştir. Kalsit ve barit minerali çok iyi klivaj yüzeyleri içermekte ve kırılmada bir yerde en zayıf bağların bulunduğu bu yüzeylerde olmaktadır. Islanabilirlik yüzeylerdeki bu bağlarla ilgili olup, kalsit ve barit mineralinde bu nedenle benzer ilişkiler tespit edilmiştir. Ancak, kömürdeki durum kalsit ve barit minerali ile karşılaştırıldığında, kömürün heterojen bir madde olmasına bağlanabilir. Çünkü, gerek temas açısı ölçümlerinde ve gerekse flotasyon testlerinde katıya bağlı yapısal ve yüzey özelliklerinin farklı olması nedeniyle bu olabilmektedir. Ayrıca, gazyağının öğütme işleminde kullanılması da kömürün öğütülmesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, açık bir ilişkinin (korelasyonun) kurulabilmesi zordur.

Tez kapsamında yapılan çalışmada, değirmene beslenen üç boyut grubundaki mineral örneklerinin (-600+425 μm , -425+300 μm ve -300+212 μm) kırılma parametreleri (S_i ve $B_{i,j}$ parametresi olan γ) belirlenmiş ve daha sonra bu üç boyut grubunun belirlenen bir öğütme süresi sonunda elde edilen ürünleri üzerinde temas açısı ölçümleri ve flotasyon testleri yapılarak ıslanma parametreleri (γ_c , m_c ve m_f) tespit edilmiş olup, kırılma parametreleriyle ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Özetle, bir bakıma değirmene beslenen boyutun bu parametreler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Taneler küçüldükçe katı bir arada tutan bağ kuvvetlerin (*cohesive forces*) büyüklüğünde artma olur. Kırılma ile üretilen yeni yüzeyler aralarında güçlü bağ kuvvetleri gösteren ince kristal yapıları sebebiyle çok aktiftirler. Öğütmeye yardımcı maddelerin ilavesi, tanelerin yüzey serbest enerjisini azaltarak, bu bağ kuvvetlerini nötralize eder ve tanelerin kırılması için gereken enerji miktarını azaltır. Değirmene beslenen iri boyut fraksiyonunda (-600+425 μm) katı bir arada tutan bağ kuvvetleri, ince besleme boyut fraksiyonuna (-300+212 μm) göre daha zayıf olacaktır. Bu nedenle, ilave edilen yüzey aktif maddelerin katı yüzeyine adsorplanmasıyla yüzey serbest enerjisi azalmakta ve elde edilen ürün de nispeten daha hidrofobik olmaktadır. Sonuç olarak; iri besleme boyutlarının ince boyutlara göre kırılma hızlarının yüksek olmasına paralel olarak, bu boyutun ürününden elde edilen ürün de daha düşük kritik ıslanma yüzey gerilimine sahip olup, daha hidrofobiktir. İnce besleme boyutlarının kırılma hızlarının da düşük olmasına paralel olarak, bu boyutun ürününden elde edilen ürün de daha yüksek kritik ıslanma yüzey gerilimine sahip olup, daha az hidrofobiktir.

5. KAYNAKLAR

- Adamson, A. W., 1990, "Physical Chemistry of Surfaces", Fifth Edition, USA, A Wiley-Interscience Publication.
- Akdoğan, G., Johns, D., 1998, "Effect of Ferric Nitrate and PAX on Wet Milling of Quartz", *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Vol. 32, pp. 165-171, Wroclav.
- Andrade, J.D., Smith, L.M., Gregonis, D.E., 1985, "Surface and Interfacial Aspects of Biomedical Polymers", Vol. 1, *Surface Chemistry and Physics*, Ed. J.D. Andrade, Plenum Press, pp. 249-292, New York.
- Atlı, A., Somasundaran, P., 1986, "Effect of Chemical Additives on the Pulp Fluidity and Grinding on Wet Batch Ball Milling", *Ist Int. Mineral Processing Symposium*, Vol. 1, pp. 13-23, İzmir, Turkey.
- Austin, L.G., Klimpel, R.R., Luckie, P., 1984, "Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling", SME, New York.
- Austin, L.G., Yıldırım, K., Luckie, P.T., Cho, H.C., 1989, "Two Stage Ball Mill Circuit Simulator (PSUSIM)", Penn State Univ., PA, U.S.A.
- Austin, L.G., Yekeler, M., Dumm, T.F., Hogg, R., 1990, "The Kinetics and Shape Factors of Ultrafine Dry Grinding in a Laboratory Tumbling Ball Mill", *Particle & Particle Systems Characterization*, 7, pp. 242-247.
- Bhima, R.R., Narasimhan, K.S., Rao, T.C., 1991, "Effect of Additives on Grinding of Magnetite Ore", *Minerals and Metallurgical Processing*, pp. 144-151.
- Blake, T.D., Kitchener, J.A., 1972, "Stability of Aqueous Films on Hydrophobic Methylated Silica", *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1*, Vol. 68, pp. 1435-1442.
- Bond, F.C., 1968, "Crushing and Grinding Calculation", *Brit. Chem. Eng.*, 6, 378-391, 543-548.
- Brown, D.J., 1962, "Coal Flotation", Ed. D.W. Fuerstenau, *Froth Flotation 50th Anniversary Volume*, AIEM, pp. 518-538, New York.
- Cyanamid Company, 1989, "Mining Chemicals Handbook", Revised Edition, Mineral Dressing Notes No. 26-1, USA.
- Drzymala, J., 1994, "Hydrophobicity and Collectorless Flotation of Inorganic Materials", *Advances in Colloids and Interface Science*, 50, pp. 143-185.

- El-Shall, H., Vidanage, S., Somasundaran, P., 1979a, "Grinding of Quartz in Amine Solutions", *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 6, pp. 105-117.
- El-Shall, H., Görken, A., Somasundaran, P., 1979b, "Effect of Chemical Additives on Wet Grinding of Iron Ore Minerals", XIII Int. Min. Proc. Cong., Warsaw.
- El-Shall, H., Somasundaran, P., 1984, "Physico-Chemical Aspects of Grinding: A Review of Use of Additives", *Powder Technology*, Vol. 38, pp. 275-293.
- Engelhardt, W.V., 1942, *Nachr. Akad. Wiss. Gottingen, Math. Phys. Kl.*, No 2.
- Engelhardt, W.V., 1946, *Naturwissenschaften*, 33, 195.
- Frangiskos, A.Z., Smith, H.G., 1957, *Trans. Miner. Dressing Congr.*, pp. 67-84, Stockholm, Sweden.
- Fuersteneau, D.W., Venkataraman, K.S., Velamakanni, B.V., 1985, "Effect of Chemical Additives on the Dynamics of Grinding Media in Wet Ball Mill Grinding", *International Journal of Mineral Processing*, 15, pp. 251-267.
- Fuersteneau, D.W., Diao, J., Williams, M.C., 1991, "Characterization of the Wettability of Solid Particles by Film Flotation 1. Experimental Investigation", *Colloids and Surfaces*, 60, pp. 127-144.
- Garchva, S., Cotreras, S., Golgarb, J., 1978, "Hydrophobic Characterization of Powders", *Coll. and Polym. Sci.*, 256, pp. 241-250.
- Gardner, R.P., Austin, L.G., 1962, "A Chemical Engineering Treatment of Batch Grinding", *Proc. 1st European Symp. Zerkleinern*, Ed. H. Rumph and D. Behrens, Verlag Chemie, pp. 217-247, Weinheim.
- Gaudin, A.M., Miaw, H.L., Spedden, H.R., 1957, "Native Floatability and Crystal Structure", *Second Int. Congr. Surface Activity*, Vol. 3, pp. 202-219, London.
- Gibbs, J.W., 1928, "The Collected Works of J. Willard Gibbs", Vol. 1, Logmans-Green, New York.
- Ghosh, S.K., Harris, C.C., Jowett, A., 1960, *Nature*, 188, 1182.
- Gilbert, L.A., Hughes, T.H., 1962, *Symposium Zerkleinern 1*, verlag Chem., pp. 170-193, Dusseldorf, Germany
- Harkins, W.D., Brown, F.E., 1919, *J. American Chem. Soc.*, 41, 499.

- Hartley, J.N., Prisbrey, K.A., Wick, O.J., 1978, "Chemical Additives for Ore Grinding: How Effective are They ?", E&MJ, pp. 105-111.
- Herbst, J., Chairman, A., 1981, "Comminution and Energy Conservation", Dept. of Energy, Nationals Materials Advisory Board, Committee on Comminution and Energy Consumption, Publication NM+FB-364, National Academy Press, Washington, USA.
- Horlesy, R.M., Smith, H.G., 1951, "Principles of Coal Flotation", Fuel, 30, pp. 54-63.
- Kelebek, S., 1987, "Critical Surface Tension of Wetting and of Floatability of Molybdenite and Sulfur", J. of Coll. and Int. Science, 124, pp. 504-514.
- Kiesskalt, S.Z., 1949, Ver. Deult. Ing., 91, 113.
- Klimpel, R.R., 1982a, "Laboratory Studies of the Grinding and Rheology of Coal-Water Slurries", Powder Technology, Vol. 32, pp. 267-277.
- Klimpel, R.R., 1982b, "Slurry Rheology Influence on the Performance of Mineral/Coal Grinding Circuits", Mining Engineering, pp. 1665-1668.
- Klimpel, R.R., Austin, L.G, 1982, Powder Technology, Vol. 131, pp. 239-253.
- Klimpel, R.R., 1983, "Slurry Rheology Influence on the Performance of Mineral/Coal Grinding Circuits-Part 2", Mining Engineering, pp. 21-26.
- Klimpel, R.R., 1997a, "The Impact on Industrial Grinding Circuits of Changing and/or Controlling the Slurry Rheology", Comminution Practices, Ed. S. Komar Kawatra, SME, Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, pp. 1-9, Colorado, USA.
- Klimpel, R.R., 1997b, "Introduction to the Principles of Size reduction of Particles by Mechanical Means", Instructional Module Series, Series Ed. R. Rajagopalan, Particle Science Technology, 41 pages, Florida, USA.
- Klimpel, R.R., Hansen, R.D., 1989, "The Chemistry of Mineral Slurry Rheology Control Grinding Aids", Minerals and Metallurgical Processing, Vol. 6, No. 1, pp. 35-43.
- Klassen, V.I., Mokrousov, V.A., 1963, "An Introduction to the Theory of Flotation", (Trans. by J. Leja and G.W. Poling), Butterworths, pp. 338-342, London.
- Kukolev, G.V., Melnishenko, L.G., 1948, Fireproof Mater, 13, 447.
- Laapas, H., Lahtinen, U.R., Lukkarinen, T., 1984, "Effect of Surfactants in Fine Grinding", Publ. by Inst. of Mining & Metallurgy, pp. 13-17, London.

- Lando, J.L., Oakley, H.T., 1967, *J. Colloid Interface Sci.*, 25, 526.
- Laskowski, J., 1986, "The Relationship between Floatability and Hydrophobicity", *Adv. in Mineral Processing*, Ed. P. Somasundaran, SME, Littleton, pp. 189-208, USA.
- Li, C., Somasundaran, P., 1992, "Effect of NaCl on Coal Flotation", *SME Annual Meeting*: Preprint number: 92-110, Phoenix, Arizona, USA.
- Lin, I.J., Metzger, A., 1968, *Trans. AIME*, 241, 412.
- Lowrison, G.C., 1979, "Crushing and Grinding", CRC Press Inc., Cleveland.
- Locher, F.W., Seebach, H.M.V., 1972, *I and EC Process Des. Dev.*, 11, 190.
- Mallikarjunan, R., Pai, K.M., Halasyamani, P., 1968, *Trans. Indian Inst. Metal*, 18, 79.
- Olsen, D.A., Ostersaas, A.J., 1964, "The Critical Surface Tension of Glass", *The Journal of Phy. Chem.*, Vol. 68, No. 9, pp. 2730-2732.
- Öner, M., Wakamatsu, T., Nakahiro, Y., 1985, "Sümfaktantların Çimento Ögütülmesinde Kullanımı, Ögütme İnceliği ve Dayanım Üzerindeki Etkileri", *Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 9. Kongresi*, s. 283-294, Ankara.
- Öner, M., Wakamatsu, T., Nakahiro, Y., 1986, "Effect of Grinding Aids upon Ball Mill of Cement Clinker", *Mem. Fac. Eng., Kyoto Univ.*, Vol. 48, No. 2, pp. 103-119, Japan.
- Özkan, A., Yekeler, M., 2001, "A New Microscale Flotation Cell: Combination of Canadian Column and Partridge-Smith Cell", *Proceedings of the Seventeenth International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, pp. 759-763, Ankara.
- Padday, J.F., 1968, "The Measurement of Surface Tension", *Surface Tension Part II, Surface and Colloidal Science*, 1, pp. 101-149, New York.
- Parekh, B.K., Aplan, F.F., 1974, "Wetting Properties of Minerals Coated with Surfactants", *Proc. of Chem. Inst. Canada, Floc. and Disp. Symp.*, pp. 21-35, Toronto.
- Parekh, B.K., Aplan, F.F., 1980, "The Critical Surface Tension of Wetting of Coal", *Rec. Dev. in Sep. Sci.*, Vol. 4, Ed. N.N. Li, CRC Press Inc., West Palm Beach, pp. 107-113, Florida, USA.
- Partridge, A.C., Smith, G.W., 1971, "Small-sample Flotation Testing: A New Cell", *Trans. Inst. Min. Metall*, 80, C199-C200.

- Pollmanns, J., Pollmanns, G.J., Hoberg, H., Schneider, F.U., 1993, "Ultrafine Grinding with Solid Additives", XVIII International Mineral Processing Congress, pp. 219-226, Sydney.
- Rajamani, R.K., Guo, D., 1992, "Acceleration and Deceleration of Breakage Rates in Wet Ball Mills", *Int. J. of Mineral Processing*, 34, pp. 103-118.
- Ralston, J., Newcombe, G., 1992, "Static and Dynamic Contact Angles", *Colloid Chemistry in Mineral Processing*, Chapter 5, Ed. J.S. Laskowski, J. Ralston, Netherlands, Elsevier.
- Rehbinder, P.A., 1931, "Hardness Reduction through Adsorption of Surface Active Agents", *Physic*, 72, pp. 191-205.
- Rosano, H.L., Gerbacia, W., Feinstein, M.E., Swaine, J.W., 1971, "Determination of the Critical Surface Tension using an Automatic Wetting Balance", *J. of Coll. and Int. Science*, 36(3), pp. 298-307.
- Ryncarz, A., Laskowski, J., 1977, "Influence of Flotation Reagents on the Wet Grinding of Quartz", *Powder Technology*, Vol. 18, pp. 179-185.
- Savage, K.I., Austin, L.G., Sun, S.C., 1974, *Trans. AIME*, 225, 89.
- Shafrin, E.G., Zisman, W.A., 1960, "Constitutive Relations in the Wetting of Low Energy Surfaces and the Theory of the Retraction Method of Preparing Monolayers", *J. of Phy. Chem.*, 64, pp. 519-524.
- Sohoni, S., Sridhar, R., Mandal, G., 1991, "The Effect of Grinding Aids on the Fine Grinding of Limestone, Quartz and Portland Cement Clinker", *Powder Technology*, 67, pp. 277-286.
- Somasundaran, P., Lin, I.J., 1972, *I and EC Processes Des. Dev.*, 11, 321.
- Sönmez, B., Demirel, H., 1996, "Determination of Breakage Parameters in Laboratory Scale Ball Mill and Scale-up of Ball Milling", *Proceedings of the 6th International Mineral Processing Symposium*, pp. 617-622, Kuşadası, Turkey.
- Sun, S.C., Troxell, R.C., 1957, "Try Bubble Pick up for Rapid Flotation Testing", *E&M.J.*, 158(7), pp. 79-80.
- Szantho, E., 1949, *fur Erzberglass und Metallhüttenwesen*, 2, 353.
- Tangsathitkulchai, C., Austin, L.G., 1985, "The Effect of Slurry Density on Breakage Parameters of Quartz, Coal and Copper Ore in a Laboratory Ball Mill", *Powder Technology*, Vol. 42, pp. 287-296.
- Tarjan, G., 1981, *Mineral Processing*, 1, Akademiai kiado, Budapest, pp. 221.

- Tate, T., 1864, *Phil. Mag.*, 27, 176.
- Tucker, P., 1984, "The Influence of Pulp Density on the Selective Grinding of Ores", *International Journal of Mineral Processing*, 12, pp. 273-284.
- Wang, Y., Forssberg, E., 1997, "Ultra-fine Grinding and Classification of Minerals", *Comminution Practices*, Ed. S. Komar Kawatra, SME, Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, pp. 203-214, Colorado, USA.
- Weast, R.C., 1987, "Handbook of Chemistry and Physics", 68th edition, CRS Press, New York.
- Wenzel, R.N., 1936, *Ind. Eng. Chem.*, 28, 988.
- Westwood, A.R.C., Goldheim, D.L., Lye, R.G., 1967, *Phil. Mag.*, 16, 505.
- Williams, M.C., Fuerstenau, D.W., 1987, "A Simple Flotation Method for Rapidly Assessing the Hydrophobicity of Coal Particles", *Int. J. of Min. Proc.*, 20, pp. 153-157.
- Wills, B.A., 1985, "Mineral Processing Technology", 3rd. Edition.
- Wu, S., 1968, "Estimation of the Critical Surface Tension for Polymers from Molecular Constitution by a Modified Hildebrand-Scott Equation", *J. of Phy. Chem.*, 72(9), pp. 3332-3334.
- Yarar, B., Kaoma, J., 1984, "Estimation of the Critical Surface Tension of Wetting of Hydrophobic Solids by Flotation", *Colloids and Surfaces*, 11, pp. 429-436.
- Yarar, B. 1988, "Gamma Flotation: A New Approach to Flotation, using Liquid-Vapor Surface Tension Control", *Developments in Min. Proc.*, pp. 41-64.
- Yarar, B., Aksu, S., 1997, "Quantification of the Roles of Surface Heterogeneity and Roughness in the Establishment of the Critical Surface Tension of Wetting of Hydrophobic Solids", XX International Mineral Processing Congress, Vol. 1, pp. 41-51, Aachen, Germany.
- Yekeler, M., Yarar, B., 1994a, "Critical Surface Tension of Wetting of Low Surface Energy Minerals and Their Separations by Gamma Flotation: Realger, Talc, Stibnite and Sulfur", SME Annual Meeting, Preprint number: 94-17, Albuquerque, New Mexico, USA.
- Yekeler, M., Yarar, B., 1994b, "Techniques for Assessing the Floatability Characteristics of Minerals", Çukurova Univ. Müh.-Mim. Fak. 15. Yıl Sempozyumu, pp. 473-480.

- Yekeler, M., Özkan, A., Teke, E., 1997, "Barit Mineralinin İnce Öğütülmesinin Kinetiği", 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, s. 154-159, İzmir.
- Yekeler, M., Özkan, A., Austin, L.G., 2001, "Kinetics of Fine Wet Grinding in a Laboratory Ball Mill", Powder Technology, 114, pp. 224-228.
- Yoon, R.H., 1994, Column Flotation Seminar Notes, ITU Mining Engineering Dept., İstanbul.
- Young, T., 1805, Phil. Trans. R. Soc., 95, 65, London.
- Zheng, J., Harris, C.C., Somasundaran, P., 1997, "Powder Surface and Polymer Structural Changes in Ultrafine Grinding in Stirred Media Mills", Comminution Practices, Ed. S. Komar Kawatra, SME, Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, pp. 233-239, Colorado, USA.
- Ziegler, E., 1956, Schrirenreihe der Zementindustrie, No. 19, Verein Deutscher Zementwerke, Dusseldorf, Germany.
- Zisman, W.A., 1964, "Relation of Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution", in Contact Angle, Wettability, and Adhesion, Ed. R.F. Gould, Advances in Chemistry Series No.43, Amer. Chem. Soc., pp. 1-51.

6. ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Sivas'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sivas Karşıyaka Okulu'nda, liseyi İstanbul Anadolu Denizcilik Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1990 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 1994'te mezun olup, 1995 yılında aynı bölümde araştırma görevlisi oldu. 1996 yılında yüksek lisansını tamamlayıp, doktora eğitimine başlayan Alper ÖZKAN evli ve bir çocuk babası olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.





EK 1.A. Kalsit Mineralinin Kuru Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1180+850 µm besleme boyutu kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	29.78	47.30	64.89	84.82	97.57

-850+600 µm besleme boyutu kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	30.08	47.34	66.62	87.91	98.49

-600+425 µm besleme boyutu kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	32.78	49.28	69.51	88.51	98.54	100.00	100.00
300	14.09	24.30	40.12	63.28	90.02	99.93	100.00
212	8.68	15.34	26.70	44.82	74.95	98.95	100.00
150	5.63	9.94	17.65	30.69	56.42	92.00	99.83
106	4.09	7.15	13.02	23.15	44.33	79.87	98.25
75	2.85	4.86	9.20	16.51	33.15	63.23	90.11
53	2.12	3.62	6.87	12.35	25.65	51.27	78.35
38	1.53	2.65	4.91	9.19	18.46	39.40	63.39

-425+300 µm besleme boyutu kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	26.98	39.42	59.02	79.68	96.26	99.96	100.00
212	13.17	20.46	35.47	55.17	83.39	99.47	100.00
150	8.08	12.40	22.31	37.05	62.76	94.88	99.91
106	6.06	8.84	16.33	27.75	49.21	83.94	98.95
75	4.50	6.45	11.79	20.28	37.12	67.13	92.68
53	3.59	4.97	9.03	15.62	29.08	53.92	80.67
38	2.82	3.80	6.77	11.30	21.35	40.77	66.16

-300+212 μm besleme boyutu kalsitin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	22.40	29.79	49.03	73.82	93.60	99.50	100.00
150	9.62	18.01	32.11	46.08	67.03	95.12	99.95
106	6.24	11.78	21.05	31.05	50.05	84.01	99.27
75	4.53	8.03	14.99	23.19	38.13	68.13	93.01
53	3.48	5.92	10.89	17.01	30.12	54.21	81.12
38	2.85	4.51	8.03	12.52	22.01	41.09	67.50

EK 1.B. Kalsit Mineralinin Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1180+850 μm besleme boyutu kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	30.64	48.60	73.53	91.41	98.81

-850+600 μm besleme boyutu kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
850	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	39.02	52.25	72.77	91.78	99.29	100.00
425	19.67	30.15	48.29	76.77	97.38	99.98
300	12.41	19.82	33.74	58.78	92.77	99.96
212	8.89	14.37	25.16	45.80	83.32	99.89
150	6.58	10.73	19.08	35.50	67.80	99.22
106	5.24	8.72	15.42	29.26	56.35	95.62
75	4.01	6.82	12.05	22.93	45.01	84.01
53	3.23	5.56	9.89	18.87	37.17	70.33
38	2.49	4.38	7.68	14.64	29.07	55.20

-600+425 μm besleme boyutu kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	37.44	56.13	75.93	93.51	99.47	100.00	100.00
300	18.38	31.62	47.07	74.65	97.53	99.98	100.00
212	11.96	21.35	32.68	55.59	91.38	99.91	100.00
150	8.28	14.86	23.55	41.23	75.22	99.54	99.98
106	6.47	11.19	18.58	32.91	61.08	97.10	99.92
75	4.93	8.17	14.04	25.46	47.52	85.89	99.60
53	3.72	6.37	11.36	20.32	37.94	71.18	97.12
38	2.90	4.63	8.52	15.44	29.26	54.43	86.43

-425+300 μm besleme boyutu kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	35.83	48.82	69.18	89.68	98.46	99.84
212	19.74	28.76	43.61	69.04	94.35	99.70
150	12.92	18.97	29.56	48.54	81.29	99.37
106	9.84	14.33	22.59	37.90	66.47	97.32
75	7.34	10.76	17.25	28.85	50.92	88.08
53	5.96	8.52	13.80	23.27	41.31	74.09
38	4.71	6.69	10.73	17.96	32.01	57.61

-300+212 μm besleme boyutu kalsitin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	29.68	42.29	60.95	85.15	97.32	99.84
150	13.89	20.96	32.88	56.15	86.62	99.62
106	9.75	14.89	23.36	41.28	70.77	97.85
75	7.07	10.66	16.93	30.43	53.26	88.52
53	5.59	8.55	13.24	24.21	41.97	74.92
38	4.40	6.68	10.23	18.82	31.50	57.64

EK 1.C. Kalsit Mineralinin Sodyum Dodesil Sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1180+850 μm besleme boyutu kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	29.48	45.76	69.54	87.81	97.84

-850+600 μm besleme boyutu kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
850	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	36.84	50.61	69.29	89.28	98.99	99.98
425	18.49	28.50	44.68	71.92	96.83	99.96
300	11.70	18.82	31.06	54.86	91.07	99.94
212	8.38	13.82	23.58	43.55	79.96	99.90
150	6.11	10.45	18.00	34.25	64.48	99.11
106	4.91	8.59	14.86	28.65	53.66	94.93
75	3.86	6.69	11.74	22.75	43.07	81.91
53	3.05	5.47	9.74	18.80	36.03	68.10
38	2.41	4.27	7.58	14.74	28.34	53.66

-600+425 μm besleme boyutu kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	42.62	55.84	74.45	93.84	99.66	100.00	100.00
300	20.79	29.49	46.14	75.36	97.49	100.00	100.00
212	13.75	20.02	32.64	56.67	91.16	99.98	100.00
150	9.51	14.02	23.53	42.05	74.73	99.72	99.98
106	7.22	10.82	18.51	33.55	60.63	97.40	99.94
75	5.32	8.12	13.99	26.07	47.80	85.80	99.71
53	4.11	6.36	11.14	20.95	38.94	72.14	97.22
38	3.03	4.78	8.50	16.13	30.42	56.81	87.21

-600+425 µm besleme boyutu kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1.5×10^{-3} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	38.51	50.93	74.42	93.49	99.57	100.00
300	17.43	25.70	46.14	74.28	96.97	99.98
212	11.27	17.33	32.37	55.20	89.84	99.94
150	7.71	12.25	23.19	40.45	72.30	99.06
106	5.95	9.68	18.32	32.35	58.64	94.81
75	4.47	7.47	13.95	25.29	46.33	80.36
53	3.58	6.09	11.23	20.39	37.69	66.90
38	2.75	4.84	8.64	15.82	29.60	53.64

-425+300 µm besleme boyutu kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	35.41	49.05	68.60	89.78	99.03	100.00
212	18.86	28.63	42.94	68.64	94.92	99.98
150	12.20	18.76	28.85	47.96	81.76	99.74
106	9.29	14.28	22.23	37.08	66.95	97.53
75	7.06	10.60	16.72	28.43	51.15	89.01
53	5.77	8.57	13.45	22.95	41.99	74.58
38	4.59	6.61	10.33	17.65	32.60	57.99

-300+212 µm besleme boyutu kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	29.67	43.43	62.37	85.45	97.71	99.98
150	13.66	21.50	34.29	55.68	86.44	99.80
106	9.53	14.97	24.43	40.40	69.58	97.93
75	6.84	10.77	17.75	29.50	52.13	88.53
53	5.49	8.54	13.96	23.46	41.62	74.40
38	4.34	6.68	10.69	17.93	31.87	57.75

EK 1.D. Kalsit Mineralinin Sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile Yaş Öğütülmesiyle
Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1180+850 μm besleme boyutu kalsitin sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	32.50	48.01	69.51	88.41	98.17

-850+600 μm besleme boyutu kalsitin sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
850	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	36.54	50.81	71.35	90.67	99.03	99.84
425	17.88	27.93	45.53	73.67	96.80	99.80
300	11.17	18.08	31.47	55.12	90.92	99.76
212	7.92	13.11	23.63	42.59	79.10	99.70
150	5.86	9.68	17.99	33.04	62.62	98.69
106	4.71	7.79	14.77	27.41	51.85	94.14
75	3.72	6.04	11.55	21.62	41.25	81.07
53	3.01	4.91	9.48	17.86	34.50	67.04
38	2.38	3.76	7.39	14.04	26.99	52.72

-600+425 μm besleme boyutu kalsitin sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	42.22	57.51	76.20	93.53	99.56	100.00
300	19.84	30.13	46.46	73.77	97.26	100.00
212	13.09	20.18	32.54	55.07	90.50	99.98
150	9.01	14.02	23.20	40.64	73.86	99.65
106	6.80	10.79	18.30	32.43	60.10	97.13
75	4.89	7.92	13.69	24.97	46.99	86.29
53	3.70	6.24	10.96	20.07	38.15	72.20
38	2.62	4.62	8.27	15.33	29.51	56.46

-425+300 μm besleme boyutu kalsitin sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile yaş öğütölmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	33.46	48.22	68.50	89.18	98.75	99.87
212	17.75	27.94	42.62	67.12	93.92	99.63
150	11.49	18.13	28.29	46.03	78.86	99.07
106	8.81	13.68	21.82	35.74	62.77	96.58
75	6.67	10.13	16.37	27.58	48.10	86.24
53	5.50	8.08	13.13	22.29	39.34	72.08
38	4.35	6.21	10.13	17.16	30.30	55.93

-300+212 μm besleme boyutu kalsitin sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile yaş öğütölmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	30.32	42.98	61.38	85.62	97.84	99.91
150	13.91	21.01	32.81	56.24	86.85	99.82
106	9.87	14.56	23.35	41.68	71.01	98.11
75	7.10	10.71	16.41	30.52	53.48	89.63
53	5.71	8.32	13.12	24.39	42.21	76.19
38	4.45	6.72	10.15	19.01	31.89	58.71

EK 1.E. Kalsit Mineralinin Aero 845 (55 mg/L) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1180+850 µm besleme boyutu kalsitin Aero 845 (55 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	32.89	48.21	69.89	88.61	98.59

-850+600 µm besleme boyutu kalsitin Aero 845 (55 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
850	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	37.34	53.61	71.63	92.14	99.25	99.96
425	18.84	30.63	46.58	76.10	97.41	99.92
300	11.92	20.17	32.42	57.69	91.86	99.86
212	8.54	14.79	24.44	45.07	80.81	99.69
150	6.21	10.95	18.49	34.76	64.27	98.70
106	4.88	8.84	15.18	28.62	52.96	94.27
75	3.78	6.91	11.98	22.54	42.42	82.32
53	3.07	5.73	9.87	18.60	35.07	68.43
38	2.44	4.46	7.82	14.53	27.35	53.77

-600+425 µm besleme boyutu kalsitin Aero 845 (55 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	39.93	54.37	75.68	93.63	99.64	100.00
300	18.12	28.48	46.29	73.32	97.49	100.00
212	11.70	18.95	32.53	54.21	91.05	99.98
150	8.03	13.19	23.26	39.70	74.74	99.61
106	6.16	10.20	18.38	31.95	60.96	96.93
75	4.64	7.65	13.89	24.95	47.84	86.01
53	3.67	6.15	11.00	20.11	38.63	71.61
38	2.81	4.65	8.48	15.38	30.09	55.45

-425+300 μm besleme boyutu kalsitin Aero 845 (55 mg/L) ile yaş öğütölmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağıllımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	36.06	49.14	69.07	89.70	98.75	99.88
212	19.99	28.70	43.43	68.54	94.31	99.76
150	13.08	18.89	29.18	47.64	80.61	99.43
106	9.98	14.21	22.20	36.97	65.49	97.20
75	7.55	10.73	16.68	28.59	50.69	87.61
53	6.17	8.61	13.57	23.19	40.98	73.21
38	4.95	6.72	10.43	17.75	31.62	57.24

-300+212 μm besleme boyutu kalsitin Aero 845 (55 mg/L) ile yaş öğütölmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağıllımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	30.77	43.47	61.15	85.41	97.66	99.85
150	14.45	22.17	33.33	55.95	85.88	99.52
106	10.11	15.63	23.80	41.13	69.28	97.55
75	7.13	11.32	17.40	30.47	52.07	88.29
53	5.68	9.01	13.78	24.33	41.13	74.41
38	4.42	7.10	10.63	18.87	31.71	57.85

EK 1.F. Kalsit Mineralinin Oleik Asit (2×10^{-4} M) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1180+850 μm besleme boyutu kalsitin oleik asit (2×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	28.55	45.29	69.66	88.74	98.31

-850+600 μm besleme boyutu kalsitin oleik asit (2×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
850	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	36.19	49.82	73.12	91.15	99.03	99.92
425	18.00	28.16	48.55	74.40	97.01	99.88
300	11.28	18.39	33.51	55.99	91.61	99.84
212	8.14	13.43	25.30	43.46	80.36	99.77
150	6.00	9.97	19.16	33.71	63.81	98.88
106	4.83	8.04	15.56	27.85	52.49	94.69
75	3.81	6.23	12.13	21.86	41.86	82.24
53	3.17	5.18	9.92	18.26	34.80	68.62
38	2.53	4.10	7.67	14.15	26.98	53.98

-600+425 μm besleme boyutu kalsitin oleik asit (2×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	40.34	56.83	77.48	93.61	99.61	100.00
300	18.94	30.12	48.27	74.62	97.69	100.00
212	12.49	20.09	33.72	56.58	91.29	99.98
150	8.60	13.83	23.9	41.57	75.68	99.67
106	6.65	10.53	18.56	33.19	61.51	97.24
75	4.94	7.76	13.90	25.47	47.84	86.45
53	3.84	6.08	10.88	20.13	38.89	71.94
38	2.83	4.48	7.99	15.31	29.87	55.84

-600+425 μm besleme boyutu kalsitin oleik asit (7.5×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	41.66	57.20	77.20	93.80	99.52	100.00
300	19.24	29.71	46.07	74.62	97.49	99.98
212	12.42	19.68	31.55	55.24	91.43	99.96
150	8.25	13.33	22.14	40.31	75.63	99.71
106	6.10	9.99	17.27	31.93	61.16	97.44
75	4.26	7.15	12.88	24.55	47.37	86.68
53	3.18	5.49	10.06	19.40	38.14	72.32
38	2.15	3.85	7.35	14.49	29.45	56.34

-425+300 μm besleme boyutu kalsitin oleik asit (2×10^{-4} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), Dakika					
	1	2	4	8	16	32
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	35.10	49.36	69.06	89.98	98.92	99.96
212	19.28	28.75	43.52	68.78	94.21	99.91
150	12.56	18.83	28.76	47.60	79.65	99.47
106	9.58	14.31	21.91	36.88	64.22	97.14
75	7.25	10.75	16.56	28.25	49.16	87.38
53	5.96	8.75	13.30	23.00	39.92	73.25
38	4.80	6.85	10.28	17.66	30.92	56.81

EK 2.A. Kalsit Mineralinin Kuru Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 µm besleme boyutu kalsitin kuru öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.8	8 / 6.5	16 / 12.3	32 / 23.4	64 / 38.3
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	26.16	42.90	64.00	81.92	95.98	99.77	99.99
300.0	12.27	23.40	41.09	61.57	86.17	98.33	99.91
212.1	7.60	14.86	27.65	45.06	72.65	94.15	99.40
150.0	5.17	10.10	19.24	32.80	58.43	86.37	97.57
106.1	3.65	7.08	13.59	23.80	45.44	75.52	93.24
75.0	2.63	5.02	9.66	17.19	34.47	63.10	85.73
53.0	1.93	3.59	6.87	12.35	25.65	50.67	75.37
37.5	1.44	2.60	4.90	8.84	18.81	39.40	63.39

-425+300 µm besleme boyutu kalsitin kuru öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 7.0	16 / 12.7	32 / 22.9	32 / 38.9
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	23.61	38.03	59.22	78.27	93.35	99.22	99.97
212.5	11.08	20.22	36.82	56.89	80.35	95.82	99.68
150.3	7.09	12.94	24.58	40.90	65.14	88.46	98.34
106.3	5.06	9.01	17.19	29.58	50.87	77.61	94.71
75.1	3.79	6.52	12.30	21.48	38.79	64.96	87.87
53.1	2.93	4.82	8.91	15.62	29.08	52.28	77.97
37.6	2.32	3.64	6.52	11.36	21.53	40.77	66.16

-300+212 µm besleme boyutu kalsitin kuru öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.8	16 / 12.0	32 / 21.8	64 / 38.5
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	21.40	33.67	52.77	70.39	87.84	97.70	99.86
150.0	9.49	17.04	31.08	47.63	70.34	90.72	98.89
106.1	6.27	11.00	20.48	33.06	53.87	79.43	95.70
75.0	4.58	7.76	14.32	23.53	40.48	66.09	89.17
53.0	3.57	5.75	10.34	17.01	30.12	52.88	79.38
37.5	2.86	4.37	7.60	12.39	22.26	41.09	67.50

EK 2.B. Kalsit Mineralinin Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 µm besleme boyutu kalsitin yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.7	8 / 6.3	16 / 11.5	32 / 21.1	64 / 42.0
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	30.70	49.71	70.38	87.38	97.61	99.89	100.00
300.0	15.97	29.94	49.25	71.05	91.16	99.16	100.00
212.1	10.60	20.52	35.77	56.26	81.34	96.87	99.96
150.0	7.62	14.88	26.67	44.13	69.90	92.19	99.74
106.1	5.63	11.02	20.07	34.36	58.32	84.88	98.93
75.0	4.21	8.21	15.12	26.54	47.51	75.53	96.86
53.0	3.17	6.13	11.36	20.32	37.94	65.06	92.81
37.5	2.41	4.59	8.52	15.44	29.80	54.43	86.43

-425+300 µm besleme boyutu kalsitin yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.5	16 / 11.8	32 / 21.7
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	27.84	44.71	67.54	83.39	95.90	99.70
212.5	14.37	26.21	46.39	65.23	86.89	98.19
150.3	9.71	17.95	33.51	50.42	75.14	94.34
106.3	7.17	13.16	25.01	39.03	62.91	87.70
75.1	5.48	9.90	18.93	30.20	51.45	78.72
53.1	4.26	7.53	14.38	23.27	41.31	68.35
37.6	3.37	5.78	10.94	17.85	32.66	57.61

-300+212 µm besleme boyutu kalsitin yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.2	16 / 11.2	32 / 20.8
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	25.29	40.09	58.46	76.17	92.08	99.04
150.0	12.43	22.48	36.22	55.81	79.00	95.53
106.1	8.54	15.41	25.12	41.64	65.16	88.76
75.0	6.40	11.35	18.51	31.62	52.65	79.39
53.0	5.01	8.64	14.24	24.21	41.97	68.63
37.5	3.99	6.67	10.95	18.56	33.08	57.64

EK 2.C. Kalsit Mineralinin Sodyum Dodesil Sülfat (SDDS, 2×10^{-4} M) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 μm besleme boyutu kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4}) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.5	8 / 6.3	16 / 11.6	32 / 22.3	64 / 43.6
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	32.44	52.20	71.10	89.31	98.30	99.96	100.00
300.0	16.75	31.40	49.30	73.49	92.81	99.56	100.00
212.1	11.07	21.42	35.48	58.34	83.51	98.00	99.98
150.0	7.96	15.52	26.31	45.72	72.04	94.20	99.85
106.1	5.89	11.50	19.75	35.54	60.13	87.60	99.24
75.0	4.41	8.58	14.85	27.40	48.90	78.50	97.46
53.0	3.32	6.41	11.15	20.95	38.94	67.86	93.62
37.5	2.52	4.81	8.35	15.90	30.48	56.81	87.22

-425+300 μm besleme boyutu kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4}) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.3	16 / 11.9	32 / 22.0
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	29.00	46.47	68.58	84.25	96.74	99.81
212.5	14.80	27.04	46.80	65.73	88.47	98.64
150.3	9.94	18.42	32.12	50.45	76.85	95.24
106.3	7.34	13.48	23.85	38.80	64.33	88.86
75.1	5.62	10.15	17.83	29.88	52.48	79.80
53.1	4.37	7.72	13.88	22.95	41.99	69.12
37.6	3.45	5.93	10.76	17.55	33.07	57.99

-300+212 μm besleme boyutu kalsitin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 2×10^{-4}) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.0	16 / 11.1	32 / 21.1
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	25.99	41.20	60.88	76.35	92.75	99.28
150.0	12.60	22.84	37.22	55.30	79.68	96.20
106.1	8.62	15.55	26.87	40.79	65.42	89.69
75.0	6.46	11.45	19.36	30.76	52.52	80.21
53.0	5.06	8.72	14.81	23.46	41.62	69.12
37.5	4.04	6.74	11.45	17.94	32.63	57.75

EK 2.D. Kalsit Mineralinin Sodyum-oleat (3.5×10^{-4} M) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 μm besleme boyutu kalsitin sodyum-oleat (3.5×10^{-4}) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.6	8 / 6.2	16 / 11.4	32 / 21.1
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	31.37	50.67	70.61	87.77	97.74	99.91
300.0	16.06	30.25	49.04	71.39	91.48	99.29
212.1	10.46	20.41	35.18	56.26	81.73	97.29
150.0	7.44	14.65	25.96	43.88	70.24	93.02
106.1	5.48	10.80	19.43	34.03	58.59	86.20
75.0	4.09	8.03	14.60	26.22	47.73	77.24
53.0	3.08	6.00	10.97	20.07	38.15	67.00
37.5	2.34	4.50	8.23	15.26	30.01	56.46

-425+300 μm besleme boyutu kalsitin sodyum-oleat (3.5×10^{-4}) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.2	16 / 10.9	32 / 19.9
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	28.69	46.01	69.04	83.05	95.41	99.63
212.5	14.61	26.76	47.49	64.41	85.69	97.86
150.3	9.69	18.05	34.01	49.24	73.32	93.59
106.3	7.09	13.10	25.19	37.75	60.76	86.48
75.1	5.41	9.82	18.99	29.02	49.29	77.14
53.1	4.21	7.46	14.41	22.29	39.34	66.62
37.6	3.33	5.73	10.96	17.07	30.79	55.93

-300+212 μm besleme boyutu kalsitin sodyum-oleat (3.5×10^{-4}) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.1	16 / 10.8	32 / 20.1
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	26.26	41.63	60.42	77.54	92.58	99.15
150.0	12.77	23.21	38.03	57.07	79.78	95.92
106.1	8.62	15.65	26.20	42.36	65.81	89.49
75.0	6.40	11.42	18.51	31.97	53.06	80.34
53.0	4.99	8.66	14.21	24.39	42.21	69.68
37.5	3.98	6.67	11.01	18.67	33.24	58.71

EK 2.E. Kalsit Mineralinin Aero 845 (55 mg/L) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 µm besleme boyutu kalsitin Aero 845 (55 mg/L) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.4	8 / 6.1	16 / 11.5	32 / 21.6
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	32.31	52.01	70.17	98.07	98.18	99.94
300.0	16.74	31.35	48.41	71.54	92.47	99.46
212.1	11.09	21.43	34.80	56.34	82.99	97.66
150.0	7.99	15.57	25.82	43.96	71.47	93.49
106.1	5.93	11.57	19.42	34.12	59.60	86.50
75.0	4.45	8.65	14.63	26.29	48.47	77.14
53.0	3.36	6.48	11.01	20.11	38.63	66.42
37.5	2.56	4.87	8.27	15.28	30.28	55.45

-425+300 µm besleme boyutu kalsitin Aero 845 (55 mg/L) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.4	16 / 11.6	32 / 21.7
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	28.89	46.31	69.39	84.26	96.34	99.79
212.5	14.79	27.00	47.71	65.83	87.53	98.49
150.3	9.96	18.44	34.35	50.62	75.57	94.87
106.3	7.37	13.52	25.62	39.02	63.00	88.24
75.1	5.65	10.20	19.41	30.12	51.27	79.03
53.1	4.41	7.78	14.77	23.19	40.98	68.30
37.6	3.48	5.99	11.26	17.78	32.27	57.24

-300+212 µm besleme boyutu kalsitin Aero 845 (55 mg/L) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.2	16 / 10.9	32 / 21.2
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	25.90	41.05	58.67	77.31	92.36	99.26
150.0	12.59	22.81	37.30	56.56	79.00	96.16
106.1	8.63	15.57	26.62	41.99	64.70	89.64
75.0	6.48	11.48	19.18	31.79	51.89	80.19
53.0	5.09	8.77	14.38	24.33	41.13	69.16
37.5	4.07	6.79	11.04	18.66	32.28	57.86

EK 2.F. Kalsit Mineralinin Oleik Asit (2×10^{-4} M) ile Yaş Öğütme Simülasyon
Tane Boyut Dağılımları

-600+425 μm besleme boyutu kalsitin oleik asit (2×10^{-4} M) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.4	8 / 6.1	16 / 11.7	32 / 21.9
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	31.88	51.40	69.62	87.93	98.16	99.94
300.0	16.55	31.00	48.01	71.48	92.50	99.46
212.1	10.91	21.12	34.43	56.30	83.11	97.66
150.0	7.84	15.29	25.49	43.91	71.65	93.54
106.1	5.82	11.36	19.15	34.07	59.82	86.63
75.0	4.37	8.51	14.44	26.28	48.71	77.37
53.0	3.31	6.39	10.89	20.13	38.89	66.75
37.5	2.53	4.82	8.20	15.33	30.55	55.85

-425+300 μm besleme boyutu kalsitin oleik asit (2×10^{-4} M) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.4	16 / 11.3	32 / 21.6
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	28.59	45.85	68.86	83.89	95.90	99.76
212.5	14.68	26.79	47.34	65.49	86.60	98.37
150.3	9.84	18.22	34.01	50.30	74.34	94.60
106.3	7.27	13.33	25.31	38.71	61.68	87.84
75.1	5.58	10.06	19.16	29.86	50.04	78.55
53.1	4.36	7.69	14.60	23.00	39.92	67.82
37.6	3.46	5.93	11.15	17.66	31.42	56.82

EK 3.A. Barit Mineralinin Kuru Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1700+1180 μm besleme boyutu baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	25.47	37.99	60.03	82.80	97.39

-1180+850 μm besleme boyutu baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	28.13	46.95	69.14	91.08	99.13

-850+600 μm besleme boyutu baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	32.04	46.16	70.80	93.02	99.60

-600+425 μm besleme boyutu baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	29.30	48.37	71.13	92.12	99.53	99.98
300	12.84	23.60	41.41	71.47	96.65	99.95
212	8.17	15.23	27.74	52.44	88.55	99.85
150	5.80	10.69	19.82	37.94	71.45	98.80
106	4.67	8.51	15.92	30.67	58.34	94.52
75	3.69	6.65	12.45	24.29	45.81	81.67
53	3.03	5.41	10.15	19.71	37.23	67.79
38	2.28	4.02	7.47	14.83	28.21	51.91

-425+300 μm besleme boyutu baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	28.10	44.64	66.53	88.87	98.85	99.99
212	14.07	24.34	41.41	68.36	93.92	99.88
150	8.92	15.88	27.17	48.35	80.26	99.06
106	6.78	12.10	21.03	37.92	65.27	95.62
75	5.12	9.21	16.10	28.24	50.72	82.88
53	4.00	7.22	12.68	22.78	40.54	69.61
38	2.85	5.16	9.24	16.64	30.41	52.79

-300+212 μm besleme boyutu baritin kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	26.54	40.56	60.20	83.01	96.99	99.95
150	13.06	21.40	35.54	57.82	85.17	99.08
106	9.28	15.09	25.51	43.20	70.12	95.67
75	6.57	10.38	18.18	31.05	52.79	82.87
53	5.05	8.06	13.88	23.84	41.33	69.36
38	3.51	5.39	9.67	16.81	30.08	52.73

EK 3.B. Barit Mineralinin Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1700+1180 μm besleme boyutu baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	24.84	37.89	59.19	80.73	95.74

-1180+850 μm besleme boyutu baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	27.19	44.79	65.96	89.68	98.49

-850+600 μm besleme boyutu baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
850	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	36.49	50.74	74.14	92.63	99.60	99.83
425	17.09	28.14	49.86	79.78	98.75	99.73
300	10.87	18.59	34.53	61.95	96.55	99.68
212	8.20	14.21	26.79	48.36	90.91	99.66
150	6.62	11.39	21.69	39.06	78.56	99.56
106	5.82	9.92	18.99	34.24	68.48	98.98
75	5.06	8.55	16.31	29.45	56.74	95.31
53	4.47	7.50	14.28	25.62	48.54	87.01
38	3.69	6.07	11.39	20.45	38.61	71.58

-600+425 μm besleme boyutu baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	35.34	53.72	74.82	94.57	99.68	99.85
300	16.48	29.42	49.78	83.57	99.06	99.81
212	11.07	20.34	35.27	68.07	96.97	99.78
150	8.15	15.35	26.56	50.78	88.45	99.74
106	6.84	12.91	22.37	42.73	78.47	99.46
75	5.72	10.80	18.60	35.63	64.72	96.71
53	4.85	9.22	15.88	30.36	53.87	89.81
38	3.74	7.21	12.35	23.46	41.24	73.66

-425+300 μm besleme boyutu baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	36.48	52.73	74.05	92.94	99.42	99.86
212	19.47	31.39	50.74	79.83	98.42	99.81
150	12.83	21.26	34.14	60.43	94.10	99.79
106	9.88	17.19	27.51	48.42	85.94	99.71
75	7.71	13.77	22.04	39.03	70.57	98.47
53	6.12	11.50	18.25	32.54	57.60	92.62
38	4.91	8.67	13.67	24.34	42.93	75.76

-300+212 μm besleme boyutu baritin yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	35.56	49.96	70.91	88.63	98.66	99.73
150	17.24	27.45	44.65	69.75	94.37	99.62
106	10.92	19.98	32.85	54.38	87.43	99.29
75	8.32	14.82	24.65	40.54	72.01	96.48
53	6.55	12.01	19.87	32.89	58.72	89.12
38	5.25	8.92	14.90	24.68	43.62	73.23

EK 3.C. Barit Mineralinin Sodyum Dodesil Sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1700+1180 μm besleme boyutu baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	23.09	35.85	55.50	77.41	93.68

-1180+850 μm besleme boyutu baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %				
	Öğütme Süresi (t), dakika				
	1	2	4	8	16
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	28.31	44.38	66.85	87.50	97.43

-850+600 μm besleme boyutu baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
850	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	36.86	49.97	75.19	92.38	99.24	99.67
425	18.50	27.60	50.87	80.24	98.07	99.62
300	12.02	18.26	35.22	63.08	95.97	99.57
212	9.04	14.00	27.35	49.01	91.09	99.54
150	7.06	11.22	22.13	39.25	79.96	99.44
106	6.06	9.78	19.30	34.38	68.83	99.08
75	5.09	8.43	16.59	29.34	56.58	96.09
53	4.35	7.37	14.45	25.51	48.13	88.65
38	3.40	5.89	11.55	20.21	37.98	73.10

-600+425 μm besleme boyutu baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	37.17	56.27	75.66	94.96	99.74	99.93
300	17.03	30.95	49.41	83.97	99.29	99.92
212	11.32	21.43	36.07	69.02	97.82	99.91
150	8.26	15.98	27.15	52.78	90.26	99.88
106	6.92	13.39	23.01	42.93	79.40	99.76
75	5.74	11.12	18.94	35.93	65.02	97.95
53	4.82	9.37	15.98	30.55	54.07	91.53
38	3.71	7.22	12.55	24.06	42.54	75.57

-425+300 μm besleme boyutu baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	36.53	53.93	74.43	93.58	99.52	99.94
212	18.90	31.05	51.11	81.23	98.81	99.91
150	12.38	20.19	34.73	62.55	95.11	99.90
106	9.84	16.35	28.02	50.10	87.44	99.82
75	7.77	13.03	22.49	39.97	72.18	98.83
53	6.48	10.89	18.51	33.13	58.76	92.91
38	4.82	8.15	13.73	25.12	44.05	76.86

-300+212 μm besleme boyutu baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	35.40	51.69	71.67	89.48	98.99	99.95
150	17.51	28.44	45.10	71.37	95.59	99.87
106	11.68	20.84	33.11	55.63	88.76	99.72
75	8.84	15.38	24.67	41.43	72.88	97.45
53	6.90	12.28	19.87	33.14	59.17	91.82
38	5.25	9.06	14.93	24.79	44.36	76.33

EK 4.A. Barit Mineralinin Kuru Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 µm besleme boyutu baritin kuru öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 1.6	4 / 3.0	8 / 5.7	16 / 11.0	32 / 20.3
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	30.73	44.01	64.84	86.00	97.57	99.89
300.0	14.80	25.02	43.20	68.63	90.79	99.09
212.1	9.25	17.03	30.84	53.66	80.50	96.50
150.0	6.61	12.47	22.99	41.91	68.73	91.22
106.1	4.95	9.38	17.45	32.73	57.11	83.20
75.0	3.79	7.12	13.32	25.47	46.50	73.26
53.0	2.98	5.41	10.16	19.71	37.23	62.50
37.5	2.32	4.10	7.72	15.15	29.40	51.91

-425+300 µm besleme boyutu baritin kuru öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.5	8 / 6.3	16 / 11.7	32 / 20.2
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	28.03	44.96	62.95	82.71	95.86	99.59
212.5	13.98	26.03	41.54	64.01	86.53	97.52
150.3	9.34	17.79	29.55	49.13	74.39	92.58
106.3	6.82	13.04	21.99	37.97	61.95	84.60
75.1	5.12	9.80	16.67	29.44	50.52	74.52
53.1	3.86	7.40	12.68	22.78	40.54	63.56
37.6	2.93	5.61	9.65	17.55	32.1	52.79

-300+212 µm besleme boyutu baritin kuru öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.6	8 / 6.3	16 / 11.4	32 / 19.7
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	22.37	37.45	55.59	75.24	91.84	98.63
150.0	11.29	21.22	35.38	54.93	78.47	93.99
106.1	7.57	14.43	24.84	40.88	64.41	85.74
75.0	5.53	10.55	18.38	31.07	51.88	75.13
53.0	4.15	7.92	13.88	23.84	41.33	63.75
37.5	3.13	5.97	10.52	18.30	32.60	52.73

EK 4.B. Barit Mineralinin Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 µm besleme boyutu baritin yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.5	8 / 6.7	16 / 12.6	32 / 23.2
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	34.32	53.97	72.92	91.39	98.94	99.98
300.0	17.91	33.31	52.19	78.14	95.41	99.77
212.1	12.33	23.70	39.19	65.06	89.13	99.00
150.0	9.38	18.17	30.68	53.90	80.91	97.07
106.1	7.38	14.35	24.53	44.65	71.83	93.53
75.0	5.86	11.43	19.74	36.91	62.67	88.27
53.0	4.66	9.12	15.88	30.36	53.87	81.49
37.5	3.70	7.25	12.73	24.82	45.70	73.66

-425+300 µm besleme boyutu baritin yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.8	16 / 13.2	32 / 23.7
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	30.62	48.84	72.19	88.30	98.29	99.93
212.5	15.68	29.21	51.50	72.94	93.40	99.48
150.3	10.78	20.62	38.63	59.29	85.65	98.02
106.3	8.20	15.76	30.23	48.39	76.41	94.96
75.1	6.43	12.41	24.14	39.68	66.84	90.06
53.1	5.07	9.84	19.39	32.54	57.60	83.51
37.6	4.02	7.82	15.58	26.59	49.01	75.76

-300+212 µm besleme boyutu baritin yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.5	16 / 12.9	32 / 21.7
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	25.74	42.78	66.02	82.40	96.62	99.66
150.0	13.34	26.11	45.33	64.42	89.04	98.14
106.1	9.22	18.27	33.49	50.66	79.04	94.62
75.0	7.01	13.85	26.04	40.59	68.59	88.95
53.0	5.50	10.75	20.71	32.89	58.72	81.59
37.5	4.34	8.45	16.57	26.72	49.75	73.23

EK 4.C. Barit Mineralinin Sodyum Dodesil Sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 μm besleme boyutu baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 3.4	8 / 6.5	16 / 12.0	32 / 22.4
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	35.04	54.98	73.10	91.28	98.84	99.97
300.0	18.11	32.81	52.07	77.85	95.12	99.78
212.1	12.40	23.97	38.96	64.68	88.68	99.03
150.0	9.45	18.40	30.50	53.58	80.45	97.24
106.1	7.46	14.58	24.46	44.50	71.51	93.97
75.0	5.95	11.67	19.77	36.94	62.59	89.12
53.0	4.75	9.35	15.98	30.55	54.07	82.86
37.5	3.78	7.47	12.88	25.13	46.17	75.57

-425+300 μm besleme boyutu baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.6	16 / 12.7	32 / 22.4
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	31.65	50.35	73.81	88.66	98.35	99.93
212.5	16.09	30.07	53.02	73.38	93.61	99.46
150.3	11.01	21.17	39.84	59.70	86.08	98.02
106.3	8.39	16.20	31.26	48.82	77.07	95.06
75.1	6.60	12.81	25.08	40.19	67.75	90.38
53.1	5.23	10.20	20.26	33.13	58.76	84.18
37.6	4.16	8.14	16.37	27.24	50.38	76.86

-300+212 μm besleme boyutu baritin sodyum dodesil sülfat (SDDS, 1×10^{-3} M) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika					
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.2	16 / 12.1	32 / 21.3
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	27.04	44.76	68.33	82.77	96.66	99.74
150.0	13.89	26.23	47.33	64.68	89.11	98.52
106.1	9.56	18.41	35.05	50.82	79.19	95.58
75.0	7.29	14.09	27.33	40.76	68.86	90.65
53.0	5.73	11.12	21.84	33.14	59.17	84.04
37.5	4.54	8.84	17.57	27.06	50.40	76.33

EK 5.A. Kömürün Kuru Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1700+1180 µm besleme boyutu kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	19.81	30.19	44.52	64.60	80.89	94.84

-1180+850 µm besleme boyutu kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	20.78	29.75	43.65	64.00	83.83	96.52

-850+600 µm besleme boyutu kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	20.05	25.02	39.75	61.43	83.06	97.25

-600+425 µm besleme boyutu kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	23.53	33.60	47.46	67.34	87.85	98.29	100.00
300	7.65	12.47	19.05	32.28	57.36	83.23	99.65
212	4.43	7.31	11.01	19.04	36.47	60.88	97.06
150	2.66	4.37	6.64	11.38	22.93	41.03	82.55
106	1.77	2.86	4.45	7.59	16.16	30.74	63.81
75	1.04	1.67	2.81	4.65	10.77	21.92	46.11
53	0.64	0.96	1.87	2.87	7.35	16.33	34.88
38	0.32	0.48	1.09	1.63	4.80	11.70	25.73

-425+300 μm besleme boyutu kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	20.59	29.17	42.15	61.23	82.15	96.63	100.00
212	6.72	10.82	18.12	30.24	50.67	79.91	99.32
150	3.68	5.90	9.86	16.75	28.67	53.37	91.70
106	2.37	3.79	6.30	10.82	20.68	37.16	74.81
75	1.39	2.23	3.65	6.52	13.08	25.83	53.17
53	0.82	1.37	2.36	4.45	8.85	18.87	39.37
38	0.41	0.67	1.30	2.52	5.48	13.35	28.51

-300+212 μm besleme boyutu kömürün kuru öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	20.02	26.84	38.25	55.87	79.31	95.18	100.00
150	5.86	9.25	14.74	25.44	43.05	73.61	98.52
106	3.50	5.70	8.85	15.9	27.57	51.89	89.67
75	1.95	3.31	4.92	9.46	16.56	33.61	67.54
53	1.14	1.99	2.95	6.21	11.51	24.02	49.22
38	0.57	1.25	1.74	4.01	7.12	16.23	34.78

EK 5.B. Kömürün Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1700+1180 μm besleme boyutu kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	17.38	29.20	42.29	57.04	67.62	76.00

-1180+850 μm besleme boyutu kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	15.62	22.89	34.76	54.13	67.83	81.86

-850+600 μm besleme boyutu kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	16.09	29.18	34.21	51.82	76.09	89.00

-600+425 μm besleme boyutu kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
425	27.27	35.71	51.73	68.41	89.48	98.72	99.76
300	8.68	12.01	21.56	33.55	65.53	93.61	99.45
212	5.29	7.12	13.18	20.00	43.49	81.80	98.51
150	3.22	4.95	8.63	13.31	28.92	59.69	94.51
106	2.16	3.61	6.32	9.72	22.44	43.97	84.47
75	1.38	2.37	4.32	6.45	16.03	31.68	64.71
53	0.90	1.46	2.84	4.49	11.45	23.70	49.34
38	0.51	0.95	1.90	2.78	7.48	17.16	35.54

-425+300 μm besleme boyutu kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	23.22	34.83	42.73	67.29	85.73	97.65	99.30
212	8.58	13.66	18.95	36.55	60.85	92.86	98.76
150	4.48	7.59	11.93	23.50	36.71	76.55	96.98
106	2.76	4.91	7.19	15.12	25.87	57.62	90.33
75	1.79	3.09	4.88	10.26	17.74	41.31	72.00
53	1.04	2.01	3.48	7.52	12.73	31.06	54.29
38	0.57	1.21	2.08	4.78	8.54	23.11	38.98

-300+212 μm besleme boyutu kömürün yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	24.98	33.40	44.55	65.79	83.27	93.49	99.60
150	9.35	13.02	18.67	32.98	54.05	80.83	98.40
106	5.07	7.80	11.38	20.82	36.41	63.11	94.23
75	3.11	5.09	7.46	13.75	25.36	48.39	81.95
53	1.91	3.05	5.26	9.42	18.51	35.12	65.74
38	1.21	1.89	3.14	6.30	13.35	26.05	48.23

EK 5.C. Kömürün Gazyağı (485 mg/L) ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünlerin Tane Boyut Dağılımları

-1700+1180 µm besleme boyutu kömürün gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	18.29	27.69	40.93	54.42	66.04	72.79

-1180+850 µm besleme boyutu kömürün gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	18.38	22.90	31.60	49.87	61.43	77.53

-850+600 µm besleme boyutu kömürün gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %					
	Öğütme Süresi (t), dakika					
	1	2	4	8	16	32
1700	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	18.63	27.97	34.79	50.49	70.83	87.75

-600+425 µm besleme boyutu kömürün gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %							
	Öğütme Süresi (t), dakika							
	1	2	4	8	16	32	64	
600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
425	20.68	28.84	47.92	64.26	86.01	93.65	98.58	
300	5.66	8.98	17.22	24.46	58.04	81.43	96.77	
212	3.47	5.35	9.82	14.12	36.52	65.09	91.33	
150	2.20	3.36	6.08	9.51	23.62	44.28	75.18	
06	1.52	2.32	4.33	6.73	17.56	33.74	57.53	
75	0.84	1.28	2.87	4.91	12.12	25.22	39.17	
53	0.50	0.85	1.91	3.20	8.86	18.80	29.40	
38	0.25	0.50	1.20	2.15	5.83	13.70	22.07	

-425+300 μm besleme boyutu kömürün gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300	21.01	28.90	41.60	66.30	82.56	96.20	98.91
212	7.03	10.43	16.23	36.16	49.20	86.27	98.13
150	3.75	5.72	9.41	20.13	28.69	65.17	92.75
106	2.30	3.71	6.46	14.42	20.82	47.09	80.11
75	1.23	2.16	4.28	10.03	14.69	32.82	58.66
53	0.77	1.46	2.88	6.15	10.50	24.67	44.62
38	0.39	0.84	1.71	4.03	7.11	18.39	33.93

-300+212 μm besleme boyutu kömürün gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütülmesiyle elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika						
	1	2	4	8	16	32	64
300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212	24.08	35.00	45.16	67.23	84.97	92.25	96.85
150	8.96	13.20	19.23	34.47	57.54	75.61	92.79
106	5.39	8.34	12.61	22.65	38.16	55.95	83.02
75	3.17	5.49	8.33	15.45	25.87	36.54	62.51
53	1.98	3.85	5.76	11.19	18.62	26.51	45.04
38	1.11	2.62	3.89	7.71	13.31	19.25	32.37

EK 6.A. Kömürün Kuru Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 µm besleme boyutu kömürün kuru öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 6.5	16 / 12.6	32 / 21.9	64 / 37.3
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	21.28	30.15	44.99	57.39	80.39	93.53	98.96
300.0	6.55	11.59	21.56	31.70	57.34	79.97	94.90
212.1	3.65	6.42	12.32	18.96	39.29	63.49	86.57
150.0	2.22	3.85	7.47	11.76	26.45	47.74	74.57
106.1	1.43	2.41	4.64	7.38	17.54	34.46	60.74
75.0	0.98	1.56	2.93	4.66	11.47	24.07	47.05
53.0	0.59	0.94	1.78	2.87	7.36	16.33	34.88
37.5	0.31	0.53	1.04	1.72	4.62	10.79	24.88

-425+300 µm besleme boyutu kömürün kuru öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 7.0	16 / 12.1	32 / 21.2	64 / 37.1
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	19.25	27.28	41.03	56.79	74.68	90.26	98.16
212.5	5.76	10.14	18.85	31.23	49.77	73.15	91.96
150.3	3.16	5.55	10.61	18.59	32.62	55.20	80.99
106.3	1.98	3.37	6.44	11.54	21.35	39.83	67.09
75.1	1.22	2.06	3.94	7.19	13.84	27.80	52.61
53.1	0.75	1.25	2.40	4.45	8.85	18.87	39.38
37.6	0.42	0.72	1.42	2.70	5.56	12.48	28.31

-300+212 µm besleme boyutu kömürün kuru öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 7.1	16 / 12.0	32 / 21.8	64 / 40.3
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	18.94	25.98	38.27	53.53	70.25	87.71	97.70
150.0	5.13	8.96	16.58	28.10	44.34	68.38	90.44
106.1	2.92	4.97	9.29	16.49	28.19	49.94	78.35
75.0	1.73	2.93	5.54	10.08	18.06	35.13	63.78
53.0	1.04	1.76	3.34	6.21	11.52	24.02	49.22
37.5	0.55	0.98	1.95	3.75	7.22	16.00	36.30

EK 6.B. Kömürün Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 μm besleme boyutu kömürün yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 8	16 / 13.0	32 / 21.8	64 / 38.5
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	21.93	31.3	46.80	60.90	83.11	94.54	99.35
300.0	7.44	13.26	24.49	36.92	63.29	83.59	96.87
212.1	4.33	7.76	14.95	23.82	46.66	69.94	91.56
150.0	2.70	4.85	9.54	15.72	33.72	56.03	83.29
106.1	1.77	3.12	6.19	10.42	23.94	43.31	72.74
75.0	1.21	2.06	4.05	6.90	16.72	32.48	61.04
53.0	0.75	1.29	2.58	4.49	11.46	23.70	49.34
37.5	0.42	0.77	1.60	2.86	7.70	16.87	38.53

-425+300 μm besleme boyutu kömürün yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 8	16 / 11.9	32 / 23.7	64 / 38.4
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	20.09	28.79	43.45	64.33	77.13	94.13	98.93
212.5	6.68	11.91	22.05	40.38	54.98	82.56	95.22
150.3	3.83	6.89	13.28	26.43	38.70	68.46	88.15
106.3	2.45	4.34	8.46	17.63	27.06	54.39	78.17
75.1	1.55	2.74	5.42	11.73	18.70	41.73	66.44
53.1	0.97	1.72	3.46	7.74	12.73	31.06	54.28
37.6	0.57	1.04	2.16	5.02	8.52	22.51	42.77

-300+212 μm besleme boyutu kömürün yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, μm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 8	16 / 13.2	32 / 22.8	64 / 42.7
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	19.9	27.71	41.13	60.95	77.20	91.46	98.89
150.0	6.07	10.77	19.92	36.72	54.84	76.97	95.05
106.1	3.58	6.29	11.93	23.62	38.53	61.38	87.78
75.0	2.18	3.86	7.48	15.52	26.87	47.14	77.60
53.0	1.35	2.40	4.74	10.20	18.51	35.12	65.74
37.5	0.76	1.43	2.93	6.61	12.53	25.46	53.52

EK 6.C. Kömürün Gazyağı (485 mg/L) ile Yaş Öğütme Simülasyon Tane Boyut Dağılımları

-600+425 µm besleme boyutu kömürün gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 8	16 / 13.0	32 / 21.4	64 / 29.0
600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
424.3	20.79	29.26	43.60	56.02	79.61	92.16	96.68
300.0	6.64	11.72	21.68	32.00	58.14	78.61	88.78
212.1	3.77	6.65	12.76	19.80	41.33	63.41	77.37
150.0	2.28	4.01	7.85	12.55	28.87	49.05	64.33
106.1	1.47	2.51	4.91	8.01	19.81	36.65	51.32
75.0	1.00	1.62	3.11	5.12	13.38	26.60	39.48
53.0	0.60	0.98	1.91	3.20	8.87	18.80	29.40
37.5	0.32	0.55	1.13	1.96	5.76	12.96	21.26

-425+300 µm besleme boyutu kömürün gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 8	16 / 12.0	32 / 22.4	64 / 35.4
425.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
300.5	19.20	27.20	40.89	61.04	74.40	91.27	97.75
212.5	6.06	10.70	19.84	36.77	51.31	76.71	91.58
150.3	3.38	5.99	11.53	23.26	35.06	60.98	81.74
106.3	2.11	3.66	7.09	14.99	23.79	46.55	69.62
75.1	1.30	2.23	4.37	9.62	15.93	34.38	56.82
53.1	0.79	1.36	2.69	6.12	10.50	24.67	44.62
37.6	0.44	0.78	1.60	3.82	6.80	17.24	33.85

-300+212 µm besleme boyutu kömürün gazyağı (485 mg/L) ile yaş öğütme simülasyon tane boyut dağılımları

Elek Açıklığı, µm	Toplam Elek Altı Değerleri, %						
	Öğütme Süresi (t), dakika / Hesaplanan Süre (θ), dakika						
	1 / 1	2 / 2	4 / 4	8 / 8	16 / 13.1	32 / 17.3	64 / 27.1
300.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
212.1	20.42	28.64	42.63	62.92	78.62	86.54	95.37
150.0	6.25	11.14	20.74	38.34	56.49	68.20	85.31
106.1	3.57	6.32	12.14	24.44	39.67	51.28	72.09
75.0	2.11	3.75	7.40	15.76	27.42	37.37	58.12
53.0	1.27	2.26	4.53	10.12	18.62	26.51	45.04
37.5	0.68	1.29	2.71	6.39	12.39	18.34	33.71

EK 7.B. Kalsit Mineralinin Kuru, Yaş ve Kimyasal Maddeler ile Yaş Ögütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Flotasyon Denej Sonuçları

Öğütme Şekli	Değirmene Beslenen Boyut, µm	Kullanılan Çözeltiler %w/w (Ağırlıkça) → Yüzey Gerilimi (γ _{SH}), mN/m →	Flotasyon Verimi, %									
			Metil Alkol (CH ₃ OH)					Saf su	Sodyum Klorür (NaCl)			
			75	62	50	38	25		10	5	15	26
Kuru Öğütme	-600+425		28.35	31.61	34.45	38.12	45.47	57.03	72.78	75.04	78.62	81.95
	-425+300								0	0	1.33	4.00
	-300+212								0	0	1.33	4.00
Yaş Öğütme	-600+425								0	0	2.67	4.00
	-425+300								0	0	2.67	4.00
	-300+212								0	0	2.67	4.67
Sodyum-oleat ile Yaş Öğütme (3.5x10 ⁻⁴ M)	-600+425		0	4.00	25.33	47.33	49.33	54.00	24.67			
	-425+300		0	3.33	21.33	46.67	50.67	52.00	23.33			
	-300+212		0	2.00	18.67	43.33	48.00	50.67	21.33			
SDDS ile Yaş Öğütme (2x10 ⁻⁴ M)	-600+425			0	1.33	10.67	41.33	47.33	45.33			
	-425+300			0	1.33	10.67	41.33	40.00	37.33			
	-300+212			0	1.33	12.67	40.67	44.00	42.00			

EK 8.A. Barit Mineralinin Kuru, Yaş ve Kimyasal Madde ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Temas Açısı Ölçüm Sonuçları

Öğütme Şekli	Değirmene Beslenen Boyut, μm	Kullanılan Çözeltiler %w/w (Ağırlıkça) \rightarrow Yüzey Gerilimi (γ_{SH}), mN/m \rightarrow	Ölçülen Temas Açısı (θ), derece									
			Metil Alkol (CH_3OH)					Saf su	Sodyum Klorür (NaCl)			
			75	62	50	38	25		10	5	15	26
Kuru Öğütme	-600+425		28.35	31.61	34.45	38.12	45.47	57.03	72.78	75.04	78.62	81.95
	-425+300								0	0	0	5-6
	-300+212								0	0	0	5-6
Yaş Öğütme	-600+425								0	0	0	5-6
	-425+300								0	0	0	5-6
	-300+212								0	0	0	5-6
SDDS ile Yaş Öğütme (1×10^{-3} M)	-600+425		0	10	18	24	35	49	58			
	-425+300		0	7	11	13	20	29	35			
	-300+212		0	5	10	14	18	21	33			

EK 8.B. Barit Mineralinin Kuru, Yaş ve Kimyasal Madde ile Yaş Ögütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Flotasyon Deney Sonuçları

Öğütme Şekli	Değirmene Beslenen	Kullanılan Çözeltiler	Flotasyon Verimi, %									
			Metil Alkol (CH ₃ OH)					Saf su				
	Boyut, µm	%w/w (Ağırlıkça) →	75	62	50	38	25	10		5	15	26
Kuru Öğütme		Yüzey Gerilimi (γ _{su}), mN/m →	28.35	31.61	34.45	38.12	45.47	57.03	72.78	75.04	78.62	81.95
	-600+425								0	0	1.33	3.33
	-425+300								0	0	1.33	3.33
Yaş Öğütme									0	0	1.33	2.67
	-600+425								0	0	1.33	2.00
	-425+300								0	0	1.33	2.00
SDDS ile Yaş Öğütme (1x10 ⁻³ M)									0	0	1.33	2.00
	-600+425			2.00	58.67	90.00	78.67	60.67				
	-425+300			3.33	70.33	88.00	82.00	56.67				
				3.33	76.67	83.67	86.33	60.67				

EK 9.A. Kömürün Kuru, Yaş ve Kimyasal Madde ile Yaş  g t lmesiyle Elde Edilen  r nler üzerinde Yapılan Temas Açıısı  l t m Sonuçları

�g�tme Şekli	Değirmene	Kullanılan �zeltiller	�l�t�len Temas Açıısı (�), derece					
			Metil Alkol (CH ₃ OH)	Saf su	Sodyum Klorür (NaCl)			
			%w/w (Ağırlıkça) →		5	15	26	
Beslenen	Boyut, �m	Yüzey Gerilimi (γ _{su}), mN/m →	25	10	75.04	78.62	81.95	
			45.47	57.03	72.78			
Kuru �g�tme	-600+425		0	5-7	11	17	23	
	-425+300		0	5-7	11	13	22	
	-300+212		0	5-7	9	13	18	
Yaş �g�tme	-600+425		0	5-7	11	17	21	
	-425+300		0	5-7	11	16	20	
	-300+212		0	5-7	9	14	19	
Gazyağı ile	-600+425		0	5-7	11	18	24	
	-425+300		0	5-7	11	16	21	
	-300+212		0	5-7	11	15	20	

EK 9.B. Kömürün Kuru, Yaş ve Kimyasal Madde ile Yaş Öğütülmesiyle Elde Edilen Ürünler Üzerinde Yapılan Flotasyon Deney Sonuçları

Öğütme Şekli	Değirmene Beslenen Boyut, μm	Kullanılan Çözeltiler %w/w (Ağırlıkça) \rightarrow Yüzey Gerilimi (γ_{SH}), mN/m \rightarrow	Flotasyon Verimi, %					
			Metil Alkol (CH_3OH)	Saf su	Sodyum Klorür (NaCl)			
Kuru Öğütme	-600+425		25	10		5	15	26
	-425+300		45.47	57.03	72.78	75.04	78.62	81.95
	-300+212			0	1.03	5.15	9.28	15.46
Yaş Öğütme	-600+425			0	2.06	4.12	8.25	14.43
	-425+300			0	2.06	4.12	8.25	15.98
	-300+212			0	2.06	4.12	9.28	15.01
Gazyağı ile Yaş Öğütme (485 mg/L)	-600+425		1.03	2.06	2.06	20.62	54.64	62.89
	-425+300		1.03	2.06	2.06	21.65	52.58	60.83
	-300+212		1.03	2.06	2.06	21.65	47.42	61.86