

**FARKLI ÖĞÜTME MEKANİZMALARININ, FİZİKSEL VE  
MİNERALOJİK PARAMETRELERİN ÇİMENTO SERVİS  
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT  
GRINDING MECHANISMS, PHYSICAL AND  
MINERALOGICAL PARAMETERS ON CEMENT SERVICE  
PROPERTIES**

**İLKAY BENGÜ ÇELİK**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

MADEN Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

DOKTORA TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2006

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Hüseyin ÖZDAĞ

Üye(Danışman)

Prof. Dr. Muammer ÖNER

Üye

Prof. Dr. Zafir EKMEKÇİ

Üye

Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN

Üye

Prof. Dr. İsmail GİRGİN

## **ONAY**

Bu tez, ..... /..... / ..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

**Prof. Dr. Ahmet R. ÖZDURAL**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

# FARKLI ÖĞÜTME MEKANİZMALARININ, FİZİKSEL VE MİNERALojİK PARAMETRELERİN ÇİMENTO SERVİS ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İlkay Bengü ÇELİK

## ÖZ

Bu çalışmada, farklı öğütme mekanizmalarına sahip yüksek basınçlı merdaneli değirmen (YBMD) ve bilyalı değirmenden alınan ürünler ile bilyalı değirmen açık ve kapalı öğütme devre ürünlerinin fiziksel, kimyasal, mineralojik ve morfolojik parametreleri karakterize edilmiş; bunların çimento servis özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Deneylerde, hem YBMD, hem de bilyalı değirmen ürününün dar tane boyu fraksiyonları ve farklı inceliklerdeki dağılım örnekleri hazırlanmıştır. Tüm örneklerin tane boyu dağılımları, yüzey alanları ve kimyasal bileşimleri belirlenmiş, dar tane boyu fraksiyonlarının, klinker mineralleri serbestleşme durumlarını da içeren mineralojik ve morfolojik analizleri yapılmıştır. Klinkere alçı taşı eklenerek oluşturulan çimento örneklerinin priz süresi, hacimsel sabitlik, standart kıvam ve basınç dayanımı gibi servis özellikleri belirlenmiştir. PÇ 42.5 R çimentosu ile incelik, tane boyu dağılımı, dağılım eğrisinin eğimi gibi fiziksel parametrelerin servis özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Açık ve kapalı öğütme devre ürünlerinin farklı incelik ve tane boyu dağılımındaki fiziksel özellikleri belirlenmiş; öğütme devresi farklılığının servis özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Dar tane boyu fraksiyonlarının kimyasal bileşimlerinde bir değişim olmamasına rağmen mineralojik bileşimin inceliğe bağlı olarak farklılık gösterdiği, özellikle YBMD fraksiyonlarındaki alit mineralinin bilyalı değirmen fraksiyonlarına göre daha fazla serbestleştiği belirlenmiştir. Morfolojik açıdan da farklılık gösteren YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerinin basınç dayanımı testi sonucunda, bilyalı değirmen örneklerinin dayanım değerlerinin az da olsa daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı kimyasal bileşim ve tane boyu dağılımına sahip bilyalı değirmen ve YBMD dağılım örneklerinin dayanım değerlerinde de farklılıklar görülmüş, bilyalı değirmen ürünleri için daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.

Çimento servis özellikleri üzerinde fiziksel parametrelerin oldukça etkili olduğu ve özellikle yaklaşık 5-30 µm fraksiyonunun dağılım içindeki miktarının artmasıyla dayanım değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Tane boyu dağılım eğrisinin dik olduğu durumda, özgül yüzey alanı değeri düşmekte, buna karşılık basınç dayanımı artmaktadır. Yaklaşık 30 µm'dan daha iri taneler dayanımı azaltmış ve en iyi çimento dayanım değeri iri ve ince tanelerin uzaklaştırıldığı -30+5 µm örneğinde elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Öğütme, çimento, görüntü analizi, serbestleşme, çimento servis özellikleri

**Danışman:** Prof. Dr. Muammer ÖNER, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Anabilim Dalı

# INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT GRINDING MECHANISMS, PHYSICAL AND MINERALOGICAL PARAMETERS ON CEMENT SERVICE PROPERTIES

İlkay Bengü ÇELİK

## ABSTRACT

In this study, physical, chemical, mineralogical and morphological parameters of products of different grinding mechanisms such as high pressure grinding rolls (HPGR) and ball mill grinding and the products of open and closed ball mill grinding circuits were characterized, and their effects on cement service properties were examined.

In the experiments, narrow size fractions and samples of different size distribution of both HPGR and ball mill products were prepared. Particle size distributions, surface areas and chemical compositions of all samples were determined and also the mineralogy involving the liberation state of clinker minerals and morphological analyses in narrow size fractions were performed. Service properties such as setting time, soundness, normal consistency and compressive strength of the cement samples which were constituted by adding gypsum to clinker were determined. The effects of physical parameters such as fineness, particle size distribution and the uniformity of the distribution curve on service properties were investigated by using PC 42.5 R cement. Physical properties of open and closed grinding circuit products were determined, and the effect of difference in grinding circuit design on service properties was examined.

Despite having no variation in chemical compositions, mineralogical composition of the narrow size fractions indicated variations depending on fineness; alite for instance was more liberated in HPGR products than that of ball mill fractions. As a result of compressive strength test of HPGR and ball mill products also showing different morphology, it was seen that the strength values of ball mill products were slightly higher than HPGR samples. The differences were also seen in strength values of ball mill and HPGR distribution samples having same chemical composition and particle size distribution; higher strength values for ball mill products were obtained.

It was seen that the physical parameters were highly effective upon cement service properties and the strength was improved with increasing the amount of 5-30  $\mu\text{m}$  fraction in distribution. The compressive strength was improved when the distribution curve got steeper despite the decrease in specific surface area. The particles coarser than approximately 30  $\mu\text{m}$  reduced the strength and the highest strength value was obtained for -30+5  $\mu\text{m}$  sample in which fine and coarse particles were removed.

**Keywords:** Grinding, cement, image analysis, liberation, cement service properties

**Advisor:** Prof. Dr. Muammer ÖNER, Hacettepe University, Mining Engineering Department, Mineral Processing Division

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, yapıcı ve yönlendirici katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Muammer ÖNER'e teşekkür ederim.

Deneysel sonuçların değerlendirilmesindeki öneri ve katkıları için Prof. Dr. Zafir EKMEKÇİ ve Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN'e, mineraloji çalışmalarında ve görüntü analiz tekniği konusunda değerli bilgilerini esirgemeyen Sayın Dr. David SUTHERLAND'e, deneysel çalışma ve tez yazımındaki fikirleri için Sayın Dr. N. Metin CAN'a, elektron mikroskopi analizindeki katkılarından dolayı Sayın Evren ÇUBUKÇU'ya, deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesindeki yardımlarından ötürü Sayın M. Burak TOP'a, Sayın Mustafa AYDEMİR'e ve Sayın Mustafa YILMAZ'a, manevi desteği için Sayın Esra BAĞCI'ya, örneklerin temini ve servis özelliklerin belirlenmesi sırasında laboratuvar imkanlarından yararlandığım OYAK Bolu Çimento, Ankara Set Çimento ve Baştaş Çimento Fabrikaları'na ve çalışanlarına, deney ekipmanının sağlanması için MAG 104 M 381 No'lu proje çerçevesinde destek sağlayan TÜBİTAK'a ve tezin basımı için 06 T01 604 002 No'lu proje çerçevesinde maddi destek sağlayan Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca, beni her konuda destekleyen, çalışmam sırasında sabır ve özveri gösteren çok değerli aileme en içten dileklerimle teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	3
2.1. Çimento Üretimi .....	4
2.2. Çimento Öğütme ve Sınıflandırma .....	5
2.2.1. Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenler (YBMD).....	7
2.2.2. Bilyalı Değirmenler .....	10
2.2.3. Havalı Sınıflandırma .....	11
2.3. YBMD ve Bilyalı Değirmenlerin Öğütme Mekanizmaları .....	16
2.4. YBMD ve Bilyalı Değirmen Ürünlerinde Görülen Farklılıklar .....	17
2.5. Çimentonun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri .....	20
2.5.1. Çimento Kimyasal Bileşimi.....	21
2.5.2. Klinker Mineral Fazlarının Oluşumu .....	22
2.5.3. Klinker Mineral Fazları Analiz Yöntemleri.....	24
2.5.3.1. Optik Mikroskopu .....	25
2.5.3.2. X-Işınları Kırınımı Analizi (XRD) .....	25
2.5.3.3. Elektron Mikroskobu .....	26
2.5.3.4. Görüntü Analizi .....	27
2.5.4. Çimento Mineralleri ve Mikro Yapı Özellikleri.....	30
2.5.5. Mikro Yapı Özelliklerini Etkileyen İşlem Parametreleri.....	33
2.6. Çimentonun Hidratasyonu.....	35
2.7. Çimentonun Servis Özellikleri.....	37
2.7.1. Basınç Dayanımı.....	37
2.7.2. Priz Süresi.....	38
2.7.3. Hacim Genleşmesi.....	39
2.7.4. Standart Kıvam (Su İhtiyacı).....	39
2.7.5. İncelik.....	40
2.7.6. Hidratasyon Isısı.....	40

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.7.7. Kızdırma Kaybı .....	41
2.8. Çimento Servis Özelliklerini Etkileyen Parametreler.....	41
2.8.1. Kimyasal Bileşim .....	42
2.8.2. Mineralojik Yapı.....	42
2.8.3. Fiziksel Özellikler.....	43
3. MALZEME .....	48
3.1. Örneklerin Hazırlanması .....	48
4. DENEYSEL YÖNTEM .....	51
5. DENEYSEL SONUÇLAR .....	62
5.1. Öğütme Mekanizması Farklılığının Dar Tane Boyu Fraksiyonlarında İncelenmesi .....	62
5.1.1. Kimyasal Özellikler.....	64
5.1.2. Yüzey Alanı Ölçümleri.....	66
5.1.3. Morfolojik Analiz.....	67
5.1.4. Mineralojik Analiz .....	69
5.1.5. Servis Özelliklerinin Belirlenmesi .....	84
5.2. Öğütme Mekanizması Farklılığının Dağılım Örneklerinde İncelenmesi .....	87
5.2.1. Kimyasal Özellikler.....	90
5.2.2. Yüzey Alanı Ölçümleri.....	90
5.2.3. Servis Özelliklerinin Belirlenmesi .....	92
5.3. Fiziksel Parametrelerin İncelenmesi.....	94
5.3.1. Kimyasal Özellikler.....	97
5.3.2. Yüzey Alanı Ölçümleri.....	100
5.3.3. Servis Özelliklerinin Belirlenmesi .....	102
5.4. Fiziksel Parametrelerin Farklı Öğütme Devre Tasarımları İçin İncelenmesi .....	105
6. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	114
6.1. Öğütme Mekanizması Farklılığının Dar Tane Boyu Örneklerinde İncelenmesi .....	114
6.1.1. Kimyasal Bileşim, Yüzey Alanı ve Morfolojik Özellikler .....	114
6.1.2. Mineralojik Özellikler .....	115
6.1.3. Servis Özellikleri .....	118
6.2. Öğütme Mekanizması Farklılığının Dağılım Örneklerinde İncelenmesi ....	119
6.2.1. Kimyasal Bileşim ve Yüzey Alanı Özellikleri.....	120
6.2.2. Servis Özellikleri.....	120
6.3. Fiziksel Parametrelerin İncelenmesi.....	122
6.4. Fiziksel Parametrelerin Farklı Öğütme Devre Tasarımları İçin İncelenmesi .....	127

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
7. SONUÇLAR.....	131
8. ÖNERİLER.....	133
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	134
EK-1.....	142
EK-2.....	147
ÖZGEÇMİŞ.....	162

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Çimento üretimine ait tipik bir akım şeması (DPT, 2001).....	6
Şekil 2.2. Yüksek basınçlı merdaneli değirmen .....	7
Şekil 2.3. Separatörle kapalı devre çalışan iki kamaralı tüp değirmen .....	10
Şekil 2.4. V-separatör çalışma prensibi .....	12
Şekil 2.5. Üçüncü nesil yüksek verimli separatör.....	14
Şekil 2.6. LV sınıflandırıcısında ayırma prensibi.....	15
Şekil 2.7. SEPOL HR® sınıflandırıcısı.....	15
Şekil 2.8. Kuvarsit parlak kesit örnekleri (a) darbe ile kırma (b) yüksek basınç altında kırma (Battersby et.al, 1992).....	19
Şekil 2.9. Farinden klinkere geçişte mineral faz değişimleri (Yeğınobalı, 2005). ...	23
Şekil 2.10. Görüntü analizinde gri eşiklendirme.....	28
Şekil 2.11. Görüntü analizinde renkli eşiklendirme .....	29
Şekil 2.12. Saf klinker minerallerinin zamana bağlı basınç dayanımları (Taylor, 1964).....	37
Şekil 2.13. Tane boyu dağılım eğimi (n) ile hidratasyon derecesi ve dayanım ilişkisi.....	45
Şekil 2.14. Dağılım eğimi, yüzey alanı ve dayanım ilişkisi .....	46
Şekil 2.15. (a) ve (b) Pozisyon parametresi, eğim, yüzey alanı ve dayanım ilişkisi.....	47
Şekil 4.1. Clemex görüntü analiz cihazı.....	52
Şekil 4.2. Dağlanmayan (a) ve dağlanan çimento örnekleri (b) .....	53
Şekil 4.3. Laboratuvar tipi 3. nesil yüksek verimli separatör .....	58
Şekil 4.4. Vicat aleti (a) priz başlama süresi için yandan görünüm, (b) priz sona erme süresi için tersine çevrilmiş kalıpla önden görünüm (1: kalıp, 2: düzeltici ağırlıklar için platform, 3: cam plaka, ölçüler mm'dir).....	60
Şekil 4.5. Le Chatelier cihazı (ölçüler mm'dir) .....	61
Şekil 5.1. YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerinin -90 µm dağılımları .....	63
Şekil 5.2. YBMD ürünü dar tane boyu ve -38 µm dağılımları.....	63



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

### Sayfa

Şekil 5.3. Bilyalı değirmen ürünü dar tane boyu ve -38 µm dağılımları.....	64
Şekil 5.4. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının Blaine özgül yüzey alanı ölçümleri.....	66
Şekil 5.5. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının BET yüzey alanı ölçümleri.....	67
Şekil 5.6. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -63+53 µm ürünleri .....	68
Şekil 5.7. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -45+38 µm ürünleri .....	68
Şekil 5.8. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -32+20 µm ürünleri .....	68
Şekil 5.9. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -63+53 µm ürünleri (20x).....	70
Şekil 5.10. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -45+38 µm ürünleri (50x).....	71
Şekil 5.11. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -32+20 µm ürünleri (50x).....	72
Şekil 5.12. YBMD (a) ve bilyalı değirmen (b) -63+53 µm fraksiyonlarındaki serbestleşme sınıfları.....	76
Şekil 5.13. YBMD (a) ve bilyalı değirmen (b) -45+38 µm fraksiyonlarındaki serbestleşme sınıfları.....	77
Şekil 5.14. YBMD (a) ve bilyalı değirmen (b) -32+20 µm fraksiyonlarındaki serbestleşme sınıfları.....	78
Şekil 5.15. Alit mineralinin YBMD fraksiyonlarındaki dağılımı.....	79
Şekil 5.16. Alit mineralinin bilyalı değirmen fraksiyonlarındaki dağılımı.....	79
Şekil 5.17. Belit mineralinin YBMD fraksiyonlarındaki dağılımı.....	80
Şekil 5.18. Belit mineralinin bilyalı değirmen fraksiyonlarındaki dağılımı.....	80
Şekil 5.19. Ara faz mineralinin YBMD fraksiyonlarındaki dağılımı.....	81
Şekil 5.20. Ara faz mineralinin bilyalı değirmen fraksiyonlarındaki dağılımı.....	81
Şekil 5.21. Alit mineralinin öğütme mekanizmasına bağlı olarak tane boyu-serbestleşme derecesi ilişkisi.....	83
Şekil 5.22. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının su ihtiyacı.....	84
Şekil 5.23. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının 2 günlük basınç dayanımları.....	86
Şekil 5.24. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının 7 günlük basınç dayanımları.....	86
Şekil 5.25. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının 28 günlük basınç dayanımları.....	87
Şekil 5.26. YBMD ürünlerinin tane boyu dağılımları .....	88
Şekil 5.27. Bilyalı değirmen ürünlerinin tane boyu dağılımları .....	88
Şekil 5.28. YBMD ve bilyalı değirmen dağılım örneklerinin tane boyu dağılımları .....	89
Şekil 5.29. YBMD ve bilyalı değirmen dağılım fraksiyonlarının Blaine özgül yüzey alanı değerleri.....	91
Şekil 5.30. YBMD ve bilyalı değirmen dağılım fraksiyonlarının BET yüzey alanı değerleri.....	91

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Sayfa

Şekil 5.31. YBMD ürün dağılımlarının 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanımı .....	93
Şekil 5.32. Bilyalı değirmen ürün dağılımlarının 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanımı.....	94
Şekil 5.33. PÇ 42.5 R ve PÇ 42.5 R'den oluşturulan dağılımlar .....	95
Şekil 5.34. PÇ 42.5 R örneğinden hazırlanan -30+2 µm ve -20+5 µm dağılımları .....	96
Şekil 5.35. Farklı yüzdelerde -30+2 µm katılan PÇ 42.5 R dağılımları .....	96
Şekil 5.36. Farklı yüzdelerde -20+5 µm katılan PÇ 42.5 R dağılımları .....	97
Şekil 5.37. PÇ 42.5 R dağılım örnekleri ile -30+2 µm ve -20+5 µm örneklerinin BET yüzey alanı değerleri .....	101
Şekil 5.38. -30+2 µm ve -20+5 µm katkılı PÇ 42.5 R örneklerinin Blaine özgül yüzey alanı karşılaştırması.....	102
Şekil 5.39. PÇ42.5 R ile -10 µm, -20 µm, -30 µm ve -45 µm örneklerinin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	103
Şekil 5.40. PÇ 42.5 R, -30+2 µm ve -30+2 µm katkılı örneklerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	104
Şekil 5.41. PÇ 42.5 R, -20+5 µm ve -20+5 µm katkılı örneklerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları .....	105
Şekil 5.42. Açık ve kapalı devre ürünlerinin tane boyu dağılımı .....	106
Şekil 5.43. Açık ve kapalı devre ürünlerinin basınç dayanım değerleri.....	108
Şekil 5.44. Açık ve kapalı devre ürünlerinin -30 µm dağılımları .....	109
Şekil 5.45. Açık ve kapalı devre ürünlerinin +5 µm dağılımları .....	109
Şekil 5.46. Açık ve kapalı devre ürünlerinin -30+5 µm dağılımları.....	110
Şekil 5.47. Açık ve kapalı devre -30 µm ürünlerinin basınç dayanım değerleri ...	112
Şekil 5.48. Açık ve kapalı devre +5 µm ürünlerinin basınç dayanım değerleri.....	113
Şekil 5.49. Açık ve kapalı devre -30+5 µm ürünlerinin basınç dayanım değerleri.....	113
Şekil 6.1. -63+53 µm (a), -45+38 µm (b) ve -32+20 µm (c) YBMD ve bilyalı değirmen örneklerindeki serbestleşme sınıfları.....	117
Şekil 6.2. YBMD ve bilyalı değirmen dağılım örneklerinin karşılaştırmalı basınç dayanımı.....	121
Şekil 6.3. Dağılım eğrisinin eğimi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	125
Şekil 6.4. PÇ 42.5 R ile -30+2 µm, -20+5 µm ve -30 mikron örneklerinin 2, 7, 28 günlük basınç dayanımı karşılaştırması .....	126

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Portland Çimentosu klinkerinin kimyasal bileşenleri (Duda, 1985).....	21
Çizelge 2.2. Gerekli kimyasal özellikler için karakteristik değerler.....	22
Çizelge 2.3. Döner fırın içinde sıcaklığa bağlı gerçekleşen işlemler (Glasser, 1998) .....	23
Çizelge 2.4. Gerekli mekanik ve fiziksel özellikler için karakteristik değerler (TS EN 197-1, 2002) .....	38
Çizelge 2.5. Tane şekli ile bazı çimento servis özellikleri arasındaki ilişki.....	44
Çizelge 4.1. Klinker fazlarının kimyasal dağılama yöntemleri ve uygulama koşulları .....	54
Çizelge 5.1. YBMD ürün fraksiyonlarının kimyasal bileşimleri (SCaO: serbest kireç) .....	65
Çizelge 5.2. Bilyalı değirmen ürün fraksiyonlarının kimyasal bileşimleri (SCaO: serbest kireç).....	65
Çizelge 5.3. YBMD ve bilyalı değirmen fraksiyonlarının mineralojik bileşimleri .....	73
Çizelge 5.4. Alit ve belit kristallerinin dar tane boyu fraksiyonlarında büyüklük ve şekil özellikleri.....	75
Çizelge 5.5. YBMD ve bilyalı değirmen ürün fraksiyonlarında gömülü belit miktarı .....	82
Çizelge 5.6. YBMD ve bilyalı değirmen fraksiyonlarındaki serbestleşme dereceleri.....	83
Çizelge 5.7. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının priz süreleri .....	85
Çizelge 5.8. YBMD ve bilyalı değirmen ürün dağılımlarının kimyasal analizi .....	90
Çizelge 5.9. YBMD ürünlerinin priz süresi, su ihtiyacı ve hacimsel sabitlik özellikleri .....	92
Çizelge 5.10. Bilyalı değirmen ürünlerinin priz süresi, su ihtiyacı ve hacimsel sabitlik özellikleri.....	93
Çizelge 5.11. -10, -20, -30 ve -20 µm PÇ 42.5 R dağılımlarının kimyasal analiz sonuçları.....	98
Çizelge 5.12. PÇ 42.5 R, -30+2 µm ve -30+2 µm katkılı örneklerin kimyasal analiz sonuçları.....	99
Çizelge 5.13. PÇ 42.5 R, -20+5 µm ve -20+5 µm katkılı örneklerin kimyasal analiz sonuçları.....	100
Çizelge 5.14. -20 µm, -30 µm ve -45 µm PÇ 42.5 R dağılımlarının priz süresi ve hacimsel sabitlik test sonuçları .....	103
Çizelge 5.15. Açık ve kapalı devre ürünlerinin priz süresi, su ihtiyacı, hacimsel sabitlik ve özgül yüzey alanı sonuçları .....	107
Çizelge 5.16. Kapalı ve açık devre -30 µm, -30+5 µm ve +5 µm dağılımlarının priz süresi, hacimsel sabitlik, su ihtiyacı ve özgül yüzey alanı sonuçları.....	111
Çizelge 6.1. PÇ 42.5 R ile -20+5 µm katılan örneklerin dağılım eğrilerinin eğimleri (n) .....	124

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

Sayfa

Çizelge 6.2. Örneklerin kapalı ve açık devre ürünlerine göre 28 günlük basınç dayanımı değişim yüzdeleri.....	129
---	-----

## 1. GİRİŞ

Çimento öğütme devrelerinde farklı öğütme mekanizmalarına sahip bilyalı değirmen, yüksek basınçlı merdaneli değirmen (YBMD), dik değirmen ve Horomill gibi çeşitli öğütme ekipmanları kullanılmaktadır. Bu tip değirmenlerde öğütülen çimentoların farklı kalite özellikleri sergiledikleri gözlenmiştir. Özellikle YBMD, % 40'a varan enerji tasarrufu nedeniyle çimento sektöründe giderek artan bir uygulama alanı bulmuştur. Mineral endüstrisinde YBMD'nin tercih nedeni enerji tasarrufu yanında, artan mineral serbestleşme derecesi ve bunun sonucu olarak ortaya çıkan verim artışıdır (Battersby et.al, 1992; Dunne et.al, 1996). Dolayısıyla, enerji tüketimi ve ürün kalite özellikleri açısından öğütme sisteminin doğru seçilmesi önemlidir.

Çimentonun kalitesini tanımlayan servis özelliklerine, kimyasal ve mineralojik bileşimin yanısıra; incelik, tane boyu dağılımı, yüzey alanı ve tane mikroyapısı gibi fiziksel parametreler de etki etmektedir. Literatür verilerine göre kimyasal ve mineralojik bileşim ile mikroyapı özellikleri iri klinker taneleri üzerinde incelenmiş; mineral fazlarının miktarı, büyüklükleri, gözeneklilik ve klinker üretim sürecine yönelik işlem parametreleri gibi birçok faktör, genellikle klinkerin öğütülebilirliği ile ilişkilendirilmiştir (Hills, 1995; Maki et al., 1993). Çimento servis özellikleri ise; ya klinker tanelerinin mikroyapısı ya da çimento tanelerinin taramalı elektron mikroskopuyla belirlenen özellikleri ile ilişkilendirilmektedir (Hargave et.al, 1985).

Çimentonun hidrate olması için çimento bileşimindeki tüm mineral fazlarının su ile temas etmesi gerekmektedir. Her bir mineral fazının su ile ne derece temas edeceği, bu minerallerin bileşimini oluşturdukları çimento tanecikleri içinde, birbirlerine göre, hangi konumda olduklarına bağlıdır. İdeal olarak, her bir çimento taneciğinin tek bir mineralden oluşması, yani tüm yüzeylerinin su ile temasa açık olması istenir. Bu durumda tüm hidratasyon tepkimeleri kolaylıkla ve verimli olarak gerçekleşeceğinden, oluşacak hidratasyon ürünlerinin artacağı ve çimento dayanımının, özellikle erken yaşlar için, pozitif yönde etkileneceği öngörülmektedir. Pratikte, öğütülen çimento taneleri tek tek minerallerden değil, tekli, ikili ve çoklu mineraller içeren yapılardan

oluşmaktadır. Yine de, uygun öğütme mekanizmaları kullanarak, seçimli serbestleşme yoluyla, aynı inceliğe öğütülmüş çimento taneleri içindeki mineral fazlarının serbestleşme derecelerinin artırılabilceği düşünölmektedir.

Çimento tesislerinde kullanılan ve yukarıda sözü edilen değirmenler malzemeleri darbe, sürtünme ve ezme gibi farklı mekanizmalarla öğütmektedir. Bu ekipmanlarda öğütölen çimento tanelerinin kırılma şekillerinde ve tane boyu dağılımlarında farklılıklar olduğu bilinmektedir. Farklı öğütme mekanizması ürünü olan çimentoların mikro yapı özelliklerini inceleyen çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Bonen ve Diamond'un (1991) yaptıkları çalışmada, kimyasal bileşimi aynı, benzer tane boyu dağılımına sahip YBMD ve bilyalı değirmen ürünü çimentoların; tane şekli ve içerdikleri mineral miktarlarındaki farklılıklar nedeniyle benzer mikroyapıya sahip olmadıkları belirlenmiş ve YBMD ürünüde tanelerin kristalleri boyunca kırılma yerine, mineral faz sınırlarından kırıldığı ileri sürölmüştür. Öğütme mekanizması farklılığına bağılı olarak mikro yapı özelliklerinin değışmesi ve bu değışikliklerin, çimento kalite parametreleri üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu amaçla, çimento öğütmede çok yaygın kullanılan bilyalı değirmenler ve giderek artan uygulama alanı bulan YBMD'lerin, çimento karakterizasyon parametreleri açısından ne tür farklılıklar oluşturacağı; bu farklılıkların ve özellikle de çimento sektöründe hiç irdelenmemiş olan serbestleşme derecesi farklılıklarının, çimento servis özellikleri üzerindeki etkileri bu çalışmada incelenmektedir. Öğütme mekanizmasındaki farklılıkların yanı sıra, öğütme devre tasarımından da kaynaklanabilen farklılıkların fiziksel parametreler açısından incelenmesi ve bunların servis özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması çalışmanın diğeri kısmını oluşturmaktadır.

## 2. GENEL BİLGİLER

Çimento; insanoğlunun ilk olarak barınma ihtiyacı, daha sonraları ise farklı amaçlarla en fazla kullandığı ve bazı özelliklerinin hala bilinmediği çok önemli bir yapı malzemesidir. Portland Çimentosu adının patent hakkı, 1824 yılında ince taneli kil ve kalker karışımını pişirerek öğüten İngiliz duvarcı ustası Joseph Aspdin'e aittir. "Portland" ismi günümüze kadar korunmakla birlikte son yıllarda çimentoda büyük gelişmeler kaydedilmiş; çimento endüstrisi, farklı kullanım yeri ve amacına yönelik ürün çeşitliliğinde üretim yapabilir hale gelmiştir.

Portland çimentosu klinkeri; kireçtaşı, kil, silisli kum ve demir cevheri gibi hammaddelerin klinker mineralojik bileşimini oluşturacak oranda karıştırılıp öğütülmesi ve ekseni etrafında döndüğü için döner fırın adı verilen, yataydan yaklaşık olarak % 3-4 eğimle yerleştirilmiş silindir şeklindeki fırınlarda sinterleşme sıcaklığı olan 1350°C-1450°C 'ye kadar pişirilmesiyle elde edilen bir ara üründür (Erdoğan, 1995). Portland çimentosu ise, klinkerin % 3-6 oranında alçı taşı ve/veya uygun oran ve özellikte katkı maddeleri ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen, havada ve su altında sertleşen bir hidrolik bağlayıcıdır (Öney, 1998). Çimentolara % 5'in üzerinde mineral katkı katılması sonucu elde edilen katkılı Portland Çimentoları, katkı türleri ve miktarlarına bağlı olarak çok çeşitlidir. TS EN 197-1 standardı, genel amaçlı çimentoları (CEM çimentoları) 5 ana tip içerisinde toplanmaktadır: CEM I Portland çimentosu, CEM II Portland kompoze çimento, CEM III Portland yüksek fırın cürufllu çimento, CEM IV puzolonik çimento ve CEM V kompoze çimento. Bu 5 ana tip çimento, 27 çimento tipini kapsamaktadır (TS EN 197-1, 2002).

Çimento üretimi; uygun hammadde seçimi, hammaddelerin belli oranlarda karıştırılıp öğütülmesi, harmanlanması, döner fırınlarda pişirilmesi, pişme sonucu oluşan klinkerin soğutulması, klinkerin bir miktar alçı taşı ile birlikte değimenlerde öğütülerek çimento haline gelmesi ve ürünün kullanıcıya dağıtımı aşamalarından oluşmaktadır.

Çimento kimyası, mineralojisi, öğütmesi ve hidratasyonu ayrı ayrı oldukça kapsamlı konulardır. Bu özelliklerin çimentonun mekanik davranımı üzerindeki etkisi ise bir çok araştırmaya konu olmuştur. Çünkü çimento üretiminde farklı hammadde kullanımı, pişirme ve öğütme işlem parametreleri, çimentonun kimyasını, mineralojisini, fiziksel ve mekanik özelliklerini ve dolayısıyla betonun özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

Çimento öğütme işleminde dik değirmen, bilyalı değirmen, yüksek basınçlı merdaneli değirmen (YBMD) ve Horomill gibi çeşitli ekipmanlar ve bunların farklı devre tasarımları kullanılmaktadır. Klinker ve alçı taşının yanısıra kullanılan katkı malzemelerinin de etkisiyle farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip ürün elde etmek mümkündür.

Çimentonun kalitesi olarak ifade edilen basınç dayanımı, su ihtiyacı, priz alma gibi önemli servis özellikleri üzerinde kimyasal ve mineralojik parametrelerin yanısıra tane boyu dağılımı, incelik gibi diğer fiziksel parametreler de bir arada etkindir. Dolayısıyla daha kaliteli çimento üretebilmek için bu parametrelerin ne şekilde etkileştiklerini bilmek gerekmektedir.

## **2.1. Çimento Üretimi**

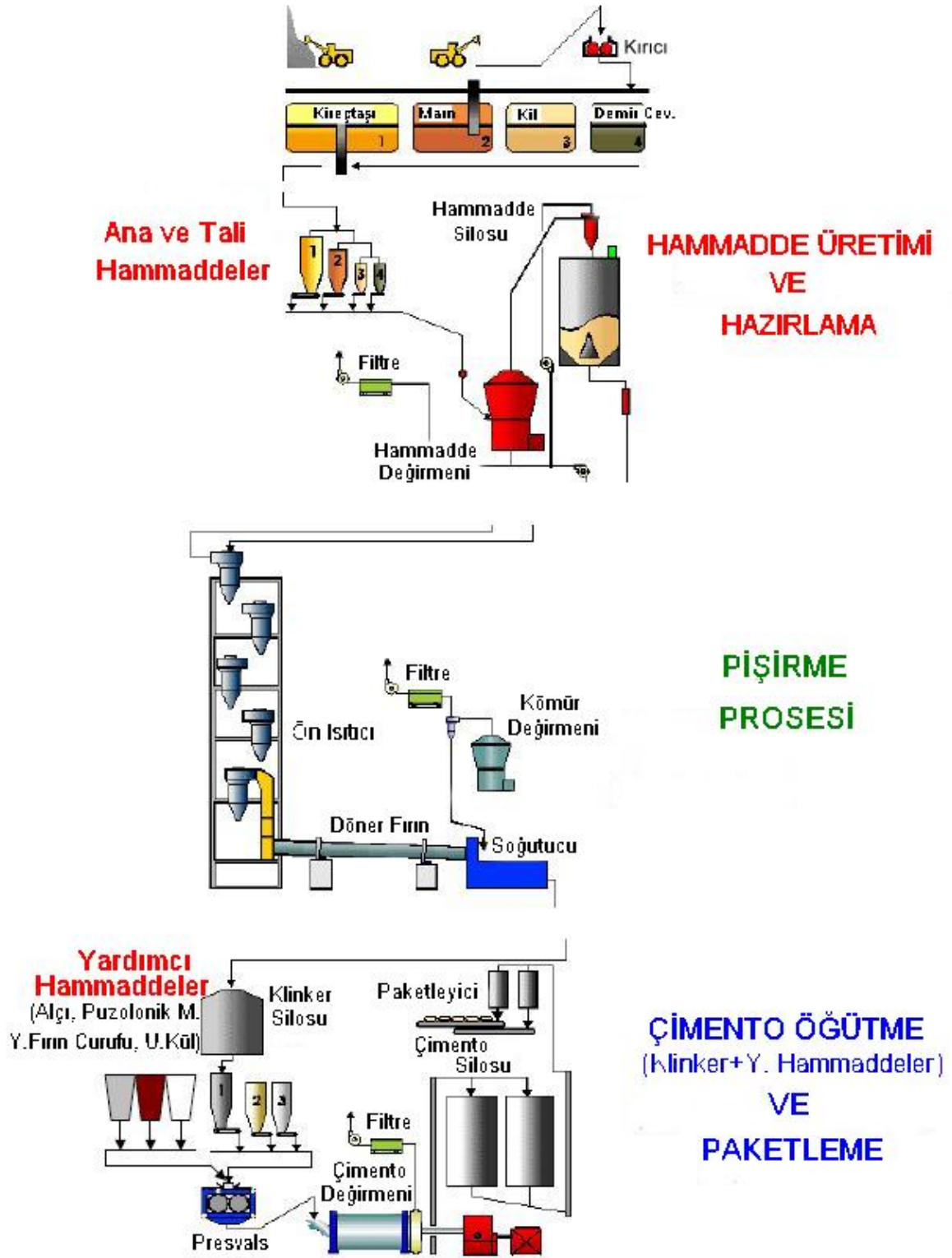
Portland Çimentosu üretiminde kireç, silis ve gerektiğinde alumina ve demir oksit içeren bir çok hammadde belli bir kimyasal bileşimi sağlayacak oranlarda karıştırılır, kırılır, öğütülür ve harmanlanır. Farin olarak adlandırılan bu hammadde karışımı kalsinasyon işlemi için döner fırınlara gider. Bazı çimento fabrikalarında enerji tasarrufu için, farin fırına girmeden önce bir ön ısıtmaya tabi tutulur. Seri halinde siklonların yer aldığı ön ısıtma kulelerinden geçen farin, fırından gelen sıcak gazlarla kısmen kalsine olur. Ön kalsinasyondan geçen farin, uzunluğu 50-75 metre, çapı 3-7 metre olan refrakter tuğla astarlı, dakikada 1.5-4 devir yaparak dönen silindirik fırına girer. Ön ısıtıcıdan gelen malzeme, fırına yukarı uçtan girer ve fırınla beraber dönerek, kayarak daha sıcak bölgelere, alt uçtaki aleve doğru ilerler. Pişirme işlemi sırasında malzemenin yaklaşık % 25'i ergiyip sıvı hale gelir ki, bu eriyik hem kimyasal



tepkimelerin oluşmasına yardım eder hem de döner fırının dönmesiyle oluşan klinker nodüllerini bir arada tutmaya yarar. Yanma işlemi için genellikle toz kömür, doğal gaz, fuel oil ve geri dönüşümlü sıvı yakıtlar kullanılmaktadır (Moir, 1997). Döner fırından kor halinde çıkan malzeme artık klinker denilen bir ara üründür ve hızlı bir şekilde soğutulması gerekir. Basınçlı hava verilerek hareketli plakalardan kayarak ilerleyen klinkerin sıcaklığı yaklaşık 80°C'ye kadar düşürülür. Bu aşamada açığa çıkan sıcak gazlardan fırının tekrar ısıtılması, ön kalsinasyon, kurutma ve binaların ısıtılması gibi amaçlar için yararlanılabilir. Soğutucudan çıkan klinkerin % 3-6 oranında alçı taşı (kalsiyum sülfat) ile birlikte öğütülmesi ile çimento elde edilir. Çimento, silolardan sonra paketleme ünitesine gider, dökme veya paket şeklinde satışa çıkarılır (Yeğınobalı, 2005). Çimento üretiminin tipik bir akım şeması Şekil 2.1'de verilmektedir.

## **2.2. Çimento Öğütme ve Sınıflandırma**

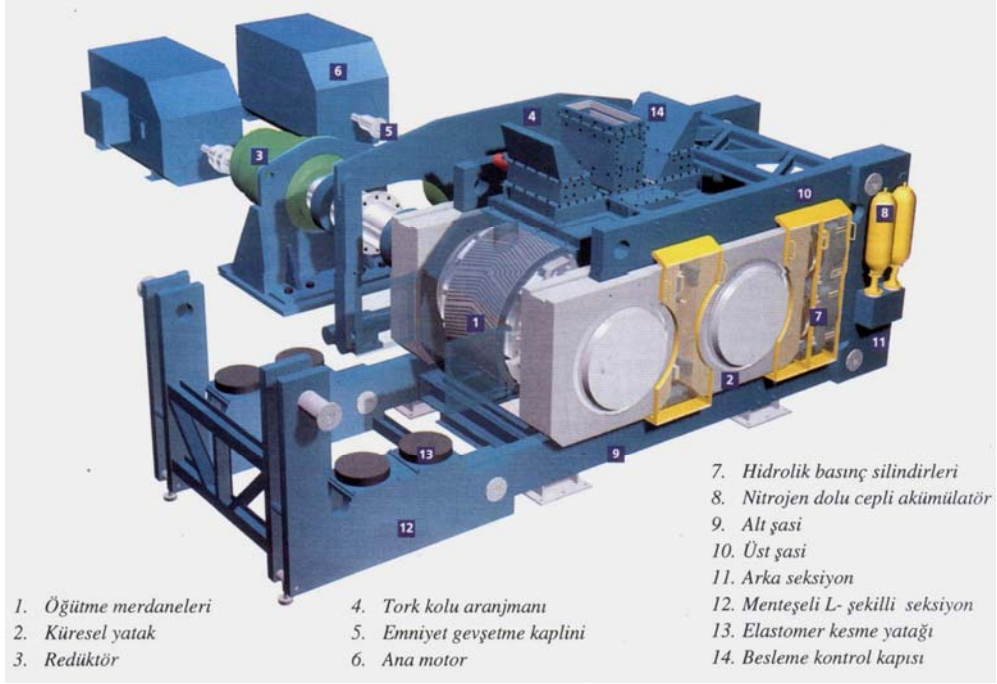
Portland çimento üretimindeki son aşama, klinkerin bir miktar alçı taşı ile birlikte öğütülmesidir. Elektrik enerjisinin en yoğun kullanıldığı birim olan öğütmede son yıllarda bilyalı değirmen dışında başka ekipmanlar da kullanılmaktadır. Özellikle çimento öğütmede verimsiz enerji kullanımı; Horomill gibi yeni ekipmanların tasarlanmasına ve YBMD'nin ön ezme veya son öğütmede kullanılması ya da yüksek verimli separatörlerin kapalı devrede kullanılması gibi farklı devre düzenlerine olanak tanımıştır (Moir, 1997). Çimento öğütme işleminde yaygın olarak kullanılan bilyalı değirmen dışında YBMD, dik değirmen, Horomill, CKP ön öğütücüleri, düşey milli şoklu değirmen gibi ekipmanlar da kullanılmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında sadece bilyalı değirmen ve YBMD öğütme mekanizmaları incelendiği için, bu iki ekipman hakkında bilgi aşağıda verilmektedir.



Şekil 2.1. Çimento üretimine ait tipik bir akım şeması (DPT, 2001).

### 2.2.1. Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenler (YBMD)

YBMD'lerde malzeme basınç yüklü merdaneler arasından, tane yatağı oluşturacak şekilde, geçerek ezme kuvvetinin etkisiyle öğütülür. Uygulanan basınç 50 MPa'ın üzerinde olduğu için merdaneler arasından çıkan ürün kek formundadır, dolayısıyla YBMD öğütme işlemini takiben çıkan kekin dağıtılması gerekmektedir. YBMD temel olarak öğütme merdaneleri, merdanelerin oturtulduğu bir yatak, ana gövde, besleme ünitesi ve hidrolik basınç silindirlerinden meydana gelmektedir (Şekil 2.2). Merdanelerden biri sabitken diğeri hidrolik sistem yardımıyla sabit merdaneye doğru basınçla itilmekte, merdaneler birbirine ters yönde dönmektedir.



Şekil 2.2. Yüksek basınçlı merdaneli değirmen

Merdane yüzeylerindeki aşınmayı azaltmak amacıyla pürüzlü veya pürüzsüz metal astarlar kullanılmakta, bu sayede malzemenin merdaneler arasındaki kavrama açısı da arttırılmaktadır (Battersby et.al, 1993).

YBMD çimento endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Mineral endüstrisinde de sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Kireçtaşı gibi çimento hammaddeleri, klinker ve cüruf YBMD ile öğütülmektedir. Son yıllarda çimento öğütmede YBMD kullanımı ile elektrik enerjisi tüketimi, bilyalı değirmen öğütmesi ile kıyaslandığında % 50'ye varan oranlarda azalmıştır (Battersby et.al, 1993).

YBMD'ler öğütme devrelerinde ön, hibrit, yarı son ya da son öğütme gibi farklı devre tasarımlarıyla kullanılmaktadırlar. Kapalı devrede bilyalı değirmen ile birlikte ön öğütme amacıyla kullanıldığında % 20'ye kadar kapasite artışı, % 7-15 oranında enerji kazanımı sağladığı belirtilmektedir. Son öğütme olarak kullanıldığında ise enerji kazanımı % 50'lere çıkmaktadır. Son öğütme devre tasarımı çimento endüstrisinde hammadde öğütme ile başlamış, çimento için de kullanılabilir hale gelmiştir (Ellerbrock, 1994).

YBMD kullanımının mineral endüstrisinde sağladığı avantajlar aşağıdaki gibidir (Battersby et.al, 1993; Ellerbrock, 1994; Kellerwessel, 1996):

- Düşük özgül enerji tüketimi
- Daha az bir yatırımla varolan tesiste kapasite artışını sağlayabilmesi
- Minerallerde daha yüksek serbestleşme
- Liç işlemi söz konusu olduğunda özütlenecek bileşen ile çözeltinin daha iyi etkileşmesi
- Daha az alan kaplaması

YBMD'nin çimento dışında farklı cevherlerde uygulamaları bulunmakta, genellikle daha düşük enerji tüketimi ve yüksek mineral serbestleşmesi gibi nedenlerden dolayı tercih edilmektedir. YBMD'nin cevher uygulamalarına elmas-kimberlit, altın, kromit, demir gibi cevherler örnek gösterilebilir. Örneğin, Güney Afrikalı araştırmacılar kimberlitin alışılmış kırma yöntemleri yerine tane yatağı kullanılarak ufaltıldığında elmasların daha az kırıldığını ve daha iyi serbestleştiğini belirtmişlerdir (Battersby et.al,1993; Kellerwessel, 1996).

YBMD'de öğütme işleminin, altın kazanımına etkisinin olup olmadığının incelendiği bir çalışmada; YBMD'de öğütülen ve YBMD ürünü ile aynı tane boyu dağılımını verecek şekilde merdaneli kırıcıda hazırlanan diğer bir örnek üzerinde flotasyon, ağır sıvı, gravite ve siyanür liçi zenginleştirme yöntemleri uygulanmış, sonuçlar altın kazanımı açısından değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi sonuç siyanür liçi yönteminin YBMD'de öğütülen ürünü için elde edilmiştir. YBMD öğütmesi sonucunda mikro çatlaklı bir yapının oluşması ve siyanür çözeltilisinin çatlak yüzeylerindeki altına daha kolay ulaşabilmesi, altın kazanımındaki artışa neden olarak gösterilmiştir (Dunne et.al, 1996).

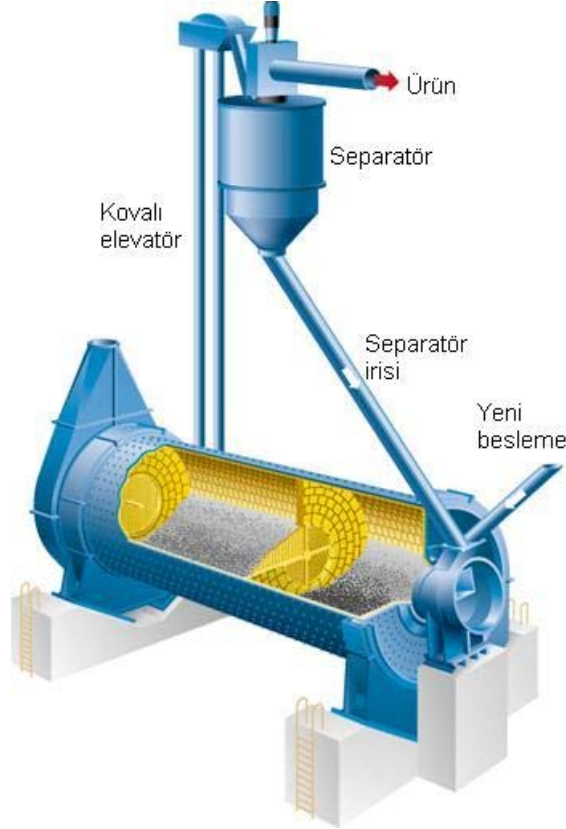
Kromit cevheri kullanarak yapılan bir diğer çalışmada, serbestleşmenin öğütme mekanizmalarına bağlı olarak farklı olabildiği gösterilmekte, serbestleşmenin diğer geleneksel öğütme yöntemlerine göre yüksek basınç altındaki tane yatağında daha yüksek oranda gerçekleştiği ifade edilmektedir. Çubuklu değirmende öğütme ile hidrolik piston kullanarak tane yatağına 30 ve 60 MPa basınç yüklemesiyle gerçekleştirilen öğütme ürünlerinin serbestleşme dereceleri karşılaştırılmıştır. Buna göre tane boyu inceldikçe kromit serbestleşme derecesi artmakta, pistonda belli basınçlar altında yapılan öğütme işlemi, çubuklu değirmendeki öğütme işlemine oranla daha yüksek serbestleşme sağlamaktadır. Yükleme basıncı 30 MPa'dan 60 MPa'a çıktıkça her tane boyu fraksiyonunda serbestleşme miktarı artmaktadır (Hoşten and Özbay, 1998). Kromit cevheri ile yapılan başka bir çalışmada ise çubuklu değirmen, bilyalı değirmen ve YBMD öğütme sistemleri karşılaştırılmış, YBMD ürününün özellikle çubuklu değirmen ürününe göre daha fazla serbest olduğu görülmüştür. YBMD ile bilyalı değirmen ürünü karşılaştırıldığında serbestleşme miktarının birbirine yakın olduğu fakat ince tane boylarında YBMD öğütme sisteminin daha avantajlı olduğu kaydedilmiştir (Mörsky et.al, 1995).

YBMD'nin kullanıldığı başka bir cevher uygulaması ise demir cevheridir. Dünyadaki en büyük demir cevheri yatağına sahip Hindistan'da, bir peletleme tesisine YBMD kurulmasıyla pelet kalitesinin ve tesis kapasitesinin arttığı, buna karşın enerji tüketiminin azaldığı rapor edilmektedir (Ehrentraut and Rao, 2001).

## 2.2.2. Bilyalı Değirmenler

Bilyalı değirmenler yatay pozisyonda yerleştirilmiş, silindirik çelik gövde ve iç yüzeyinde farklı tipte astarlara sahip öğütme ekipmanlarıdır. Öğütücü ortam olarak çelik bilya kullanılmaktadır. Bilyalı değirmenler çimento tesislerinde hammadde, klinker ve döner fırında yakıt olarak kullanılan kömürün öğütülmesinde kullanılmakta, özellikle klinker öğütmede çok kamaralı tasarımlarından ötürü tüp değirmen olarak adlandırılmaktadır. Malzemelerin kırılma mekanizması, değirmenin yatay eksen etrafında dönmesiyle birlikte öğütücü ortamın da değirmen içinde dönmesi ve aşındırma ile birlikte darbe kuvvetini malzemeye aktarmasıyla gerçekleşmektedir.

Yüksek verimli bir separatör ile kapalı devre halinde çalışan iki kamaralı bilyalı tüp değirmen öğütme sistemi, yeni kurulacak bir çimento öğütme devresi için hala en çok uygulanan tasarımlardan biridir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Separatörle kapalı devre çalışan iki kamaralı tüp değirmen

Bilyalı değirmenler; işletme ve bakım kolaylığı, yatırım, kurulum ve işletme maliyeti, ürün kalitesi ve bir çok amaca uygun olması gibi nedenlerden dolayı tercih edilmektedir (Jorgensen, 2005).

Tüp değirmenlerde uzunluğun çapa oranı malzemenin öğütülebilirliğine, ürünün inceliğine ve değirmen tipine göre değişmektedir. Hammadde öğüten değirmenler için uzunluğun çapa oranı 1.5-2.5 arasında değişirken, bu oran çimento değirmenleri için 3.0-3.5 arasındadır. Değirmen kritik hızı % 70-75, doldurma oranı ise % 26-33 arasında değişmektedir. Bilyalı değirmenler genellikle tek ya da iki kamaradan oluşmaktadır. Eğer hammadde öğütülüyorsa, öğütme kamarasının önünde kurutma görevi gören ek bir kamara mevcuttur. Tek kamara, eğer malzeme ön öğütmeye tabi tutulmuş ya da kolay öğütülebilir hammaddelerden oluşuyorsa tercih edilmektedir. İki kamaralı sistemde kamaralar elek görevi gören, belli bir yüzey açıklığına sahip ızgara ile birbirinden ayrılmakta ve dolayısıyla her kamaradaki bilya boyu ve şarjı farklı olabilmektedir. Genellikle birinci kamarada iri malzemeyi kırabilmek için en büyük bilya boyu 90 mm seçilirken, ikinci kamarada 50-15 mm arasındaki bilya boyları kullanılmaktadır. İlk kamarada kaldırıcı astarlar sayesinde darbe kuvveti, ikinci kamarada ise sınıflandırıcı astarlar sayesinde aşındırma kuvveti etkindir. Enerji tüketimi, açık devre çalışan ve 3600 m<sup>2</sup>/kg yüzey alanında Portland çimentosu üreten bilyalı değirmen için yaklaşık 45 kwh/t olmaktadır. Bu rakam değirmen kapalı devre çalıştığında separatörün verimliliğine bağlı olarak 2-5 kwh/t tasarrufla birlikte daha azalmaktadır, dolayısıyla enerji tüketimi değirmenin dönme hızına, değirmen yüküne ve bilya boyu ile yükleme miktarına bağlıdır (Duda, 1985; Bye, 1999; Holderbank Cement Seminar, 1998). Bilyalı değirmende öğütülen çimentonun tane boyu dağılımı, YBMD ve dik değirmen ürünlerine göre daha geniş dağılımda olup incelik değeri yüksektir.

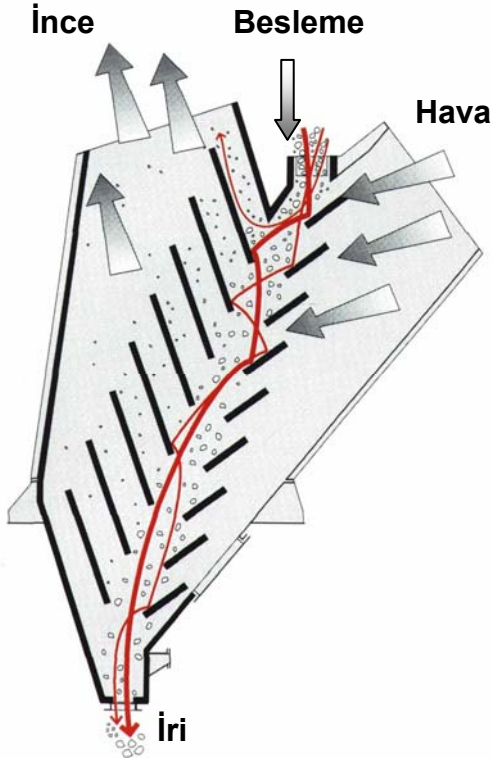
### **2.2.3. Havalı Sınıflandırma**

Havalı sınıflandırma; akışkanın hava olduğu bir ortamda, bir bileşke kuvvet altında, tanelerin boyutlarına göre farklı hızlara sahip olacağı prensibiyle, malzemeyi belli bir

kesme boyundan daha ince ve iri fraksiyonlara ayırma işlemidir. Havalı separatörler kapalı devre öğütme sisteminin bir parçası olup değirmen çıkışı ürününü ince ve iri fraksiyonlara ayırır, iri malzemeyi tekrar öğütmeye gönderip, inceyi devreden çekerek aşırı öğütmeyi azaltır. Bu şekilde hem öğütme enerjisi etkin kullanılmakta, hem de tane boyu dağılımı kontrolü ile ürün kalitesi arttırılmaktadır.

19. yüzyıldan bu yana farklı separatör tasarımları gerçekleştirilmiş, bunlar statik ve dinamik olmak üzere 2 ana grup altında toplanmıştır. Statik separatörlerin içinde hareket eden bir parça yoktur, ayırım; hava hızı ve yönüne, besleme hızına ve kanat açısına bağlıdır. Ayırım etkinliği oldukça düşüktür; iri tanelerin (90-200  $\mu\text{m}$ ) sadece % 60-65'i iri akıma giderken, incelerin (<10  $\mu\text{m}$ ) sadece % 55'i ince fraksiyona ayrılabilir (Yardi, 2005). Tipik statik separatörlere siklon ve grit separatörler örnek gösterilebilir. Grit separatörler genellikle hava süpürmeli değirmenlerle kullanılmaktadır.

Son yıllarda Alman Humboldt Wedag AG tarafından geliştirilen önemli bir statik



separatör tipi V-separatördür. Özellikle yüksek basınçlı merdaneli değirmen ile birlikte kullanıldığında, değirmenden çıkan kek halindeki ürünün dağıtılması ve ön ayırmaya tabi tutulması V-separatörde gerçekleşir. Şekil 2.4'de gösterilen V-separatör ayırım prensibine göre kanatlara çarpan malzeme dağılır, iriler merdaneli değirmene geri dönerken, inceler bilyalı değirmen ile kapalı devre çalışan yüksek verimli separatöre gider. V-separatör kullanımı ile düşük enerji tüketimi, kek halindeki malzemenin dağıtılması ve ön sınıflandırma yapılması ve bunu takiben yüksek ayırım verimliliği gibi faydalar sağlanmaktadır.

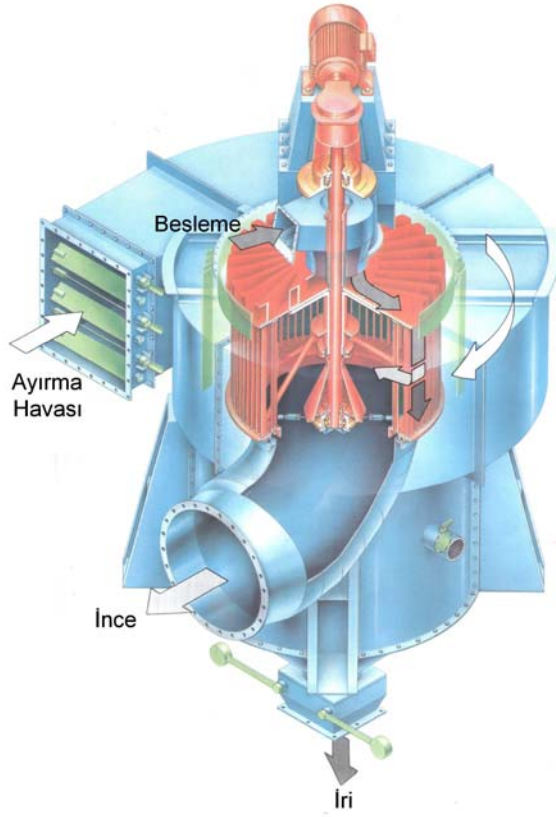
Şekil 2.4. V-separatör çalışma prensibi



Dinamik separatörler ise 1., 2. ve 3. nesil separatörler olarak gruplara ayrılır. Birinci nesil dinamik separatörde besleme, santrifüj kuvveti yaratacak şekilde dönen bir dağıtıcı tabla ile yapılmakta ve hava akımı separatör içindeki fan yardımıyla sağlanmaktadır. Bu separatörlerin en büyük dezavantajı, separatör içinde sürekli dolaşan hava akımından incelerin uzaklaştırılmaması ve bunların iri fraksiyonda birikmesidir. Diğer bir sorun ise; dolaşan havanın çok sıcak olması ( $>120^{\circ}\text{C}$ ) alçı formunun değişmesine neden olmakta, bu da ürün kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle 1. nesil separatörler genellikle hammadde öğütme devrelerinde daha çok tercih edilmektedir. Ürün dağılımı ve yüzey alanına kolaylıkla müdahale edilememesi, dağıtıcı tabladan beslemenin düzenli yapılamayışı gibi olumsuz koşullar farklı tipte dinamik separatörlerin tasarımlarına neden olmuştur (Yardı, 2005). İkinci nesil dinamik separatörlerde hava dolaşımını sağlayan yardımcı bir fan, inceleri toplayan dış çevre siklonlar ve separatör hızı ile hava dolaşımının bağımsız kontrol edilebilmesi gibi yenilikler sunulmuştur. Ayırım prensibi 1. nesil separatörlerle aynıdır ancak, 2. nesil separatörler 1. nesile göre ince tanelerin hava akımından daha iyi uzaklaştırılması, daha keskin ayırım, daha düşük by-pass, hava sıcaklığının ve inceliğin sürekli kontrolü gibi avantajlara sahiptir. Büyük boyutta olmalarının yanı sıra, dolaşan hava içindeki incelerin tamamen uzaklaştırılmaması nedeniyle hava taşıma kapasitesinin sınırlanması, beslemenin iyi dağıtılamaması ve ayırım bölgesinde durma zamanının çok kısa olması ve istikrarsız kesme boyu gibi dezavantajları mevcuttur. Beslemenin, separatörde daha etkin bir şekilde dağıtılması, by-pass miktarının düşürülmesi, daha ince boydan kesme yapılabilmesi ve ürün boyunun daha kontrol edilebilir olması gibi amaçlarla 3. nesil yüksek verimli separatörler tasarlanmıştır.

Bu nesle örnek bir tasarım olan Sepol'de (Şekil 2.5), separatörün merkezinde üstte dağıtıcı tablaya bağlı değişken hızlı bir rotor, rehber kanatlar ve rotor etrafında dönen kafes yapısı bulunmaktadır. Diğer nesillerden farkı, hava separatöre sabit hızda yatay olarak girer; tanelerin dönen kafesin çubuklarına çarpmasıyla irinin havayla ince akıma taşınması engellenir. İncelik; hava akış hızının, rotor hızının ve rehber kanatların yerleşiminin değiştirilmesiyle ayarlanabilmektedir. Yüksek verimli

separatörle elde edilen keskin ayırım ve düşük by-pass; değirmen-separatör kapalı devresinde devreden yükü azaltmış; kapasitenin % 20-40 oranında artmasına, enerji

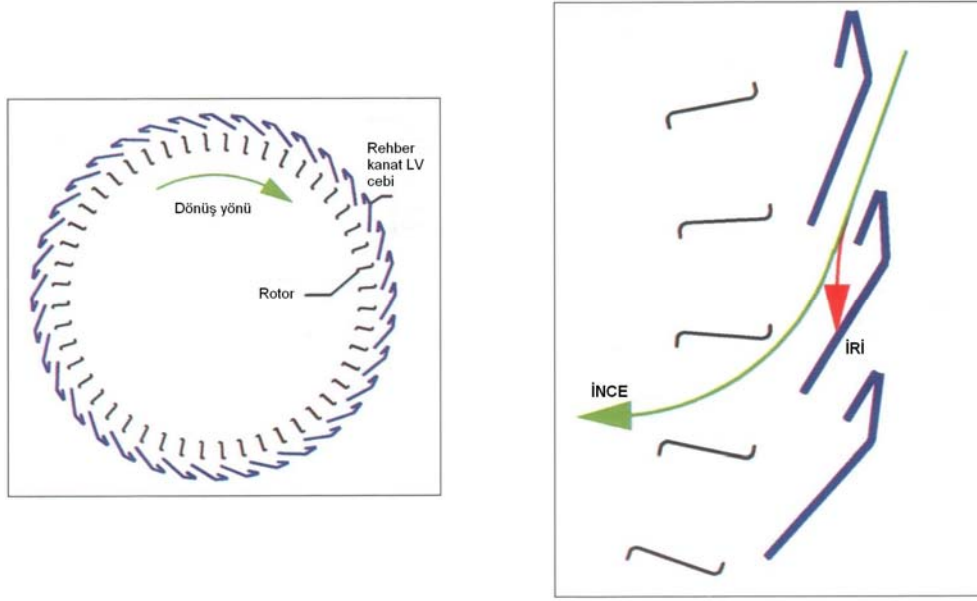


tüketiminin % 15-35 oranında azaltılmasına neden olmuştur. Separatörün çimento ürünü üzerinde; dar tane boyu dağılımı oluşturması ve sisteme verilen temiz hava nedeniyle öğütme sıcaklığını düşürmesi gibi iki önemli etkisi mevcuttur. Dar tane boyu dağılımı dayanımı arttırmakta fakat su ihtiyacında da artışa neden olmaktadır. Sıcaklığın azalması ise, alçının daha az dehidrate olmasına; kalsiyum sülfatın çözünürlüğünün azalmasına neden olur, bu da çimentonun ani prizlenmesi ve erken katılaşmasına yol açar. En uygun alçı miktarı seçimiyle bu durum kontrol edilebilir (Detwiler, 1995).

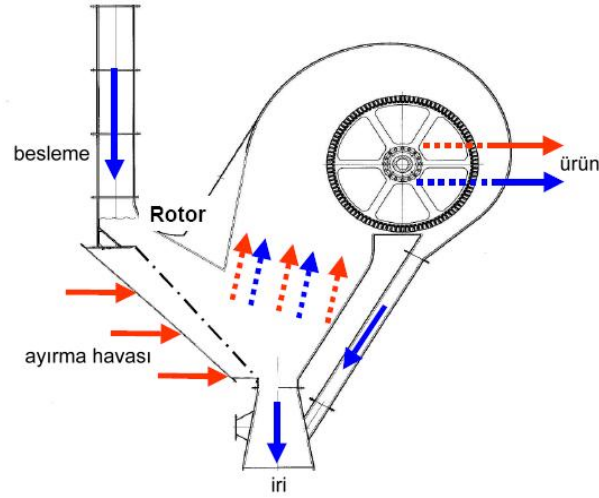
Şekil 2.5. Üçüncü nesil yüksek verimli separatör

Son yıllarda yeni tasarımlar dikkati çekmektedir. Örneğin LV sınıflandırıcı olarak adlandırılan ekipman, dik değirmenlerde hava ve malzeme akışını kolaylaştırmak amacı ile geliştirilmiştir. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi diğer sınıflandırıcılardan farklı olarak rotor dışındaki rehber kanatlar cep şeklinde tasarlanmıştır. İnceler rotora doğru sabit kanatların kademeli geçiş alanı yaratan tasarımları ve azalan türbülans nedeniyle hava ile sürüklenirken, iriler kanatlar sayesinde hızları kesildiği için yeni besleme ile karışmadan iri akıma kolaylıkla yönlenebilir. LV teknolojisi ile kapasitede % 12-30 artış, güç tüketiminde 1.5-5.0 kwh/t kadar azalma, daha az titreşim ve daha yüksek çimento dayanımı kaydedilmiştir (Nielsen and Tsuchiya, 2001).

Diğer yeni bir tasarım, statik-dinamik separatör karışımı tasarımına sahip, yüksek basınçlı merdaneli değirmen POLYCOM® ile birlikte kullanılan SEPOL HR®'dir. Şekil 2.7'de verilen çalışma prensibine göre diğer sınıflandırıcılardan farklı olarak rotor yatay konumdadır. POLYCOM®'dan çıkan kek halindeki malzeme, besleme şutundan çarpma plakasına gelir ve bir miktar dağılır. Malzeme yüksek eğimli, hava akışlı zeminden kayar, iriler öğütmeye geri dönerken, inceler hava akışıyla rotora doğru hareket eder. Hammadde ve çimento uygulamaları mevcut olup basit, aşınmaya karşı dayanıklı, ayırım etkinliği yüksek ve by-pass oranı % 30'un altındadır (Halbleib, 2005).



Şekil 2.6. LV sınıflandırıcısında ayırma prensibi



Şekil 2.7. SEPOL HR® sınıflandırıcısı

### 2.3. YBMD ve Bilyalı Değirmenlerin Öğütme Mekanizmaları

Bir tanenin kırılabilmesi için, kırılma dayanımını yenecek kadar yoğun bir kuvvet olması gerekir. Dolayısıyla kırılmayı, tane içindeki minerallerin kırılabilirlik özelliği, mineral fazlarını bir arada tutan bağların dayanıklılığı ve uygulanan kuvvetin özelliği etkilemektedir. Öğütmede yeni yüzey oluşumu mineral faz büyüklüğünün bir kaç parçaya ayrılması ya da faz sınırlarından kopma ile gerçekleşir.

Öğütme mekanizması temelde darbe, basınç (ezme) ve aşındırma kuvvetleri ile ifade edilir. Öğütme devrelerinde kullanılan ekipmanlar bu kuvvetlerden birine ya da bunların bileşke kuvvetlerine sahiptir. YBMD'deki öğütme basınç kuvvetiyle gerçekleşirken, bilyalı değirmende darbe ve aşındırma kuvvetleri etkin olmaktadır.

Basınç ve darbe ile kırılan malzemelerin yapısında önemli farklar oluşmaktadır. Basınçla kırılan malzemede daha sonraki kırılmayı tetikleyecek gerilmeler oluşur. Fakat darbe kırılması ani bir kırılma etkisi yaratır ve malzeme içinde herhangi bir basınç oluşmaz. Darbe malzemeye çok hızlı, ani bir şok gibi aktarılır, böyle bir durumda kristal kafesin deformasyon enerjisini soğuracak çok az bir zamanı kalır. Dolayısıyla darbeden sonra rahatlama ile malzeme içinde yeni çatlaklar oluşamaz (Wills and Atkinson, 1993).

Basınç kuvvetinin uygulandığı YBMD öğütme sisteminde kırılma daha çok mineral faz sınırları boyunca gerçekleşmektedir. Kırılma mekanizması birim kütle başına uygulanan kuvvet yoğunluğu ile ilişkilidir. Mineral faz sınırlarından kırılma genellikle düşük yoğunluk sonucu gerçekleşirken, yüksek yoğunluk daha çok rastgele tekrarlı kırılmayı meydana getirmektedir. Değirmenlerde kuvvet yoğunluğunun etkin kullanımı zayıftır, dolayısıyla harcanan enerjinin çok küçük bir kısmı yeni yüzey oluşumunda kullanılmaktadır. Fakat YBMD'de kuvvet yoğunluğu hem düzgün hem de kontrollü olduğundan mineral faz sınırlarından kırılma daha kolay gerçekleşir (Apling and Bwalya, 1997).

## 2.4. YBMD ve Bilyalı Değirmen Ürünlerinde Görülen Farklılıklar

YBMD ve bilyalı değirmende öğütülen çimentoların tane geometrisi, su ihtiyacı, priz alma süresi, alüminat ( $C_3A$ ) ve alit ( $C_3S$ ) fazlarının etkileşimleri gibi bir çok fiziksel, servis ve mineralojik özellikler açısından farklılık gösterdiği bilinmektedir (Odler and Chen, 1995).

YBMD ve bilyalı değirmenin akım şemalarındaki farklı yerleşimleri sonucu ortaya çıkan farklı devre tasarımlarında da elde edilen ürünün özellikleri değişebilmektedir. Örneğin; eğer malzeme önce ön öğütme amacıyla YBMD'de ve takibinde bilyalı değirmende öğütülüyorsa, bu ürünün separatörle kapalı devre çalışan bilyalı değirmen çimento ürünüyle farklılıklar göstermediği, dayanım değerlerinin pek değişmediği kaydedilmiştir. Ancak, malzeme YBMD'de son öğütme devre tasarımına uygun öğütülüyorsa, o zaman iki ürün arasında endüstriyel anlamda farklılıkların oluşabileceği belirtilmektedir (Ellerbrock et.al, 1990; Odler and Chen, 1990).

En belirgin farklılıklar klinker etkileşimine bağlı olarak ürün servis özelliklerinde görülmektedir. Örneğin; aynı yüzey alanı için, YBMD ürünüdeki dar tane boyu dağılımı gereği ince tanelerin fazla olması ile bu ürün, bilyalı değirmen ürünü olan çimentoya göre daha fazla standart basınç dayanım değeri vermektedir. Fakat, YBMD ürünü standart su-çimento kıvamına erişebilmek için % 25'e kadar daha fazla suya ihtiyaç duymakta, priz alma süresi kısalmaktadır. Bazı durumlarda bu nedenden dolayı çimentonun işlenebilirlik karakteristiği olumsuz etkilenebilmektedir (Ellerbrock, 1994; Schnatz et.al, 1995).

YBMD ürününün dar tane boyu dağılımında olması ve dolayısıyla su ihtiyacının fazla olması aşağıdaki gerekçelerle açıklanmaktadır:

- Dar tane boyu dağılımı ile  $C_3A$  fazının etkinliği artmakta, uygun dozda kalsiyum sülfat bileşiği eklense bile daha fazla hidratasyon ürünü

oluşmaktadır. Miktarı artan hidrasyon ürünleri katılaşma ve sertleşme eğiliminde olurken, standart kıvamı elde edebilmek için daha fazla suya ihtiyaç duyulmaktadır.

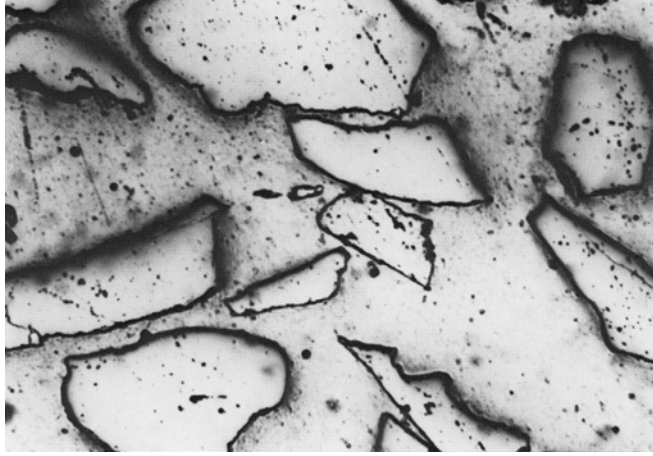
- Dar dağılımda, geniş dağılıma göre tane boyutları birbirine daha benzer oldukları için taneler arasında daha fazla boşluk bulunmaktadır. Dolayısıyla eklenen su öncelikle taneler arasındaki boşlukları doldurmakta harcanacak, tanelerin birbirleri üzerinde hareket etmelerini sağlayacak kadar kıvamlı olabilmeleri için daha fazla suya ihtiyaç olacaktır.
- Yüksek basınçlı öğütmede uygulanan basıncın etkisiyle mineral faz sınırlarından kırılma sonucu iç çatlakların artması ve dolayısıyla yüzey alanının artması su tüketimini artırmaktadır.
- Bilyalı değirmen ile karşılaştırıldığında YBMD'de farklı bir öğütme basıncının uygulanması sonucu sülfat ajanının yeteri inceliğe ulaşamaması daha fazla su ihtiyacına neden olmaktadır.
- YBMD'nin öğütme bölgesindeki düşük sıcaklık ve malzemenin merdaneler arasındaki kalma süresinin az olması sonucunda klinker etkinliği için kullanılan sülfat ajanının tipi ve miktarının uyumsuzluk göstermesi su tüketimini arttırmaktadır (Kuhlmann et.al, 1985; Odler ve Chen, 1990; Schnatz et.al, 1995).

Literatürde YBMD ve bilyalı değirmen çimento ürünlerinin mineralojik analizine ilişkin çok az sayıda çalışma yapılmış, genellikle analiz sürecinin daha kolay olması nedeniyle sonuçlar klinker örneklerinden elde edilmiştir. Çimento taneleri için yapılan ender çalışmalardan birinde, bu iki farklı öğütme mekanizmasıyla öğütülen aynı tane boyu dağılımına sahip örneklerin mineralojik analizi tarama elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiş, çalışma sonucunda YBMD ürününün bilyalı değirmen ürününden farklı olduğu saptanmıştır. Örneğin; YBMD ürününde daha az sayıda küçük taneler bulunmakta, görünüm oranı (en uzun kenarın en kısa kenara oranı) ve şekil faktörü daha düşük olmakta, tane içindeki mineralojik içerikler ise farklılık göstermektedir. Bu duruma YBMD öğütme mekanizmasındaki çimento tanelerinin kristal büyüklükleri boyunca kırılmak yerine mineral faz sınırlarından kırılmasının neden olduğu yorumu

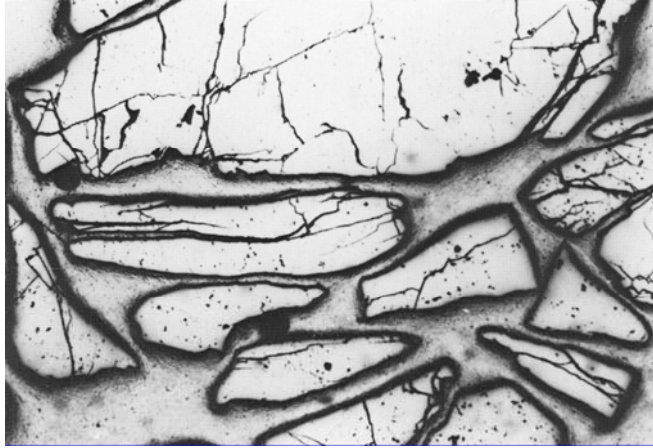
yapılmıştır. Ayrıca böyle bir kırılma şekli sonucunda belit ve periklasın alit içinde gömülü kristaller yerine daha çok tek taneler halinde bulunduğu tespit edilmiştir. Bu farklılıkların, öğütme mekanizmalarındaki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmüştür (Bonen and Diamond, 1991).

Yüksek basınç altında yapılan kırma ya da öğütme işlemi sonrasında üründe mikro çatlakların oluştuğu bilinmektedir. Darbenin etkin olduğu sistemde ise üründe çatlaklı mikro yapı gözlenmez. Yüksek basınçlı ve darbeli kırma işlemleri sonunda elde edilen kuvarsit tanelerinin parlak kesitleri bu durumu en iyi şekilde açıklamaktadır (Şekil 2.8).

(a)



(b)



Şekil 2.8. 0.3-0.1 mm tane boyu aralığındaki kuvarsit parlak kesit örnekleri (a) darbe ile kırma (b) yüksek basınç altında kırma (Battersby et.al, 1992).

## 2.5. Çimento'nun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler ile üretim sürecine yönelik işlem parametreleri çimento'nun kimyasal ve mineralojik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Klinkerin kimyasal bileşimi ve iç yapısının öğütülebilirliğe, pişme sürecine ve çimento dayanımına etkileri baz alınarak "klinker kalitesi" terimi geliştirilmiş, bu konuda çok sayıda çalışma yapılmıştır (Frigione et.al, 1983; Hills, 1995; Ergin, 1998).

Döner fırında pişme sonucu oluşan klinkerin kimyasal bileşimini bilmek kadar mineralojisini bilmek de çimento kalitesi açısından önemlidir. Endüstride, bazı durumlarda mineralojik parametreler, işlem koşullarının yeniden düzenlenmesi açısından belirleyici olabilmektedir. Örneğin; belirli bir hammadde yatağının kimyasal bileşiminin değişmediği durumda döner fırının bakım onarım işlemi sırasında olası mineralojik değişimler göz önünde bulundurulmalıdır (Brüggeman and Brentrup, 1990).

Klinkerin mineralojisi ve iç yapısı diğer bir deyişle mineral fazlarının ve gözeneklerin oluşumu ve dağılımı; hammadde karışımının tane boyutu ve dağılımına, en büyük taneye, homojenliğe, sinterleşme sıcaklığı ve süresine, klinker soğutma hızına, kimyasal bileşimine ve diğer üretim koşullarına bağlıdır. Dolayısıyla klinkerin kalitesinden döner fırın koşulları, sinterleşme derecesi, hammadde karışımının fiziksel ve mineralojik özellikleri yorumlanabilir, son ürün beton hakkında ön fikir elde edilebilir. Klinkerin kalite kontrolünde fiziksel ve kimyasal testlerin yanısıra klinkerin iç yapısının mikroskop yöntemleri ile incelenmesi oldukça önemlidir. Çünkü kimyasal ve fiziksel testleri olumlu olan bir klinkerin, mineral fazlarının kristal boyutu ve dağılımına bağlı olarak öğütülebilirlik ve dayanım gelişmesi açısından olumsuz sonuçlar verebileceği görülmüştür (Altun, 2000).



### 2.5.1. Çimento Kimyasal Bileşimi

Kalker, kil, marn, pirit gibi farklı hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılıp 90 µm'dan daha ince olacak şekilde öğütülmesi ve döner fırında sinterleşme sıcaklığına kadar pişirilmesiyle oluşan ara ürün klinkerin kimyasal bileşimi genellikle Çizelge 2.1'de verilen sınır değerler içerisinde yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Portland Çimentosu klinkerinin kimyasal bileşenleri (Duda, 1985)

Oksit	Değer	Oksit	Değer
SiO <sub>2</sub>	% 16-26	CaO	% 58-67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 4-8	MgO	% 1-5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 2-5	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	% 0-1
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 0-3	SO <sub>3</sub>	% 0.1-2.5
TiO <sub>2</sub>	% 0-0.5	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% 0-1.5
Kızdırma kaybı % 0.5-3			

TS EN 197-1 (2002) standardına göre çimentolar için öngörülen kimyasal özellikler Çizelge 2.2'de "karakteristik" değerler olarak gösterilmektedir. Çizelgedeki dayanım sınıflarında belirtilen standarda uygun işlem yapıldığında, özellikler kolonundaki değerlerin sağlanması gerekmektedir.

Çizelge 2.2. Gerekli kimyasal özellikler için karakteristik değerler

Özellik	Standard	Çimento Tipi	Dayanım Sınıfı	Özellikler
Kızdırma kaybı	EN 196-2	CEM I, CEM III	Hepsi için	≤ % 5
Çözülme kalıntısı	EN 196-2	CEM I, CEM III	Hepsi için	≤ % 5
Sülfat miktarı (SO <sub>3</sub> olarak)		CEM I, CEM II, CEM IV, CEM V	32.5 N, 32.5 R, 42.5 N 42.5 R, 52.5 N, 52.5 R	≤ % 3.5
EN 196-2		CEM III	Hepsi için	≤ % 4.0
Klorür içeriği	EN 196-21	Hepsi için	Hepsi için	≤ % 0.10
Puzolonik özellik	EN 196-5	CEM VI	Hepsi için	Deneyi sağlar

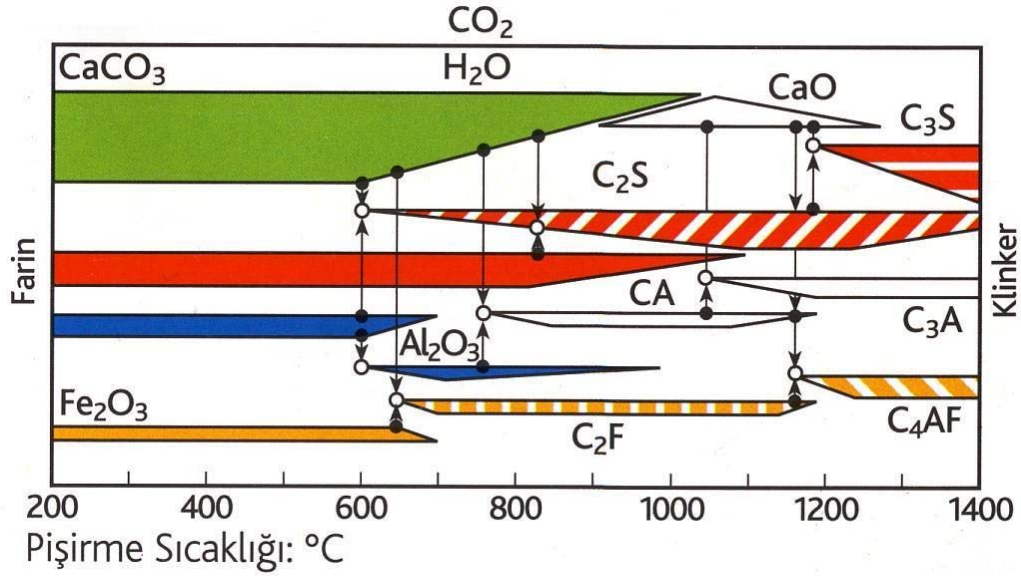
### 2.5.2. Klinker Mineral Fazlarının Oluşumu

Klinker mineral fazları, kalkerli ve killi hammadde karışımının döner fırında sinterleşme sıcaklığında pişirilmesi ve bu süreçte gerçekleşen bir dizi tepkime sonucunda oluşur. Isı alan ve ısı veren tepkimeler genellikle katı karışımları arasında meydana gelmekte, pişme sürecinin son aşamalarında % 20-30 kadar oluşan sıvı faz ile mineral bileşimlerinin oluşumu tamamlanmaktadır. Döner fırın içerisinde belli sıcaklıklarda gerçekleşen işlemler Çizelge 2.3'de özetlenmektedir.

Yataydan bir kaç derece eğimli duran döner fırının, alev çıkan alt ucundan beslemenin yapıldığı üst ucuna kadar farklı sıcaklık bölgeleri mevcuttur, dolayısıyla Çizelge 2.3'de tanımlanan süreçler belli bir sırayla gerçekleşmekte ve bu süreçler sonucunda bir dizi karma oksit formunda bileşikler oluşmaktadır. Fırının farklı sıcaklık bölgelerinde oluşan bileşikler Şekil 2.9'da verilmekte, oluşan tepkimeler aşağıda özetlenmektedir.

Çizelge 2.3. Döner fırın içinde sıcaklığa bağlı gerçekleşen işlemler (Glasser, 1998)

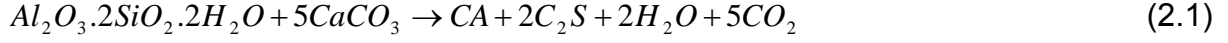
Sıcaklık, °C	İşlem	Termal değişim
100°	Serbest suyun buharlaşması	Isı alan
500° ve üstü	Kil minerallerinin bünyesindeki suyun uzaklaşması	Isı alan
900° ve üstü	Suyunu kaybetmiş kil minerallerinin kristallenmesi	Isı veren
900-1200°	CaCO <sub>3</sub> veya CaO ile aluminasilikatlar arasındaki tepkimeler	Isı veren
1250-1280°	Sıvı faz oluşumunun başlaması	Isı alan
1280° üstü	Sıvı faz oluşumunun devamı ve çimento bileşiklerinin oluşumunun tamamlanması	Denge durumunda muhtemelen ısı alan



Şekil 2.9. Farinden klinkere geçişte mineral faz değişimleri (Yeğınobalı, 2005).

Farklı sıcaklık bölgelerinde gerçekleşen tepkimeler sonucu oluşan bileşiklerde karma oksitler kısaltma kullanılarak tanımlanmaktadır (C: CaO, A: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S: SiO<sub>2</sub>, F: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

650-1050°C arası



1250-1450°C arası



Bu tepkimeler sonucunda tipik bir Portland Çimentosu dört ana mineral fazından meydana gelmektedir:

Trikalsiyum silikat (Alit)	$C_3S$	$(3CaO \cdot SiO_2)$
Dikalsiyum silikat (Belit)	$C_2S$	$(2CaO \cdot SiO_2)$
Trikalsiyum aluminat (Aluminat)	$C_3A$	$(3CaO \cdot Al_2O_3)$
Tetrakalsiyum alumina ferrit (Ferrit ya da Braun Millerit)	$C_4AF$	$(4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3)$

### 2.5.3. Klinker Mineral Fazları Analiz Yöntemleri

Klinker mineral fazlarının belirlenmesi pek çok analiz yöntemiyle yapılabilmekte, bunların bazıları nicel, bazıları ise sadece nitel anlamda veri sağlamaktadır. Kimyasal ve fiziksel analiz yöntemlerinin kullanılabilirlikleri, uygulama hızları ve güvenilirlikleri birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Yaş kimyasal analiz, Bogue yöntemi, klasik mikroskopi, taramalı elektron mikroskopisi, XRD ve görüntü analiz yöntemleri kimyasal ve fiziksel yöntemlere örnek verilebilir. Bu yöntemler arasında en kolay ve

ucuz olanı Bogue yöntemidir; kimyasal bileşenler ile potansiyel fazlar hesaplanır. Ancak, Bogue yöntemi klinkerleşme süreci sırasında kristalleşmenin denge koşulunda gerçekleştiği ve mineral fazlarının saf halde oluştukları varsayımına dayanır. Pratikte bu doğru değildir; yabancı iyonlar faz bileşiminde yer alabilirler, dolayısıyla tamamen Bogue yöntemine güvenmek yanlıştır (Taylor, 1964). Günümüzde matematiksel modeller kullanılarak yazılan özel algoritmalar ve ticari programlarla da ana ve tali fazların nicel analizi yapılabilmektedir (Feret and Feret, 1999).

### **2.5.3.1. Optik Mikroskopi**

Optik mikroskopi, klinker minerallerinin çoğunlukla nitel olarak karakterize edilmesinde kullanılan bir araçtır. Genellikle optik özelliklerin ince kesite oranla daha kolay belirlenebildiği parlak kesit örneklerinde dağlama işlemi yapıldıktan sonra faz ayırımı yapılabilir. Endüstride klinker kalite kontrolünde problemlerin çözümüne tanı olması amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin faz dağılımının heterojenliği, porozite, kristal şekli ve büyüklüğünde meydana gelen herhangi bir olumsuzluğu belirleyebilmede oldukça değerlidir. Çok sık rastlanmasa da nicel faz analizi nokta sayım yöntemiyle yapılabilmektedir (Bye,1999). Optik mikroskopi ayrıca, hammadde içeriğindeki bileşenlerin incelenmesi, döner fırında yanma problemlerinin tanımlanması, betonun kırılma analizi ile betondaki hava boşluklarının belirlenmesinde sıkça kullanılmaktadır (Ahmed, 1991).

### **2.5.3.2. X-Işınları Kırınımı Analizi (XRD)**

Klinkerin XRD yöntemi ile analizi yaklaşık 60 yıldır çimento çalışmalarında kullanılmakta, son 40 yıldır ise faz analizi yapılabilmektedir (Stutzman and Leigh, 2002). Klinker fazlarının XRD ile tanımlanması, optik mikroskopi yöntemini tamamlayıcı nitelikte olup özellikle fazların farklı polimorflarının optik mikroskopi ile belirlenemediği durumlarda oldukça yararlıdır. XRD verisi genellikle optik mikroskopi verileri ile alüminat fazı dışında uyumludur, bunun da nedeni ince boyutlu alüminat fazının optik mikroskopi ile kolay ayırt edilememesidir. XRD yönteminde karşılaşılan

en büyük sorun, bir kaç fazın piklerinin çakışıp büyük tek bir pik gibi görülmesidir. Bunun dışında XRD yöntemi çimentodan çok klinker örneklerine uygulanmaktadır, çünkü çimento örneklerinde, öğütme sırasında klinkere katılan alçı taşındaki kalsiyum sülfat ve hidratlarının pikleri XRD desenini daha karmaşık hale getirmektedir. Eğer çimento nemli hava ile temas etmiş, kalsiyum hidroksit ve kalsiyum karbonat bileşikleri oluşmuşsa bu bileşiklerin, alçı taşının içinde bulunan olası safsızlıkların, kalsit, kil ve kuvars minerallerinin de küçük pikleri desen üzerinde görülebilmekte, bu durum analizi zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla XRD yöntemi genellikle klinker üzerinde uygulanmakta, eğer çimento kullanılacaksa örneğin 500°C'ye ısıtılması gerekmektedir (Bye, 1999).

XRD yöntemiyle sadece nitel ve yarı nicel faz analizi yapılabilirken, son yıllarda geliştirilen farklı metotlarla nicel analiz yapılabilir hale gelmiştir. Bu yöntemlerden en çok kullanılan Rietveld metodunda, kristal yapı modellerine dayanan hesaplanmış referans kırınım deseni kullanılarak kırınım analizi standartlaştırılmaktadır. Gözlenen XRD deseni ile hesaplanan XRD profilinin karşılaştırılmasıyla faz miktarı açısından ilişki kurulmakta ve nicel analiz yapılabilir. Bu anlamda saf haldeki faz referans standardını oluşturabilmek oldukça zordur (Guirado et.al, 2000; Stutzman and Leigh, 2002; Lundgaard and Jøns, 2003).

### **2.5.3.3. Elektron Mikroskobu**

Transmisyon (TEM), tarama (SEM) ve x-ışınları mikro analiz yöntemleri başlıca elektron mikroskop yöntemlerindedir. Floresan bir ekran üzerinde elektron demeti yardımı ile görüntünün oluşturulduğu TEM yöntemi, alit kristali içindeki kusurların ya da belitteki ikizlenmelerin belirlenmesinde kullanılmıştır.

SEM yönteminde, orta dereceli enerjiye sahip (5-50 keV) ince elektron demeti bir dizi paralel hatlar halinde örneği taramakta ve örnekle etkileşen bu elektronlar, ikincil elektron emisyonları, geriye saçılmış elektronlar ve x-ışınlarını oluşturmaktadır. SEM,

TEM yöntemine göre daha hızlı ve üç boyutta daha detaylı bilgi vermektedir (Allen, 1981).

SEM yönteminde örnekler karbonla kaplanır ve özellikle optik yöntemlerden farklı olarak herhangi bir dağlama işlemi gerektirmez. Örneklerden elde edilen görüntülerde renk yoktur, fazlar sahip oldukları grilik seviyesine göre ayırt edilirler (Bye, 1999). En parlaktan koyuya doğru fazlar,  $C_4AF$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_2S$ , alçı ve reçine dolmuş gözenekler olarak sıralanır. Parlaklık ya da diğer bir deyişle elektronların geriye saçılma şiddeti, o fazın fiziksel yoğunluğu ve yaklaşık olarak içerdiği elementlerin ortalama atom ağırlıkları ile ilişkilidir (Bentz and Stutzman, 1994).

SEM yöntemi, klinker ve öğütülmüş çimento örneklerinin karakterizasyonu (Diamond and Olek, 1990; Bonen and Diamond, 1991), çimentonun hidratasyon derecesinin incelenmesi (Bentz and Stutzman, 1994), sertleşmiş çimento pastasında gözenek boyutu dağılımı (Diamond and Leemann, 1995) gibi çalışmalarda uygulanmıştır.

X-ışınları mikro analizinde, örneğin bileşim farklılıkları incelenebilmektedir. Bu yöntem; bir veya daha çok dalgaboylu ya da enerji dağıtımlı detektör kullanarak, elektron demetinin oluşturduğu x-ışınları spektrasında karakteristik elemental çizgi yoğunluklarının ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. X-ışınları mikro analizi, mikro yapının tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Çünkü örnek içindeki her elementin farklı şiddette yaydığı X-ışını mikro yapının nokta haritasını çıkarmakta, o elemente ait noktaların bulunma yoğunluğu elementin katı çözelti içinde dağılımı hakkında bilgi verebilmektedir (Bye, 1999).

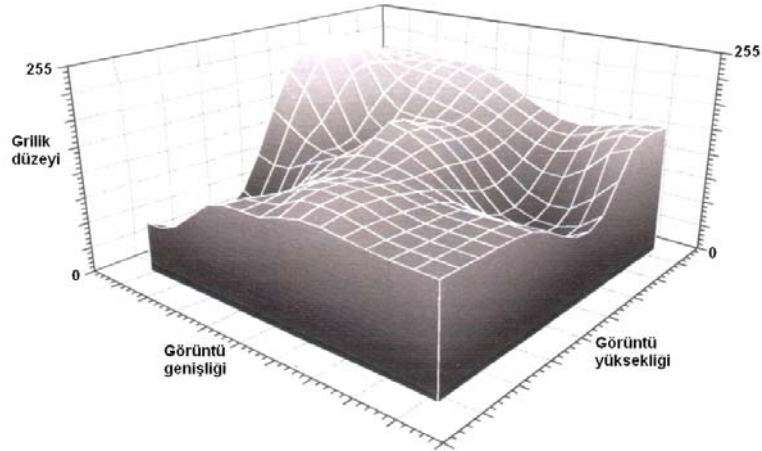
#### **2.5.3.4. Görüntü Analizi**

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte görüntü analizi otomatikleşmiş, çok kısa bir sürede geniş aralıkta veri üretebilir duruma gelmiştir. Bu analiz yöntemi her türlü görüntünün işlenebilme esnekliğinden dolayı farklı sektörlerde uygulama alanı bulmuştur. Görüntü analiz yönteminin malzeme, sağlık ve gıda alanlarındaki

uygulamalarının dışında, yerbilimleri alanında da kullanımı yaygınlaşmaktadır. Kayaç içindeki mineral oluşumları, dizilimleri, yapı doku özellikleri, mineral büyüklükleri, çatlaklar, cevher zenginleştirme ve serbestleşmenin kontrolü ve özellikle petrol birikimlerinin olduğu kayaçlardaki gözenekliliğin belirlenmesi gibi çalışmalar, sözü edilen yerbilimlerindeki kullanım alanlarına örnek gösterilebilir (Lindqvist and Åkesson, 2001). Görüntü analizi dört temel aşamada gerçekleşmektedir:

1. Görüntünün elde edilmesi (TV kamera vb.)
2. Görüntüdeki nesnelerin ayırt edilmesi (eşiklendirme, filtreleme)
3. Ölçümler (yazılım ve donanım algoritmaları)
4. Sonuç raporları (çıktı, bellekte kaydetme gibi)

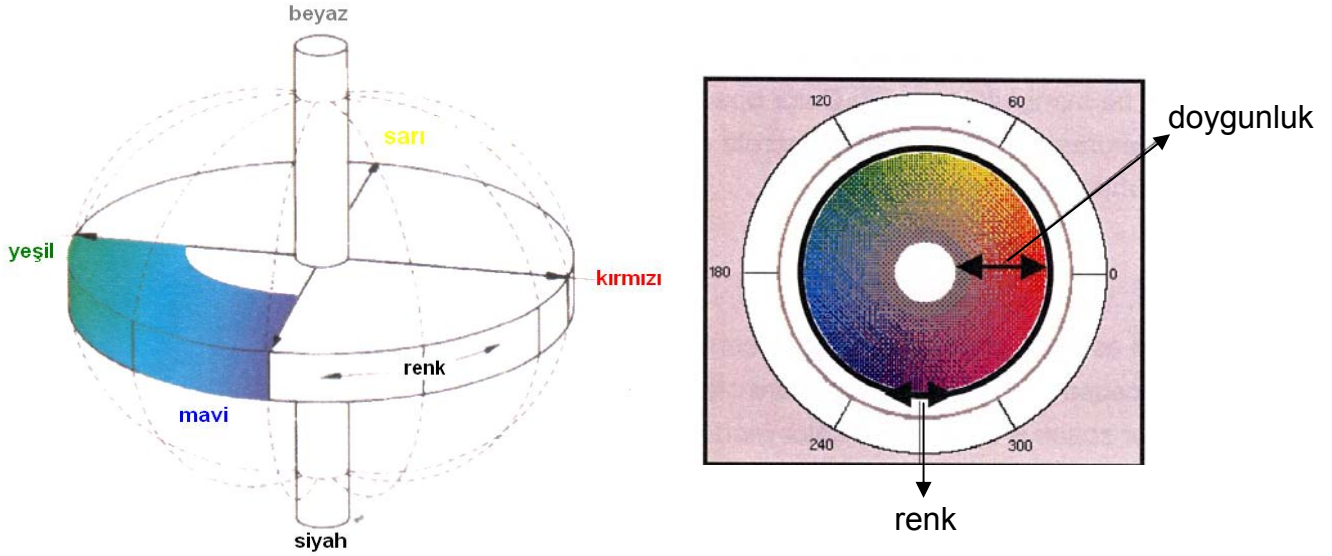
Görüntünün TV kamera yardımıyla elde edilmesinden sonra nesnelerin ayırt edilmesi gri ve renkli olmak üzere iki farklı eşiklendirme işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Görüntü mikrometre ile kalibre edildikten sonra çok küçük karelerden oluşan bir gride dönüştürülür ve her bir kareye dijital bir değeri olan piksel adı verilir. Gri eşiklendirme, genellikle beyazdan siyaha geçiş renklerini içeren görüntülerde uygulanır ve görüntünün parlaklık şiddetine göre işlem yapılır. Buna göre her pikselin 0-255 arası (0: siyah, 255: beyaz) bir grilik değeri vardır. Şekil 2.10'da gösterilen topoğrafik benzeşimin yardımıyla, her gri ton topoğrafik bir yükseltiye karşılık gelmekte; koyu özellikler vadi ve çukurlarla temsil edilirken, daha parlak özellikler tepe ve sırtlarla ifade edilmektedir.



Şekil 2.10. Görüntü analizinde gri eşiklendirme



Renkli eşiklendirmede ise nesnelere ana renk, rengin doygunluğu ve rengin parlaklığı gibi üç bileşene göre ayrıştırılırlar. Z ekseninde siyah ve beyaz, x ekseninde kırmızı ve yeşil, y ekseninde ise sarı ve mavinin yerleştiği Şekil 2.11'de gösterilen renk tekerinde, görüntüdeki renkli olan her pikselin bir karşılığı bulunmaktadır (Clemex User Guide, 2001).



Şekil 2.11. Görüntü analizinde renkli eşiklendirme

Otomatik görüntü analizi ile genellikle klinker örnekleri üzerinde mineral fazlarının ve mikro yapının belirlenmesine ilişkin pek çok çalışma bulunmaktadır (Anwander et.al, 1998; Ahmed, 1991; Jourlin et.al, 2001; Theisen, 1997). Ayrıca beton ve lifli-betonarme morfolojisinin belirlenmesinde görüntü analizinin kullanıldığı uygulamalara da rastlanmaktadır (Chermant et.al, 2001).

Görüntü analizinin çimento yerine genellikle klinker örnekleri üzerinde uygulanmasının nedeni işlemin daha kolay yapılabilir olmasıdır. Toz halindeki çimento örneğinin kimyasal karmaşıklığı ve ince tane boyunda olmasına bağlı olarak görüntü analizi ile mineral fazlarını belirlemek oldukça zordur. Çimento örnekleri ile yapılan çalışmalarda genellikle tane boyu dağılımı, şekil faktörü, tane çap ve çevre ölçümleri, gözeneklilik gibi morfolojik ölçümler yapılmıştır (Chermant et.al, 2001). Öğütülmüş

çimentoda analiz işleminin zorluğu sadece görüntü analizi için geçerli olmayıp benzer sıkıntılar diğer yöntemlerde de gözlenmektedir. Diamond ve Olek (1990); çimentoda çok az sayıda çalışma bulunduğunu ve bunun bir takım teknik zorluklardan kaynaklandığını belirtmekte, kendi çalışmalarında çimento tanelerinin karakterizasyonunu SEM yöntemi ile gerçekleştirirken; tanelerin alan, çevre, şekil faktörü gibi özelliklerinin yanısıra kimyasal bileşimlerini de görüntü analizi ile sayısallaştırmışlardır.

#### **2.5.4. Çimento Mineralleri ve Mikro Yapı Özellikleri**

Alit, belit, trikalsiyum aluminat ve ferrit gibi dört ana bileşenin yanında periklas, serbest kireç gibi ikincil fazlar ile gözenekler klinkerin karmaşık mineralojisini oluşturmakta, çimento söz konusu olduğunda az da olsa alçı taşı bu karmaşıklığı arttırmaktadır.

Alit ( $C_3S$ ), klinker mineralleri içinde mekanik dayanım kazandırma özelliği en fazla olan ve % 50-70 oranında bulunan kalsiyum silikattır. Döner fırında  $1250^{\circ}C$ 'den sonra klinker eriyiğinin kristalleşmesi ile meydana gelir. Genelde saf halde bulunmaz, kristalleşme sırasında  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  gibi yabancı iyonları bünyesine alır. Eğer kristalleşme hızlı gerçekleşmişse belitten alite dönüşüm sırasında küçük belit kristalleri alit içinde düğmeler şeklinde kalır. Hekzagonal kristal formunda olup altı farklı polimorfu mevcuttur. Alit kristallerinin büyüklüğü yaklaşık 8-60  $\mu m$ 'dir. Kristallerin büyüklüğü pişme sıcaklığı ve süresine, eriyik miktarı ve bileşimine ve klinker soğutma hızına bağlı olmaktadır. Alit, su ile hızlı tepkimeye girer, çimentonun hem erken hem de geç dayanımında etkindir, hidrasyon ısı yüksek (Altun, 1998, Felekoğlu vd., 2005; Kurdowski, 1991; Taylor, 1997; Bye, 1999).

Belit ( $C_2S$ ), hidrolik aktivitesi alit kadar yüksek olmayan, fakat geç yaştaki dayanımın gelişmesinde önemli bir rolü üstlenen kalsiyum silikattır. Klinker içinde bulunma oranı % 15-30 arasında belirtilse de işlem koşullarına göre belit daha az miktarda da oluşabilir. Döner fırında  $800^{\circ}C$ 'den sonra oluşmaya başlar,  $1250^{\circ}C$ 'den sonra

ortamdaki fazla CaO ile birleşerek aliti meydana getirir.  $\alpha$ ,  $\alpha_H$ ,  $\alpha_L$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  gibi beş farklı polimorfa sahiptir, genellikle endüstriyel klinkerde  $\alpha$  formlarına göre daha stabil olan  $\beta$ -C<sub>2</sub>S formu bulunmaktadır. Belit polimorflarının birbirlerine göre alit polimorflarına oranla hidrolik aktiviteleri, dolayısıyla dayanım değerleri daha değişkendir. Alite oranla bünyesinde daha fazla yabancı iyon barındırabilir, K, Na, Fe, Ba, Mg, [PO<sub>3</sub>]<sup>3-</sup>, [SO<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>, [FeO<sub>4</sub>]<sup>5-</sup> gibi bir çok iyon, Ca<sup>2+</sup> ve [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> iyonlarıyla yer değiştirebilir.  $\beta$ -C<sub>2</sub>S genellikle lamelli yapıda olup ikizlenme gösterir. Kristaller yuvarlak şekilli, 20-40  $\mu$ m boyutundadır. Belit klinker içinde çoğunlukla kümeler halinde bulunur. Böyle belit birikimleri hammadde karışımının iyi homojenize edilmemesinden ve içindeki iri tanelerden kaynaklanabilir. Bu iri taneler ve homojensizlik, CaO ve SiO<sub>2</sub> tanelerinin yeteri miktarda tepkimeye girememesine, dolayısıyla bir tarafta belit birikimlenmesine yol açarken serbest kireç miktarının da artmasına neden olur (Altun, 1998; Kurdowski, 1991; Taylor, 1997; Bye, 1999). Belit kümelenmesinin klinkerin öğütülebilirliği üzerinde etkileri olduğu bilinmekte, eğer belit küresel ve homojen bir dağılım gösteriyorsa klinkerin öğütülebilirliği daha kolay, kümelenme gösterdiği durumda ise öğütülebilirliğin daha zor olduğu ifade edilmektedir. Hatta bu belit kümelerinin öğütülebilirlik üzerinde klinkerdeki gözeneklerden daha önemli etkileri olduğu belirtilmektedir (Maki et.al, 1993).

Trikalsiyum alüminat (C<sub>3</sub>A), hidratasyon ısı en yüksek olan klinker mineralidir. Ferrit fazı ile birlikte ara faz veya matris fazı olarak adlandırılır. Kristal yapısı kübik, ortorombik veya monoklinik olabilir. Klinkerde alkali bileşenler bulunuyorsa saf C<sub>3</sub>A yerine alkali alüminat oluşur. Kristaller lamelli ve ince levha şeklinde olduğu için, kesitte genellikle uzun çıtalara halinde görülür (Altun, 1998, Felekoğlu vd., 2005; Taylor, 1997). Su ile çok hızlı tepkimeye girer, erken dayanım üzerinde etkisi olumludur. C<sub>3</sub>A, çimentoya alçı taşının eklenmesiyle işlenebilirliği sağlar. Portland çimentosu klinkerinde C<sub>3</sub>A'nın % 8-12 arasında olması istenir; bu değer üzerinde C<sub>3</sub>A bulunması çimentonun dayanımını azaltmaktadır (Öney, 1998).

Ferrit (C<sub>4</sub>AF), çimentonun rengini etkileyen bir bileşiktir. Belirli bir kimyasal bileşimi yoktur, Ca<sub>2</sub>(Al<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kristal dizisinde çoğunlukla C<sub>4</sub>AF formunda rastlanır.

Prizmatik ve dentritik kristal yapıdadır. Mikroskop altında yansımaları çok kuvvetli olup, dağlama işlemi yapılmadan diğer klinker minerallerinden kolaylıkla ayırt edilebilir (Altun, 1998; Taylor, 1997). Oldukça kısa zamanda kendi dayanımı maksimum seviyeye çıkmasına rağmen beton dayanımı üzerinde çok küçük bir etkisi olmaktadır (Patton, 1986). Optimum  $C_4AF$  miktarı %10-13'tür, ancak bunu aşan değerlerde çimentonun dayanımını azalttığı bilinir (Öney, 1998).

Serbest kireç, pişme sırasında, silis, alüminyum ve demir oksite bağlanmamış olan kireçtir. Pişme güçlüğü gösteren hammadde karışımı, farinin iri öğütülmesi, hammadde karışımında serbest silisin fazla bulunması, fazla miktarda kalsiyumlu bileşikler kullanılmış olması veya yavaş soğutmada tersinir tepkime ile alitin belite ve  $CaO$ 'e dönüşmesiyle ortaya çıkabilir. Klinkerde % 2.5'dan daha fazla miktarda bulunması, beton yapımında kullanılan çimentonun katılaşma veya sertleşme olayından sonra hacim değişikliğine sebep olabileceği için istenmez (Altun, 1998; Öney, 1998). Öte yandan serbest kirecin klinkerin öğütülebilirliğini kolaylaştırdığı belirtilmektedir (Hills, 1995).

Periklas, klinkerdeki  $MgO$  konsantrasyonu % 2'yi aştığı durumda gözlenmektedir. Yüksek yansımaya sahip karakteristik kübik kristaller halinde oluşur. Periklasın sertliğinden dolayı parlatma sırasında kabartma oluşur; mikroskop altında çevresinde beliren çizgilerden dolayı belirlenmesi kolaylaşır. Diğer klinker fazlarına göre daha karardır ve tek bir modifikasyonu vardır. Periklas kristalleri yaklaşık 1-16  $\mu m$  boyutunda olup büyük kristaller ve kümeler halinde bulduklarında betonda uzun vadede ortaya çıkabilecek tehlikeli magnezya genişmesine sebep olabilirler (Kurdowski, 1991; Altun, 1998).

Gözenekler (porozite), klinkerin sinterleşme koşulları hakkında bilgi verir. Parlak kesitte reçine ile dolanlar beyaz ya da gri renkte, reçine dolmayanlar ise siyah görünür. Büyük, uzun ve birbirleriyle birleşen gözenekler klinkerin ya kısa süreli ya da düşük sıcaklıkta sinterleştiğini ifade eder. Küçük ve yuvarlak gözenekler iyi sinterleşmenin işaretidir. Dayanım açısından gözeneklerin küçük ve homojen

dağılmış olmaları önemlidir, fakat klinkerin öğütülebilirliği açısından farklı yorumlar mevcuttur. Bazı çalışmalarda büyük ve birbirleriyle birleşen gözeneklerin iri öğütmede etkili olduğu söylenirken, diğerlerinde ise küçük gözeneklerin öğütülebilirliği kolaylaştırdığı ifade edilmektedir (Hills, 1995; Altun, 1998, Felekoğlu vd., 2005).

### **2.5.5. Mikro Yapı Özelliklerini Etkileyen İşlem Parametreleri**

Klinkerin mikro yapı özellikleri, klinkerin öğütülebilirliğini ve mekanik dayanımını doğrudan etkilemektedir. Mikro yapıda karşılaşılan bir olumsuzluk; klinkerin öğütülebilirliğini etkilemekte, öğütme ekipmanının işlem koşullarını zorlaştırmakta, bundan dolayı öğütme enerjisi artmakta ve dolayısıyla öğütme sonucu tane boyu dağılımının değişmesi ile üretilen çimentonun kalitesi bozulmaktadır.

Klinkerin mikro yapısında görülen değişiklikler, klinker üretim sürecindeki işlem ve teknolojik parametrelerle doğrudan ilişkili olup aşağıda tanımlanmaktadır:

*Hammadde öğütme inceliği ve homojenliği:* Klinkerin iyi bir şekilde pişmesini ve normal kristal büyüklüğüne sahip mineral oluşumunu sağlamak için hammadde karışımı 90-100 µm'dan daha iri tane olmayacak kadar ince öğütülmeli ve çok iyi karıştırılmalıdır. Özellikle iri kuvars ve kalker tanelerinin sorun yarattığı bilinmektedir. İri kuvars taneleri alit içeriğini azaltırken, belit mineralinin boyutunu ve belit kümelenme şeklini değiştirebilmektedir. İri kalker taneleri ise klinkerin serbest kireç içeriğini arttırmaktadır.

*Pişirme koşulları:* Döner fırın içindeki sıcaklık alit oluşumunu sağlayacak kadar olmalıdır; sinterleşme işleminin en az 1250°C' de gerçekleşmesi ve alitin hızla oluşabilmesi için, işlem 1450-1500°C' de yürütülür. Alit, belit ve serbest kireçten oluştuğu sırada tepkimenin hızı ve ortam sıcaklığı alit mineralinin kristal büyüklüğü ve kalitesini kontrol etmede oldukça önemlidir. Sıcaklık ne kadar yavaş yükselirse, belit fazı ile serbest kireç kristallerinin büyüklüğü artacak, birbirleriyle tepkimeye girmeleri yavaşlayacaktır. Yavaş seyreden tepkime sonucu alit kristalleri de büyüyecektir.

Benzer olarak fırında malzemenin kalış süresini uzatmak da alit kristallerinin büyüklüğünün artmasına neden olur, büyük alit kristalleri klinkerin öğütülebilirliğini olumsuz etkilemektedir.

*Klinker soğutma hızı:* Hammadde karışımı ne kadar iyi öğütülmüş ve karışmış, klinker ne kadar iyi pişmiş olsa da soğutma işlemi iyi yapılmadığı sürece klinker mikro yapısı olumsuz gelişebilmektedir. Soğutma işlemi ile ifade edilen soğutmanın hızıdır ve mineral fazlarının kristal büyüklüklerini değiştirebildiği gibi tepkimeler tersinir hale gelebilmekte hatta dört ana fazın dışında  $C_{12}A_7$  ve  $\alpha-C_2S$  gibi ek fazlar ortaya çıkabilmektedir (Hong et.al, 2001).

Hızlı soğutmanın klinkerin makro ve mikro yapısının oluşmasında olumlu etkisi vardır. Termal şok klinker içinde iki tipte çatlak oluşumunu geliştirir:

1. Taneleri boylu boyunca kesen, geniş, radyal, makro çatlaklar
2. Temelde alit kristalleri içinde oluşan, ara fazda daha az gözlenen mikro çatlaklar.

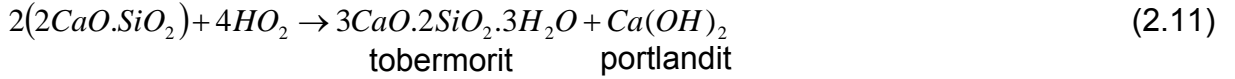
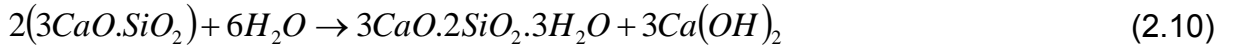
Dolayısıyla termal şokun yoğunluğu ne kadar fazla olursa makroskopik çatlak oluşumu o kadar fazla olur. Mikro çatlak içeren klinker ise daha kolay öğütülebilmektedir (Sas, 2000).

*Yakıt tipi ve alternatif olarak kullanılan atık malzemelerin etkisi:* Döner fırında yakıt olarak kömür, doğal gaz, yağ tipi yakıtlar ile lastik gibi alternatif malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerle gelen ikincil ve eser elementler mikroyapının özellikle sertliğini etkileyerek öğütülebilirliğini de değiştirmektedir. Örneğin kömür kullanıldığında, klinker bünyesine büyük oranda  $SO_3$  girmekte ve  $[SO_4]^{2-}$  iyonu alit ve belit kristal kafesinde bazı kusurlara yol açarak fazların sertliklerini azaltarak öğütmeyi kolaylaştırmaktadır (Sas et.al, 2000; Öney, 1998).

## 2.6. Çimentonun Hidratasyonu

Çimento ve suyun birleşerek kimyasal tepkimelerin yer alması olayına “çimentonun hidratasyonu” denilmektedir. Kimyasal olarak Portland çimentosunun hidratasyonu; her bir klinker mineralinin, kalsiyum sülfatın ve suyun değişik hızlarda ve birbirlerini etkileyen bir dizi karmaşık tepkimelerinden oluşmaktadır.

Portland çimentosu çok bileşenli bir sistem olduğundan, hidratasyonu da oldukça karmaşık bir işlem olup aynı anda gerçekleşen ayrı ayrı kimyasal tepkimelerin toplam sonucudur. Buna göre klinker ana bileşenlerden alit ve belitin suyla birleştiklerinde oluşturdukları kimyasal tepkimeler basitçe şu şekilde açıklanabilir:



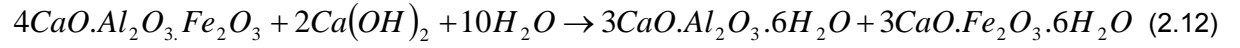
Kalsiyum silikatlar ve su tepkimeye girerek kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) denilen amorf veya amorfa yakın bir jel yapıda ürün ile kristal yapıya sahip kalsiyum hidroksit meydana getirirler. C-S-H fazı  $CaO_x.SiO_2.H_2O_y$  gibi genel bir formüle sahip olup x ve y geniş aralıkta değişmektedir. Tobermorit ( $3CaO.SiO_2.H_2O$ ),  $C_3S$  ve  $C_2S$ 'in hidratasyonu sonucu oluşan ve çimentoya mekanik dayanım özelliği kazandıran bir bileşiktir. İç yapısı değişmeden su soğurup, su kaybedebilir, dolayısı ile hacim değiştirebilir. Betonun suda şişmesi ve havada erken priz alması bu özelliği ile açıklanabilir (Odler, 1998).

Trikalsiyum aluminat ( $C_3A$ ) kendi başına suyla çok çabuk hidratasyona uğrar, sonuç olarak da muhtemelen kübik kristalli  $C_3AH_6$  meydana gelmektedir.  $C_3A$  ile suyun birleşmesi çimentoda “ani sertleşme” yaratarak taze betonun kullanımını ve betonun bağlayıcılık kazanabilmesini engeller. Bu durumu önlemek için klinker bir miktar alçı taşı ile birlikte öğütülmektedir. Böylece  $C_3A$ , su ve alçı ayrı bir reaksiyona girerek hekzagonal kristal yapıya sahip  $C_6AS^-H_{32}$  (etrijit) ve plaka şeklinde kristal yapıya sahip  $C_4AS^-H_{12}$  (monosülfoaluminat)'nin oluşmasına yol açar. Özellikle  $C_6AS^-H_{32}$

fazla miktarda bulunduğunda betonda genleşme yaratarak zararlı hacim değişikliklerine neden olur (Erdoğan, 1995).

Tetra kalsiyum alüminoferrit ise çok daha yavaş tepkimeye girer ve C<sub>3</sub>A ile birlikte (uygun miktarda alçı kullanıldığında) betonun yapısını ve dayanımını ilk zamanlarda bir miktar etkiler.

Alçı ve su, C<sub>4</sub>AF ile de tepkimelere girerek muhtemelen,

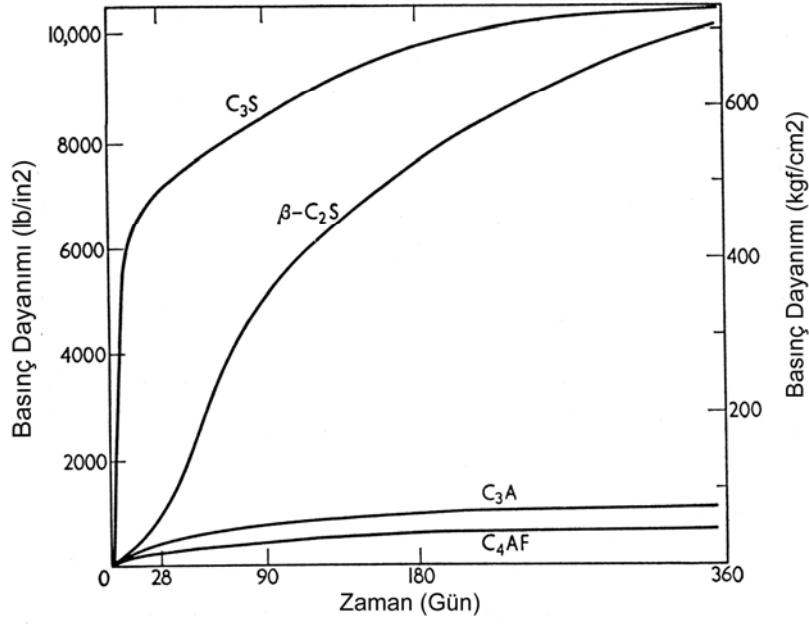


bileşiklerini oluşturur (Brown and Bye, 1989).

Hidratasyon tepkimelerini başlatan suyun önemli bir kısmı fiziksel nedenler için gereklidir. Suyun bir kısmı hidratasyon ürünlerinin ıslanabilmesinde ve yeni oluşan hidratasyon ürünleri arasındaki boşlukların doldurulmasında tüketilmektedir. Kimyasal olarak bağlanan su ile, ıslanma ve boşluk doldurma gibi fiziksel olarak tüketilen su, çimentonun yüzey alanı ile tane boyu dağılımına bağlıdır. Fiziksel anlamda harcanan su sadece çimento tanelerinin birbirleri üzerinde standart bir kıvam yoğunluğunda hareket edebilmelerini sağlamak içindir (Kuhlmann et.al, 1985).

Klinker minerallerinin hidratasyon ve dayanım karakteristikleri oldukça karmaşık olup birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Klinker minerallerinin hidratasyon davranımı ve dayanım gelişmesini daha iyi anlayabilmek için genelde çalışmalar saf klinker mineralleri üzerinde yapılmıştır (Locher and Odler, 1989), fakat normal koşullarda bir çok katkının kullanıldığı günümüzde saf minerallerin yanında pek çok yabancı iyonların varlığı bilinmekte ve bu durum hidratasyon sürecinin anlaşılabilirliğini zorlaştırmaktadır. Hidratasyon derecesinin bir fonksiyonu olarak klinker minerallerinin dayanıma katkıları C<sub>3</sub>S>C<sub>2</sub>S>C<sub>4</sub>AF>C<sub>3</sub>A şeklinde sıralanabilir (Beaudoin and Ramachandran, 1992). Taylor (1964) ise saf minerallerin dayanım sıralamasını farklı şekilde grafikleştirmiştir (Şekil 2.12).





Şekil 2.12. Saf klinker minerallerinin zamana bağlı basınç dayanımları (Taylor, 1964)

## 2.7. Çimento'nun Servis Özellikleri

Çimento'nun kimyasal, mineralojik ve fiziksel özellikleri, çimento hidrasyon hızını ve hidrolik aktivitesini etkilemekte ve dolayısıyla çimento kalitesini ölçebilmek için bir takım test yöntemleri uygulanmaktadır. Basınç dayanımı, priz süresi, hacimsel sabitlik, su ihtiyacı, incelik, hidrasyon ısı, kızdırma kaybı olarak adlandırılan servis özelliklerinin belirlendiği test yöntemleri TS EN 197-1 standardında tanımlanmaktadır.

### 2.7.1. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı çimento'nun en önemli özelliği olup beton kalitesi hakkında fikir vermekte, beton bileşimi ve yapımı ile ilgili parametreler değişmediği takdirde çimento dayanımı arttıkça beton dayanımı da artmaktadır (Yeğinobalı, 2005). Standart basınç dayanımı "Rilem Cembureau" denilen bir yöntemle belirlenmektedir.

Erken dayanım için 2 veya 7 günlük yaşlarda, standart dayanım için 28 günlük yaşta elde edilen değerler Çizelge 2.4'de belirtilen karakteristik değerlerden daha az olmamalıdır.

Çizelge 2.4. Gerekli mekanik ve fiziksel özellikler için karakteristik değerler (TS EN 197-1, 2002)

Dayanım sınıfı	Basınç dayanımı (MPa)			Priz başlama süresi (dakika)	Genleşme (mm)
	Erken dayanım		Standart dayanım		
	2 günlük	7 günlük	28 günlük		
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75
32.5 R	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 52.5	-	≥ 45
42.5 R	≥ 20.0	-	-	-	≤ 10
52.5 N	≥ 20.0	-	-	-	-
52.5 R	≥ 30.0	-	-	-	-

32.5, 42.5 ve 52.5 olmak üzere üç standart dayanım sınıfı belirlenmiştir. Bu dayanım sınıfları TS EN 196-1 (2002)'ye göre belirlenen ve MPa olarak ifade edilen minimum 28 günlük basınç dayanım değerleridir. Ayrıca her standart dayanım sınıfı için iki erken dayanım sınıfı tanımlanmıştır. Bu amaçla N ve R sembolleri kullanılmakta; N, normal erken dayanım sınıfını, R ise yüksek erken dayanım sınıfını ifade etmektedir (TS EN 197-1, 2002).

### 2.7.2. Priz Süresi

Çimentonun suyla birleştirildiği zaman ile, çimento hamurunun plastikliğini kaybederek katılaşmaya başladığı zaman arasında geçen süre “prizin başlama süresi” olarak tanımlanmaktadır. Priz alma aşağıda belirtilen iki temel adımda açıklanabilir:

1. İlk aşama, su ile çimentonun karıştırılmasını takiben ilk bir kaç dakika içinde çimento tanelerinin koagülasyonu ve koagüle olmuş yapının eşzamanlı gelişen hidrat oluşumuyla sertleşmesidir. Koagülasyon aşamasında oluşan yapının mekanik olarak geri dönüşümlü olduğu ispatlanmıştır.
2. İkinci aşama olan sertleşme, tanelerin birbirlerine değdikleri temas bölgelerinde hidratların oluşmasıyla meydana gelir. Bu aşamada çimento hamurunun kohezyonundaki artış, oluşan hidrat jellerinin miktarı ile doğru orantılı olup sertleşen yapının artık geri dönüşümünü imkansız hale getirir (Jiang et.al, 1995).

Prizin başlama ve sona erme sürelerinin belirlenmesi Vicat aleti yardımıyla yapılır. Dayanım sınıfları için karakteristik değerler Çizelge 2.4'de verilmiştir.

### **2.7.3. Hacim Genleşmesi**

Hacim genleşmesi, sertleşmiş çimento pastasının prizlenmeden sonra hacmini olduğu gibi koruyup koruyamadığı ile ilişkilidir. Hacimsel genleşme deneyi, aşırı miktarda pişme zorluğu gösteren serbest kireç ve/veya periklasın hidratasyonu ile sonradan ortaya çıkabilecek genleşme riskinin değerlendirilmesi amacıyla yapılır (Kosmatka et.al, 1995). Buna göre çimentonun toplam genleşmesi 10 mm'yi geçmemelidir (Çizelge 2.4).

### **2.7.4. Standart Kıvam (Su İhtiyacı)**

Standart kıvamdaki çimento pastası, standart sondanın içine girmesine karşı belirli bir direnç gösterir. Böyle bir pasta için gereken su miktarı, farklı su miktarları ile hazırlanan pastaların içine sondanın girmesi denemeleri ile tayin edilir. Değişik miktarlarda su içeren pastalarla, sonda ve kalıbın altındaki taban plakası arasındaki mesafe ( $6\pm 1$ ) mm oluncaya kadar tekrar edilir. Standart kıvama gelen pastanın su miktarı normal kıvam için gerekli su miktarı olarak kaydedilir (TS EN 196-03, 2002).

### **2.7.5. İncelik**

Çimentonun hidratasyon hızını belirleyen en önemli faktörlerdendir. Çimento inceliği arttıkça hidratasyon tepkimelerinin hızı artar, dolayısıyla dayanım daha hızlı gelişir. İnceliğin artması özellikle 2. ve 7. günlerdeki erken dayanımı etkilemektedir (Kosmatka et.al, 1995).

İncelik; yüzey alanı ya da tane boyu dağılımı terimleriyle ifade edilmektedir. 42.5 N dayanım sınıfındaki bir Portland çimentosunun yüzey alanı genellikle 330-380 m<sup>2</sup>/kg değerleri arasındadır. Yüzey alanı, hava geçirgenliği prensibine dayanan Blaine yöntemi ile gaz adsorbsiyonu prensibine dayanan BET yöntemleriyle belirlenir. İnceliğin tane boyu olarak ifadesinde ise ya elek bakiyesi ya da tane boyu dağılımı kullanılır. Elek bakiyesinin tayininde 90 µm'luk test eleği kullanılır (TS EN 196-6, 2000). Tane boyu dağılımı ise sedimentasyon, Coulter Counter, gibi yöntemlerle belirlenebilse de elek analizi ve ince tane boyları için lazer kırınımı yöntemi daha çok tercih edilmektedir (Bye, 1999). Çimentonun tane boyu dağılımı yaygın olarak Rosin Rammler ve Gates-Gaudin-Schuhmann eşitlikleriyle ifade edilmektedir. Çimento tane boyu dağılımı, tane şekli ve yüzey alanı standart kıvam için gerekli olan su miktarını da etkilemektedir.

### **2.7.6. Hidratasyon Isısı**

Çimento ve suyun birleşmesiyle başlayan katılaşma ve sertleşme sürecinde meydana gelen kimyasal tepkimeler ısı açığa çıkaran türdendir. Çimento ve suyun birleştiği ilk bir kaç dakikada hidratasyon ısısının açığa çıkma hızı çok yüksektir. Bunu takip eden bir kaç saatlik dönemde bir durgunluk yaşanır ve priz (katılaşmanın) başlaması ile ısı açığa çıkma hızı tekrar artar ve priz dönemi sonunda (en çok 10 saat) çok yüksektir. Daha sonra hidratasyon ısısı gittikçe azalan bir hızda artmaya devam eder (Odler, 1998).

Portland çimentolarının hidratasyon ısısı yaklaşık 90-110 cal/g arasındadır. Hidratasyon hızını ve hidratasyon ısısının açığa çıkma hızını; çimentodaki ana bileşenlerin yüzdeleri, çimentonun inceliği ve hidratasyonun olduğu sıcaklık koşulları önemli ölçüde etkilemektedir (Erdoğan, 1995). Açığa çıkan ısının beton yapı içindeki miktarı ve yayılma hızı, iklim koşullarına ve yapının tipine bağlı olarak beton içindeki gerilmelere farklı şekilde yansiyabilmektedir.

### **2.7.7. Kızdırma Kaybı**

Uzun süre depolanmış, rutubete ve havaya maruz kalmış çimento başta içindeki serbest CaO ve MgO olmak üzere kısmen hidrate olur, daha sonra havanın etkisiyle karbonatlaşır. Çimentonun bayatlamaya başladığını gösteren bu tepkimelerin ne ölçüde yer aldığını anlamak için çimento 950-1000°C arasında ısıtılır ve ağırlık kaybı yüzde olarak belirlenir. Bu değer TS EN 197-1 (2002) standardında belirtilen % 5'den fazla olmamalıdır.

### **2.8. Çimento Servis Özelliklerini Etkileyen Parametreler**

Çimentonun kalitesi hakkında fikir veren servis özellikleri, kimyasal ve mineralojik bileşimden, tane boyu dağılımı ve incelik gibi diğer fiziksel parametrelerden etkilenmektedir. Bir çok parametrenin bir arada etki ettiği bu karmaşık sistemde, istenen çimento kalitesine ulaşabilmek için her bir parametrenin planlı ve sistematik kontrolü gerekmektedir (Brüggemann and Brentrup, 1990). Özellikle dayanım gelişmesi, su ihtiyacı, priz süresi, hidratasyon ısısı gibi önemli kalite özelliklerini etkileyen tane boyu ve dağılımı, yüzey alanı, mineraloji gibi bir çok parametreyi ayrı ayrı ya da bir arada inceleyen çalışmalar literatürde mevcuttur (Frigione and Marra, 1976; Zhang and Napier-Munn, 1995; Tsivilis et.al, 1990; Odler and Chen, 1995; Schnatz et.al, 1995; Sprung et.al, 1985).

### 2.8.1. Kimyasal Bileşim

Çimentonun kimyasal bileşimi, mineral faz oluşumunu etkileyerek, dayanım, priz süresi, hidratasyon ısı gibi önemli servis özelliklerini değiştirebilmektedir. Kimyasal bileşimdeki % 1'lik küçük bir değişim öncelikle mineral fazının miktarını değiştirir, faz miktarı da servis özelliklerini etkiler. Ana mineral fazları içinde özellikle dayanıma en fazla  $C_3S$  ve  $C_2S$ 'in katkısı olduğu bilinmektedir.  $C_3A$  ve  $C_4AF$ 'nin ise dayanıma etkileri azdır; belli bir miktardan daha fazla bulduklarında ise dayanım üzerinde olumsuz etki yaratabilirler. Literatürde mineral fazlarının kimyasal bileşim yüzdeleri ile dayanım arasında matematiksel ilişkiler geliştirilmeye çalışıldığı rapor edilmektedir (Ergin, 1998). Fakat dayanımın, kimyasal bileşimden olduğu kadar mineralojik ve morfolojik yapıdan da oldukça etkilendiği gerçeği göz önüne alınmamıştır.

$C_3A$  miktarındaki artış priz süresini kısaltmaktadır. Alçı taşı kullanılmadığı durumda çimentonun su ile hidratasyon tepkimesi  $C_3A$  nedeniyle çok hızlı olur, işlenebilirliği, taşınması ve kalıp tutması gibi özellikler olumsuz etkilenir. Hidratasyon ısısının açığa çıkmasındaki en büyük katkı yine  $C_3A$  ile  $C_3S$  mineral fazlarından kaynaklanmaktadır.

Serbest kireç ve periklasın miktarı fazla olduğunda dayanım daha uzun süreçte etkilenir, zararlı hacimsel genleşmeler yaratıp, beton yapısında çatlak ve kırık oluşmasına neden olabilir. Alkali ( $K_2O$  ve  $Na_2O$ ) miktarı ise, beton yapımında kullanılan agregadaki silis ile alkalinin etkileşip tehlikeli genleşmeye neden olan alkali-silika tepkimelerine yol açması sebebiyle oldukça önemlidir.

### 2.8.2. Mineralojik Yapı

Mineral fazlarının miktarları; o minerallerin iç yapıları, kristal büyüklükleri ve dağılımları ile birlikte yorumlandığında anlam kazanmaktadır. Örneğin kimyasal analizle belirlenen serbest  $CaO$ , kalite değerlendirmesinde gerekli, fakat yeterli değildir. Çünkü serbest  $CaO$ ' nun kristal boyutu ve dağılımı, hidratasyon sırasında oluşan portlanditin ( $Ca(OH)_2$ ) ne oranda hacimsel genleşme yaratacağını

etkiler. CaO'nun hidratasyonu kireç doygunluk faktörü yüksek klinkerlerde 28. gün dayanımını olumsuz etkilemektedir. Benzer şekilde, MgO yüzdesi kimyasal analiz olarak standartlarda belirtilen değerlerde olsa da, kristallerin betonda hacimsel genişmeye sebep olmamaları için kümelenme yerine homojen şekilde dağılmaları gerekmektedir. Alit ve belit kristallerinin büyüklüğü klinkerin öğütülebilirliğini, dolayısıyla çimentonun tane boyu dağılımı ile yüzey alanını etkilemektedir. Çimentonun tane boyu dağılımı ve yüzey alanı ise su ihtiyacını, priz süresini ve dayanımı doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir. 20 µm'dan küçük alit kristallerinin klinkerin öğütülmesini kolaylaştırdığı ve erken dayanıma katkıda bulunduğu belirtilmektedir (Altun and Ölmez, 2001). Hatta çimento tane boyu dağılımının yanı sıra her bir klinker mineralinin de tane boyu dağılımının önemli olabileceği belirtilmektedir (Škvára et.al, 1981). Diğer bir çalışmada, alit ve belit kristal büyüklüğü, morfolojileri, kümelenmeleri gibi mikroyapı parametrelerinin değişik yaşlardaki çimento dayanımına ne oranda etki ettiği belirlenmeye çalışılmıştır. Her bir parametre ayrı ayrı incelendiği için düşük korelasyon gösteren sonuçlar elde edilmiştir (Hargave et.al, 1985). Dolayısıyla bu durum; çimento dayanımına bir çok parametrenin bir arada etki ettiğinin ifadesidir.

### **2.8.3. Fiziksel Özellikler**

Çimento servis özelliklerini etkileyen önemli fiziksel parametreler olarak tane şekli, tane boyu dağılımı ve dağılım eğrisinin eğimi, yüzey alanı, su-çimento oranı ve porozite sayılabilir.

Tane şeklinin çimento hidratasyonu ve dayanımı üzerindeki etkileri karmaşıktır. Poligon gibi düzensiz şekilli tanelerde, taneler birbirine kolay temas ederler ancak, bu taneler arasındaki sürtünme direnci büyük olduğu için çimento pastasının akışkanlığı azalır. Belli bir akışkanlık elde edebilmek için daha çok su eklemek gerekir ki eklenen fazla su dayanımı olumsuz etkiler. Çizelge 2.5'de, farklı küresellik derecelerine sahip taneler içeren örneklerde gerçekleştirilen dayanım ve standart kıvam test sonuçları

verilmektedir. Buna göre yuvarlağa yakın şekilli çimento tanelerinin dayanıma daha olumlu katkıları olduğu söylenebilir (Qingyun, 2005).

Çizelge 2.5. Tane şekli ile bazı çimento servis özellikleri arasındaki ilişki

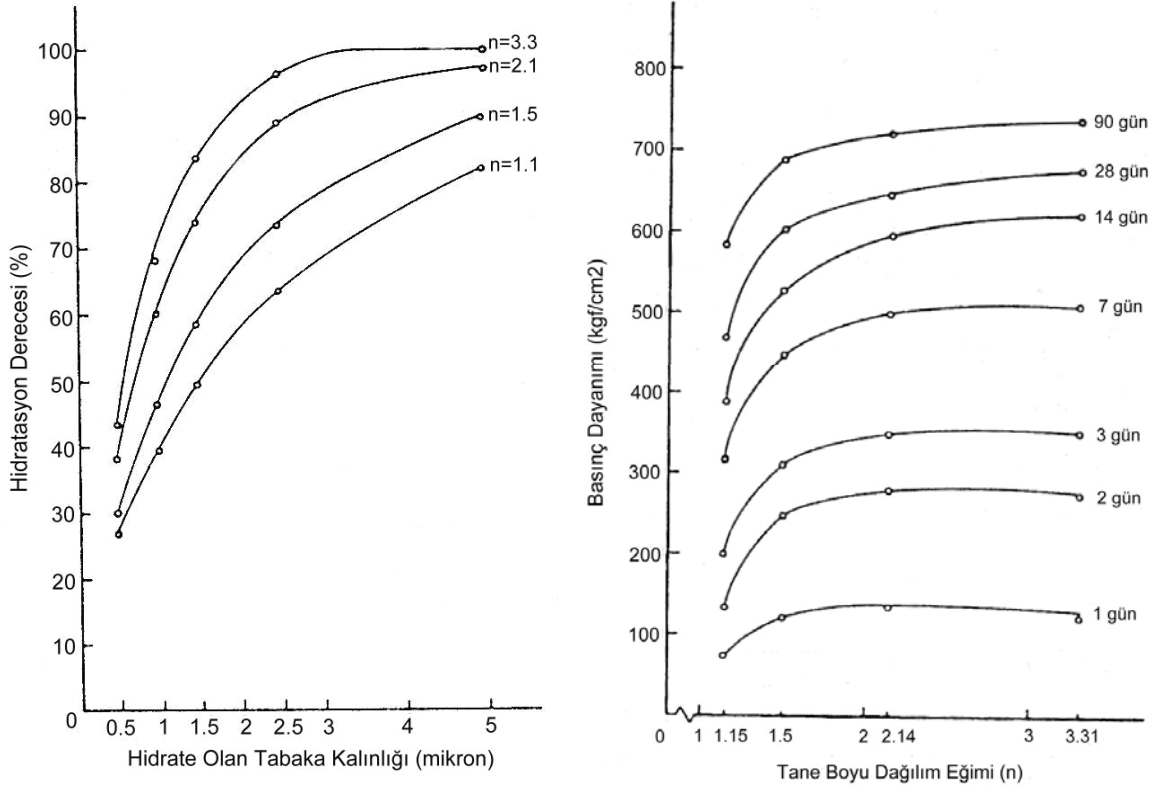
Örnek no	Özgül yüzey alanı, m <sup>2</sup> /kg	Küresellik derecesi, %	Standart kıvam, %	Basınç dayanımı, MPa	
				3. gün	28. gün
1	345	47	30.4	35.2	59.8
2	348	73	36.7	34.1	68.4

Çimentonun hidratasyon hızını, su ihtiyacını, priz süresini, erken ve geç dayanımını etkileyen en önemli parametre tane boyu dağılımıdır. En iyi sonuçların 3-30 µm tane boyu dağılımına sahip örneklerde alındığı, özellikle 60 µm'dan iri tanelerin dayanıma herhangi bir katkıda bulunmayıp sadece "dolgu etkisi" yarattıkları bildirilmektedir (Qingyun, 2005; Škvára et.al, 1981). Tsivilis vd. (1990), istenen ürün kalitesine ulaşabilmek için çimentonun dik tane boyu dağılım eğimine sahip olması ve bu dağılımda 3-32 µm fraksiyonunun % 65'den fazla, 3 µm'dan ince tanelerin yaklaşık %10'dan az ve özgül yüzey alanının 2500-3000 Blaine olması gerektiğini bildirmekte, hatta en etkili fraksiyonun 16-24 µm olduğunu iddia etmektedirler. Böyle seçimli tane boyu dağılımı oluşturacak yeni öğütme ekipmanlarının tasarım çalışması da yapılmıştır (Tsivilis et.al, 1987). Tane boyu dağılımındaki 3-5 µm'dan ince tanelerin miktarındaki artış, erken dayanımda etkin olsa da prizlenme, istenmeyen hacimsel değişiklikler, reolojik özelliklerde bozukluklar gibi problemleri de beraberinde getirmekte ve üstelik bu ince fraksiyonun geç dayanıma bir katkısı olmamaktadır (Škvára et.al, 1981).

Tane boyu dağılımının dar ya da geniş olması da çimento özelliklerini etkilemektedir. Geniş tane boyu dağılımı, su ihtiyacının az ve paketleme yoğunluğunun yüksek olması ile avantajlı olurken, dar tane boyu dağılımında hidratasyon hızı daha yüksektir. RRB dağılım eğrisi eğiminin (*n*) 1'e eşit olduğu durumdaki tane boyu dağılımının en uygun dağılım olduğu şeklinde açıklamalar mevcuttur (Aiqin et.al,



1999). Tane boyu dağılımının eğimi ( $n$ ), arttıkça dayanımın arttığı görülmüş, bunun da dar tane boyu dağılımı gereği hidratasyon hızının artması nedeniyle olduğu belirtilmiştir (Frigione and Marra, 1976; Kuhlmann et.al, 1985). Şekil 2.13'de dağılım eğrisi ile hidratasyon derecesi ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiler gösterilmektedir. Buna göre basınç dayanımı ile  $n$  değeri arasında doğrusal bir ilişki yoktur,  $n=2$  değerine kadar dayanım artış gösterirken,  $n$  değeri 2'yi aştığında, diğer bir deyişle daha dik dağılımlarda dayanımda belirgin değişimler olmamaktadır (Frigione and Marra, 1976).

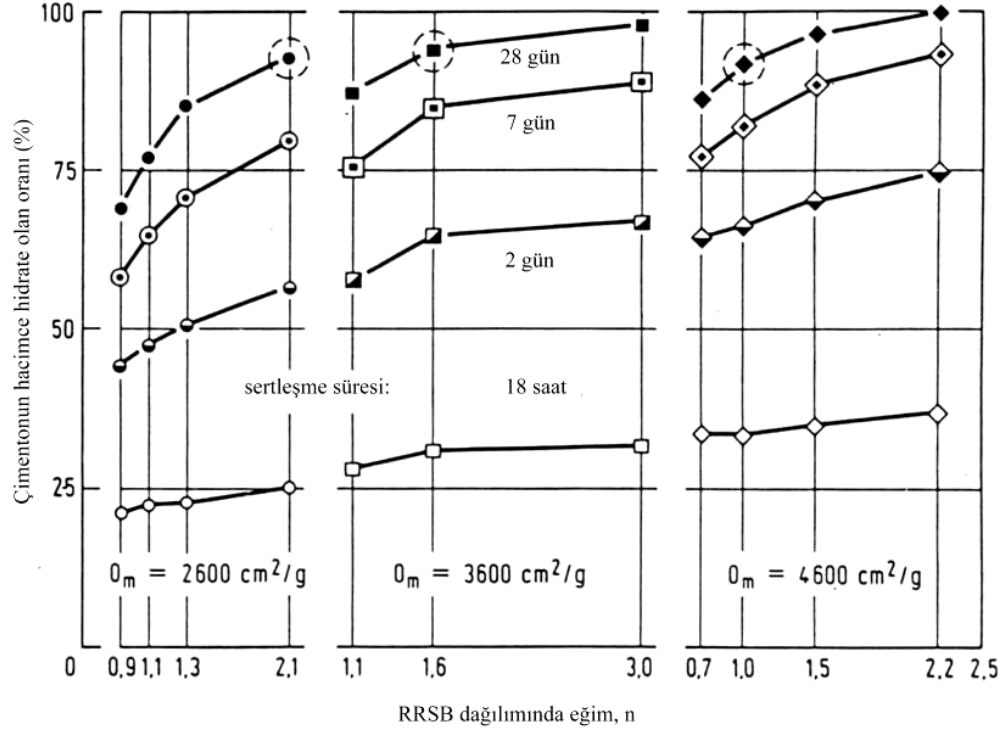


Şekil 2.13. Tane boyu dağılım eğimi ( $n$ ) ile hidratasyon derecesi ve dayanım ilişkisi

Yüzey alanı ile servis özelliklerini ilişkilendirmek ancak tane boyu dağılımı ile birlikte düşünüldüğünde anlamlı olacaktır. Hatta artık dayanım gelişmesi Blaine yüzey alanı yerine tane boyu dağılımı ile ifade edilmektedir. İnceliğin dayanıma katkısı erken

yaşlarda daha kuvvetli iken, geç dayanımda kimyasal ve mineralojik özellikler daha etkindir (Tsvilis and Parissakis, 1995; Odler, 1998).

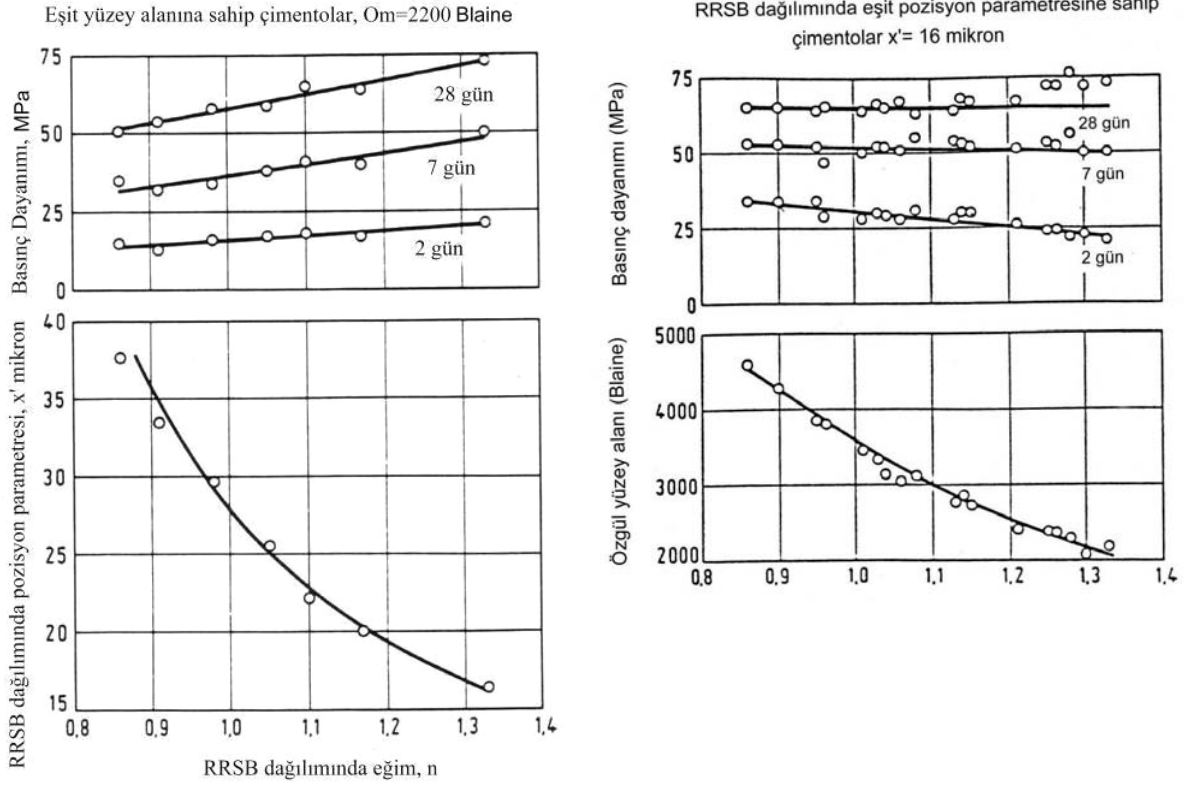
Kuhlmann et.al (1985), tane boyu dağılım eğimi, yüzey alanı ve Rosin-Rammler dağılımında % 63.2 elek altı değerine karşı gelen boy (pozisyon parametresi) ile dayanım arasındaki ilişkileri incelemiştir. Buna göre Şekil 2.14'de, 28 gün sonunda  $4600 \text{ cm}^2/\text{g}$  yüzey alanı ve  $n=1$  dağılım eğiminde elde edilen yaklaşık % 90'lık hidratasyon derecesinin, yüzey alanı  $2600 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $n=2.1$  dağılım eğimindeki malzemede de elde edilebildiği görülmektedir. Dolayısıyla çok ince tane boyuna kadar öğütme yapmadan, tane boyu dağılımı dikleştirilerek aynı dayanım değerine ulaşmak mümkündür.



Şekil 2.14. Dağılım eğimi, yüzey alanı ve dayanım ilişkisi

Şekil 2.15a'da, eşit yüzey alanına sahip çimento örneklerinde ancak dağılım eğimi dikleştirildiğinde dayanımın arttığı görülmektedir. Şekil 2.15b'de ise, eşit pozisyon parametresine sahip örneklerde dağılım dikleştirilince 28 günlük dayanımın fazla etkilenmediği görülmektedir. Çünkü pozisyon parametresi % 63.2'lik bir kısmı temsil

etmekte ve çimentolarda bu yüzde değeri 15-32  $\mu\text{m}$  arasına düşmektedir ve dayanımın gelişmesini bu fraksiyon belirler.



Şekil 2.15. (a) ve (b) Pozisyon parametresi, eğim, yüzey alanı ve dayanım ilişkisi

Dayanımın gelişmesinde su-çimento oranı ve porozite de önemli rol oynamaktadır. Su-çimento oranı hidrasyon sürecini ve hidrasyon ürünlerinin bileşimlerini etkileyebilmektedir. Düşük su-çimento oranında hidrasyon yavaşlamakta ve yüksek kalsiyum-silikat oranlı hidrate ürünler oluşmaktadır. Porozite ise, su-çimento oranı ya da hidrasyon derecesi ne olursa olsun, dayanımın gelişmesinde belirleyicidir. Genel eğilim porozite arttıkça dayanımın düşmesi şeklindedir (Rößler and Odler, 1985).

### 3. MALZEME

Çalışmalarda ağırlıklı olarak OYAK Bolu Çimento Fabrikası'nın 1 No'lu öğütme devresinde yer alan YBMD'nin, alçı taşının devreye beslenmediği durumdaki besleme ve ürün noktalarından (klinker), ve alçı taşı bandından alınan örnekler kullanılmıştır.

Ayrıca, Baştaş Çimento Sanayi A.Ş.'den alınan PÇ 42.5 R ile SET Ankara Çimento Fabrikası'nın açık ve kapalı öğütme devrelerinden alınan PÇ 42.5 örnekleri de kullanılmıştır.

#### 3.1. Örneklerin Hazırlanması

Deneysel çalışmada YBMD ve bilyalı değirmen gibi iki farklı öğütme mekanizmasının çimento servis özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş; dolayısıyla bu iki mekanizmayı temsil eden ürün örnekleri hazırlanmıştır. YBMD ürün örneği, OYAK Bolu Çimento Fabrikası'nın 1 No'lu öğütme devresinde yer alan YBMD çıkışından alınmış, bilyalı değirmen ürünü ise YBMD beslemesi olan klinkerin laboratuvar ölçekli bilyalı değirmende öğütülmesi ile oluşturulmuştur. Polysius model, 1400 mm çaplı ve 150 bar basıncında çalışan YBMD'den alınan kek halindeki ürün dağıtıldıktan sonra örnek hazırlama işlemine geçilmiştir. Hem YBMD, hem de bilyalı değirmen ürünlerinin sadece klinker öğütülerek hazırlanmasının nedeni mineralojik analiz sırasında alçı taşından kaynaklanabilecek karmaşıklığı bertaraf etmektir.

Bilyalı değirmen ürünü hazırlama işlemi 700 mm çapında, 500 mm uzunluğundaki değirmen ile yapılmış, endüstriyel koşullardaki doldurma oranı ve bilya dağılımları seçilmiştir. Tüp değirmenlerdeki 1. ve 2. kamara bilya dağılımı benzetimi yapılarak malzeme iki aşamada öğütülmüştür.

Öğütme mekanizmalarındaki farklılığın hem dar tane boyu fraksiyonlarına nasıl yansıdığını görmek, hem de mineralojik analizi daha doğru ve kolay yapabilmek için

YBMD ve bilyalı değirmen ürünleri eleme yöntemiyle, -75+63 µm, -63+53 µm, -53+45 µm, -45+38 µm ve -32+20 µm dar tane boyu fraksiyonlarında hazırlanmıştır. İnce tane boyunu temsil etmesi amacıyla her iki öğütme mekanizmasının -38 µm fraksiyonları da oluşturulmuştur. Alçı taşı örneği ise aynı şekilde öğütülmüş ve tanımlanan fraksiyonlarda hazırlanmıştır. Ürünlerin servis özelliklerinin belirlenmesi aşamasında klinker örneklerine % 5 oranında alçı taşı katılarak çimento örnekleri oluşturulmuştur. Mineralojik analiz çalışmalarında ise, her iki öğütme mekanizmasının -63+53 µm, -45+38 µm ve -32+20 µm fraksiyonları için hazırlanan parlak kesit örnekleri kullanılmıştır.

Yine OYAK Bolu Çimento Fabrikası'nın aynı öğütme hattından, başka bir örnekleme zamanında, klinker ve alçı taşı örnekleri alınmıştır. Bir önceki örnek hazırlama döneminde olduğu gibi YBMD çıkışından alınan ürün dağıtılmış, YBMD beslemesi klinker ise aynı bilyalı değirmende öğütülmüştür. Elde edilen ürünler dar tane boyu fraksiyonları yerine -75 µm, -63 µm, -53 µm, -45 µm, -38 µm ve -20 µm olacak şekilde hazırlanmıştır. Alçı taşı örneği de öğütülüp yukarıda tanımlanan inceliklerde hazırlanmış; servis özellikleri belirleme testleri için klinker örneklerine % 5 oranında katılmıştır.

Çimento fiziksel parametrelerinin servis özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla Baştaş Çimento Sanayi A.Ş.'den % 5 kalker katkılı PÇ 42.5 R örneği alınmıştır. Farklı incelik, tane boyu dağılımı ve dağılım eğiminin etkisini görebilmek için, laboratuvar ölçekli 3. nesil yüksek verimli separatör kullanılarak PÇ 42.5 R çimentosundan -10 µm, -20 µm, -30 µm, -45 µm, -30+2 µm ve -20+5 µm dağılımlarında örnekler hazırlanmıştır. Basınç dayanımına önemli miktarda katkı sağlayan 3-32 µm fraksiyonunun etkisini görebilmek için, hazırlanan -30+2 µm örneği, PÇ 42.5 R'ye % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında katılarak farklı dağılım ve inceliğe sahip yeni örnek grubu oluşturulmuştur. Tane boyu dağılım eğrisi eğiminin servis özellikleri üzerindeki etkisini inceleyebilmek amacıyla, -20+5 µm örneği PÇ 42.5 R'ye % 10, 20, 30 ve 40 oranında katılarak başka bir örnek grubu hazırlanmıştır.

PÇ 42.5 R için elde edilen ilişkilerin herhangi bir ilave katkı içermeyen PÇ 42.5 için de denenmesi ve öğütme devre tasarımından kaynaklanacak fiziksel parametrelerdeki farklılıkların etkisinin incelenmesi amacıyla, SET Ankara Çimento Fabrikası'ndan PÇ 42.5 örneği alınmıştır. Tane boyu dağılımındaki ince ve iri tanelerin servis özellikleri üzerindeki etkilerini ayrı ayrı inceleyebilmek için, açık ve kapalı öğütme devre örnekleriyle birlikte, bu örneklerin  $-30 \mu\text{m}$ ,  $-30+5 \mu\text{m}$  ve  $+5 \mu\text{m}$  dağılımları yine separatör kullanılarak hazırlanmıştır.

#### 4. DENEYSEL YÖNTEM

OYAK Bolu Çimento Fabrikası'ndan, devreye alçı taşı beslenmediği durumda YBMD ürünü alındığı için, iki farklı örnekleme döneminde alınan YBMD beslemesi olan klinker, bilyalı değirmende alçı taşı katılmadan öğütülmüştür. Dolayısıyla mineralojik çalışmalarda alçı taşından kaynaklanabilecek etkiler giderilmiştir. Bilyalı değirmendeki öğütme koşulları; doldurma oranı, bilya dağılımı gibi özellikler açısından endüstriyel koşuldakine benzetilmiş, öğütme süresi ise, ürün tane boyu dağılımının YBMD ürün tane boyu dağılımı ile yaklaşık aynı dağılımı verecek şekilde ayarlanmıştır. Dolayısıyla hem dar tane boyu fraksiyonlarında, hem de dağılım örneklerinin hazırlanmasında servis özelliklerini etkileyebilecek ürün tane boyu dağılımındaki fark en aza indirilmiştir. Öğütme mekanizmasındaki farklılığın servis özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesinde, örneklerin öğütme mekanizmasına bağlı olarak kimyasal içeriklerinin tane boyu fraksiyonlarına göre farklılaşmaması sonuçların karşılaştırılabilir olması açısından önemlidir. Özellikle her iki öğütme mekanizmasının dar tane boyu fraksiyonlarının çalışıldığı örnek grubunda, kimyasal içeriğin fraksiyonlar arasında değişmediği analiz sonucuyla görüldükten sonra deneysel çalışmaya devam edilmiştir. Hem dar tane boyu hem de dağılım fraksiyonlarının kimyasal içeriklerini belirleme çalışmalarında Philips X-CEM XRF cihazı kullanılmıştır.

Tane boyu dağılımlarının belirlenmesinde Sympatec marka lazer kırınımlı tane boyu ölçüm cihazı kullanılmıştır. Dar tane boyu fraksiyonları ve dağılım örnekleri Rotap eleme yöntemiyle hazırlanmıştır. Sadece -32+20 µm fraksiyonunun hazırlanmasında Alpine marka hava akışlı elek kullanılmıştır.

YBMD ve bilyalı değirmen öğütme mekanizma ürünlerinin mineralojik açıdan farklılıklarının incelenmesi Clemex Vision PE 3.5 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Clemex cihazı, alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop, analizi otomatikleştiren kumanda koluna sahip bir düzenek, görüntü ile görüntüyü tanımlayan algoritma ve sonuçların görüldüğü çıktı ekranlarından oluşmaktadır (Şekil 4.1).



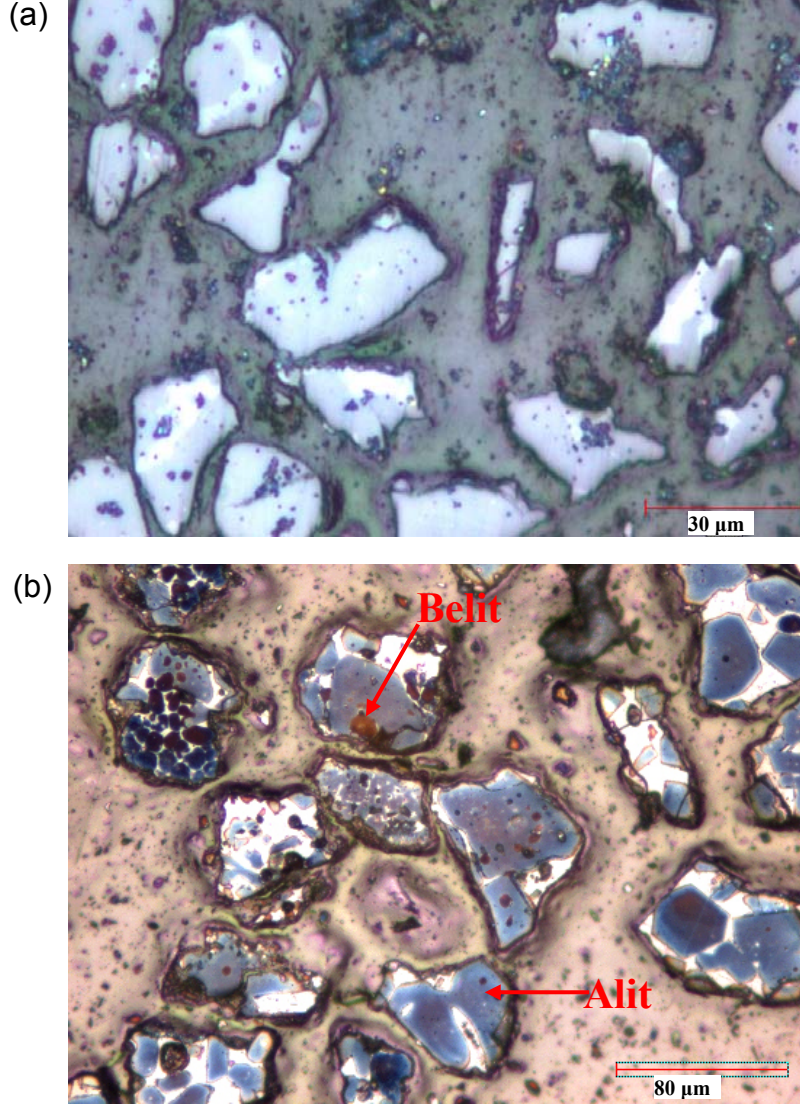
Şekil 4.1. Clemex görüntü analiz cihazı

Clemex Vision PE 3.5 kullanımı kolay, tek satır program kodu yazmadan görüntüyü tanımlayacak algoritmaların rahatlıkla oluşturulabildiği bir yazılımdır.  $-63+53 \mu\text{m}$ ,  $-45+38 \mu\text{m}$  ve  $-32+20 \mu\text{m}$  dar tane boyu fraksiyonlarının parlak kesit örnekleri kesme, aşındırma ve parlatma aşamalarında sadece alkol kullanılarak hazırlanmıştır. Çünkü su, minerallerle tepkimeye girerek parlak kesit yüzeyini bozmaktadır. Klinker minerallerinin birbirlerinden ayırt edilebilmesi için kullanılacak dağlama yöntemi, bir dizi farklı dağlama yöntemleri test edilerek seçilmiştir.

Klinkerin alit, belit, aluminat, ferrit, serbest kireç, periklas, alkali sülfatlar ve gözeneklerden oluşan karmaşık bileşimi görüntü analizini sıradan olmayan bir işleme dönüştürmektedir. Ferrit dışındaki klinker fazlarının yansıma özelliklerinin az ve birbirlerine göre ayırt edilmelerinin zor olması, fazların renk eşliğine göre kesimlenmesini zorlaştırmaktadır. Fazlar arasında renk farkı olmadığı için dış etki yaratarak aralarındaki kontrastı belirgin hale getirmek gerekir. Bu nedenle klinker dağlanabilir, boyanabilir ya da kaplanabilir. Bu işlemler sonucunda klinker mineralleri renklenmiş olur ki buradaki renk, ilgili fazın kimyasal bileşiminin ve kristal-optik özelliklerinin fonksiyonunu yansıtır. Dolayısıyla görüntü analizi yapılmadan önce klinker fazlarına yeterli renk kontrastının verildiği dağlama işlemi yapılmalıdır



(Anwander et.al, 1998). Şekil 4.2'de verilen dağlama yapılmamış ve yapılmış ğimento örnekleri bu durumu en iyi şekilde aĝıklamaktadır.



Şekil 4.2. Dağlanmayan (a) ve dağlanan ğimento örnekleri (b)

Literatürde ğok ğeşitli kimyasal dağlama yöntemlerinden bahsedilmektedir. Dağlama işleminde kullanılan ğözeltilerin, tiplerine ve dağlama sürelerine göre farklı işlevleri bulunmakta; bazıları kalsiyum silikatların, bazıları ise aluminatın ya da diğer fazların belirginleşmesini sağlamaktadır. Ğizelge 4.1'de klinker mineral fazlarını dağlama işleminde kullanılan ğözeltiler ve uygulama koşulları verilmektedir (Altun, 1998; Campbell,1999).

Çizelge 4.1. Klinker fazlarının kimyasal dağlama yöntemleri ve uygulama koşulları (Altun, 1998; Campbell,1999)

Dağlama maddesi	Damıtık su	Nitrik asit	Su+DAC	Amonyum polisülfid	Florik asit	Potasyum hidroksit çözeltisi	Sodyum hidroksit çözeltisi	Okzalik asit	Alkollü boraks çözeltisi	Sirke ruhu
Derişim	-	HNO <sub>3</sub> etil veya amilalkol içinde 1:100 veya 1:1000	-	Derişik (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>1+x</sub> -çözelti (1:10)	a)derişik HF b)seyreltik HF c) HF buharı	Su içinde % 10 KOH	8 cm <sup>3</sup> %10 NaOH ve 2 cm <sup>3</sup> Na <sub>2</sub> HPO <sub>3</sub>	% 10 okzalik asit	% 1 % 0.4	Etil alkol içinde sirke 1:100
Dağlama süresi (s: saniye)	5-15 s	2-15 s	5-10 s	15-30 s	a) 2-3 s b) 5-10 s/ 30-60 s c)10-20 s	15 s	60 s	5-15 s	600 s	2-5 s
Dağlama sıcaklığı	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	30°C	50-55°C	20°C	20°C	20°C
Dağlanan faz	Alit, belit, aluminat, SCaO	Alit, belit, ferrit, SCaO	Alit, belit, aluminat, SCaO	Alit, belit, ferrit, SCaO	Alit, belit	Aluminat	Alit, aluminat, ferrit, SCaO	Aluminat	Alit, SCaO	Alit, belit, SCaO

SCaO: serbest kireç, DAC: dimetilamonyumsitrat

Deneyisel çalışmada özellikle alit ve belit gibi kalsiyum silikatları en iyi şekilde görebilmek için, farklı derişimlerdeki nital çözeltisi ( $\text{HNO}_3$ ), KOH çözeltisi, saf su ve aseton ile dağlama yöntemleri denenmiştir. En uygun sonuç 1:1000'lik  $\text{HNO}_3$ :etil alkol çözeltisi ile elde edilmiştir. Alüminat fazını görebilmek için KOH çözeltisi ile dağlama yapılması gerekmektedir, fakat bu dağlama yöntemi kalsiyum silikatların yüzeyini bozarak tanınmaz hale getirmektedir. Bu nedenle sadece nital kullanılarak alüminat ve ferrit fazları ara faz olarak tek bir mineral gibi analiz edilmiştir. Literatürde sıvı faz içinde alüminat ve ferrit fazlarını ayrı ayrı belirleyip görüntü analizi yöntemiyle sayısallaştırmanın zor olduğundan söz edilmektedir. Hatta, alüminatın farklı kristal şekillerinin oluşabildiği ve belirlenebilmesi için 500x gibi yüksek büyütme altında incelenmesi gerektiği ifade edilmektedir (Theisen, 1997).

Çimento örneklerinin kimyasal çözeltilerle dağlanması bir takım zorlukları da beraberinde getirmektedir. Her örnek için farklı dağlama süreleri olabilmekte ya da minerallerin farklı modifikasyonları var ise, bunlar farklı şekilde dağlanabilmektedir. Farklı dağlanan bu modifikasyonlar, örneğin farklı yerlerinde farklı renk doygunluklarına neden olduğuna için görüntü analiz yönteminde mineralin seçilmesi açısından zorluk yaratabilmektedir. Bu nedenle, her örnek için en uygun dağlama işlemi deneme yanılma yoluyla test edilmelidir.

Örneklerin dağlandıktan sonraki görüntülerinde özellikle alit ve belitin yer yer farklı renk aralıklarına sahip olmaları nedeniyle analiz otomatik olarak gerçekleştirilememiş, daha güvenli sonuçlar elde edebilmek için her görüntü resiminin kaydedilmesi suretiyle analizler teker teker yapılmıştır. YBMD ürününün -63+53 $\mu\text{m}$  fraksiyonunda 1226, -45+38 $\mu\text{m}$  fraksiyonunda 800 ve -32+20 $\mu\text{m}$  fraksiyonunda 1575 adet tane; bilyalı değirmen ürününün -63+53 $\mu\text{m}$  fraksiyonunda 1250, -45+38 $\mu\text{m}$  fraksiyonunda 795, -32+20 $\mu\text{m}$  fraksiyonunda ise 1825 adet tane sayılmıştır.

Clemex yazılım programı ile her fraksiyondan elde edilen görüntüyü uygun şekilde tanımlayacak algoritmalar yazılmış ve aşağıda belirtilen ölçümler gerçekleştirilmiştir:

1. Tüm tane alanları üzerinden alit, belit ve alüminat+ferrit (ara) fazlarının alan yüzdeleri dağılımı,
2. Tüm tane alanları üzerinden serbestleşme sınıflarının alan yüzdeleri dağılımı,
3. Serbestleşme sınıfları içindeki alit, belit ve alüminat+ferrit fazlarının alan yüzdeleri dağılımı,
4. Alit ve belitin kristal büyüklükleri, ortalama Feret çapları, küresellik oranları ve şekil faktörleri,
5. Alit minerali içinde gömülü haldeki belitin yüzde miktarı,

Clemex yazılımında görüntü ve sonuçların görüldüğü ekran çıktısı örnek olarak EK 1'de verilmektedir.

YBMD teknolojisi, özgül enerji tüketiminde sağladığı % 40'a varan tasarruf ile çimento ve mineral endüstrisinde kullanım alanı bulmuştur. Enerji tasarrufunun yanı sıra, YBMD'nin tercihli serbestleşme sağlaması mineral endüstrisinde diğer ilgi çekici bir nokta olurken, çimento endüstrisinde "serbestleşme" kavramı dahi bilinmemektedir. YBMD'lerin altın, elmas, bakır, kasiterit gibi minerallerin öğütülmesinde kullanılması sonucu, artan serbestleşme oranına bağlı olarak zenginleşme veriminin arttığına ilişkin bilgiler literatürde mevcuttur. Her ne kadar YBMD çimento endüstrisinde daha fazla kullanılsa da, farklı öğütme mekanizma ürünlerinin mineralojik farklılıklarının incelendiği çalışma sayısı oldukça azdır. Serbestleşmenin çimento servis özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği herhangi bir araştırmaya ise rastlanmamıştır. Bu anlamda, çalışmanın mineralojik parametrelerin belirlenmesi aşamasında, planlanan deneysel yöntemle cevher zenginleştirmede çok önemli bir yere sahip olan serbestleşme kavramı Clemex yazılım programında tanımlanarak, çimento mineralojisi ve öğütme ilişkisinin açıklanmasında yeni bir bakış açısı sağlanmıştır (Çelik and Öner, 2006).

Bilindiği gibi cevher zenginleştirme işlemlerinde başarıyı sağlayacak ön koşul değerli olan mineralin gang minerallerinden en ekonomik şekilde serbest kalabilmesidir. Serbestleşmenin iyi olması 2 nedenden dolayı istenmektedir:

1. İnce tane boyuna öğütmeden serbestleşme elde edilirse daha az öğütme enerjisi harcanacaktır.
2. İnce ğtme sadece masraflı olmakla kalmayıp, oluşan incelerin öğütme işlemini takip eden diğer işlemleri verimsiz ve daha pahalı hale getirme gibi olumsuz etkileri söz konusudur (Apling and Bwalya, 1997).

Dolayısıyla mineral serbestleşme derecesinin belirlenmesi bir ayırma sürecinin hem besleme hem de diğer akışlarında kritik bir bilgidir.

Serbestleşme derecesinin hesaplanmasında kullanılan nokta sayım yöntemi mikroskop dışında ek bir ekipman ya da yazılım gerektirmeyen, eskiden beri bilinen bir yöntemdir. Kolaylıkla uygulanabilmesine karşın çok zaman alan ve sonuçlarının güvenilirliği nokta sayma işlemini yapan kişiye göre değişen bir yöntem olup, veri aralığı görüntü analiz yönteminden oldukça düşüktür (Falutsu, 1994). Serbestleşme derecesinin ölçümü optik mikroskop dışında elektron mikroskopi (Fandrich et.al, 1997) ve otomatik görüntü analiz (Ekmekçi et.al, 2005) yöntemleri ile yapılabilmektedir. Deneysel çalışmada serbestleşme derecesi; serbest ve bağlı minerallerin algoritmada tanımlanması ve bunların piksel alanlarının ölçülmesi mantığı baz alınarak hesaplanmıştır. Yazılan bir algoritma rneği EK 1'de verilmektedir.

Her iki öğütme mekanizmasının dar tane boyundaki örneklerinin morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskopi yöntemiyle belirlenmiştir. CAMECA SU-30 model elektron mikroskop ile aynı fraksiyondaki örnekler yaklaşık aynı büyütme ölçeğinde incelenmiştir.

Fiziksel parametrelerin belirlenmesi çalışmalarında farklı incelik ve tane boyu dağılımına sahip örnekler Şekil 4.3'de gösterilen laboratuvar tipi 3. nesil KHD Humboldt WEDAG marka ALPINE separatör ile hazırlanmıştır. 0.37 kw'lık bir motorla tahrik edilen separatörde besleme hızı, hava akış hızı ve rotor devri değiştirilerek uygun kesme boyunda malzeme hazırlanabilmektedir. Örneklerin hazırlanması aşamasındaki çalışma aralığı; rotor hızı en çok 20 000 devir/dakika, hava hızı ise 15-60 m<sup>3</sup>/h olacak şekilde belirlenmiştir.

Yüzey alanı ölçümlerinde hava geçirgenliği prensibine dayalı Blaine yöntemi ile azot gazı soğurumu prensibine dayalı BET yöntemi kullanılmıştır. Blaine yönteminde malzeme içindeki tanelerin dış yüzey alanları ölçülürken; BET yöntemi, gazın tane içindeki çatlaklara kadar soğurulabilmesinden dolayı dış ve çatlaklardaki yüzey olmak üzere toplam yüzey alanını vermektedir. Bu nedenle, özellikle öğütme mekanizmalarındaki farklılığın incelendiği çalışmalarda, basınç öğütmesinin daha çatlaklı bir ürün vereceği bilgisi, dar tane boyu fraksiyonlarında BET ölçümleriyle desteklenmektedir. Yüzey alanı ölçümlerinde AtomTeknik otomatik Blaine cihazı ile Quantachrome BET cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Laboratuvar tipi 3. nesil yüksek verimli separatör

Servis özellikleri, çimentolar için tanımlanan TS EN 197-1 (2002) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı testinde “Rilem Cembureau” yöntemi gereği; 1 kısım çimento, 3 kısım standard kum ve ½ kısım su kullanılarak oluşturulan harç, uzunluğu 160 mm, genişliği ve yüksekliği 40 mm olan kalıplara dökülmüş, kalıplar 20°C±1°C’lik su içinde kırılacakları güne kadar bekletilmiştir. Her biri 450 gram olan örneklerden tekrarlanabilir sonuç elde edebilmek için 2’şer kalıp hazırlanmıştır. Kalıplar hazırlanırken ortam sıcaklığı 20°C±2°C ve bağıl nem en az % 50 olacak şekilde sabit tutulmuş, kırma işlemi dökümden itibaren 2, 7 ve 28. gün sonunda yapılmıştır.

Basınç dayanımı testinde, eğilmede çekme dayanımı belirlenmesi sırasında iki parçaya bölünen yarım prizmalar 40 mm×40 mm’lik kırma başlığı ile kırma presinde kırılmıştır. Kırma başlıkları arasındaki yarım prizma 40 mm×40 mm× 40 mm’lik bir küp örnek etkisini görmekte ve dayanım ( $\sigma$ ) aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

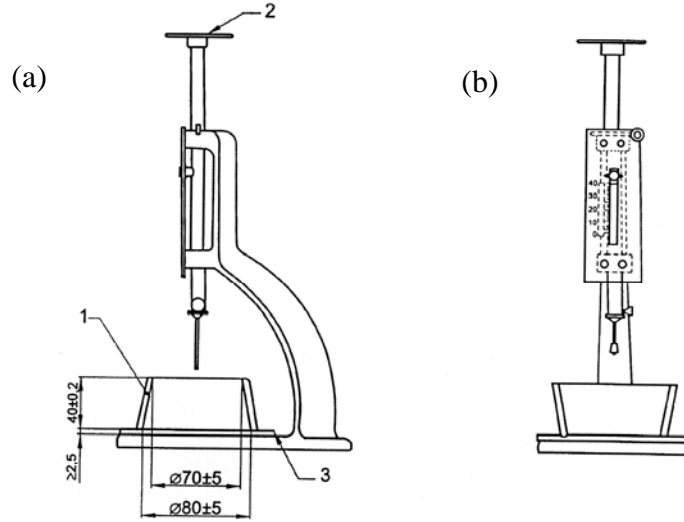
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

(P: uygulanan kuvvet, kgf; A: kesit alanı, cm<sup>2</sup>).

Standart kıvam testi uygulanarak tüm örnekler için kullanılacak en uygun su miktarı belirlenmiştir. Priz süresinin tayininde ise, 500 gram örnek standart kıvam testinde belirlenen su miktarı ile karıştırılıp otomatik Vicat cihazı kullanılarak prizin başlama ve sona erme süreleri kaydedilmiştir.

Priz süresi, Vicat iğnesinin standart kıvamdaki çimento pastası içinde belirlenmiş bir derinliğe kadar girmesini gözlemek suretiyle belirlenmektedir. Şekil 4.4’de verilen Vicat aletinde, çimento hamuru, içi yağlanan Vicat halkası içine, halka da yine yüzeyi yağlanan bir cam levha üzerine yerleştirilmiştir. Aletin göstergesi, iğne cam levhaya değdiği zaman sıfırı gösterecek şekilde ayarlanmış, Vicat iğnesi halka içindeki hamurun üst yüzeyine dokunacak kadar indirilerek bir vida ile sıkıştırılmıştır. Vida gevşetilerek iğnenin hamur içine serbestçe girmesi sağlanmış, priz başlangıç süresinin tesbiti için iğne her 5 dakikada bir hamura batırılmıştır. İğnenin bir defa

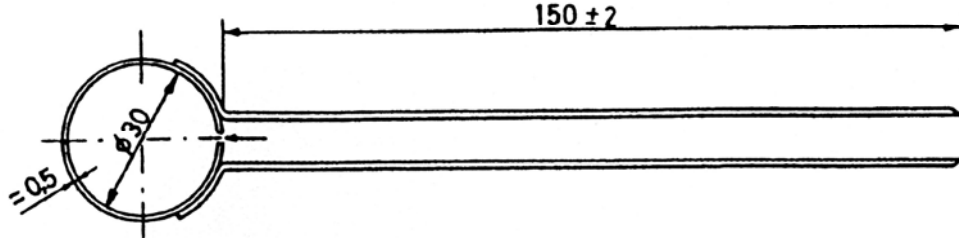
girmiş olduğu yere bir daha girmemesi için Vicat halkasının durumu her batırılıştan sonra otomatik olarak değişmektedir. Çimento hamuruna batan iğne, cam levhaya  $(4\pm 1)$  mm uzaklıkta kaldığı an, priz başlangıcı olarak kaydedilmiştir. Prizin sona erme süresinin tesbiti için, Vicat kalıbı ters çevrilmiş, iğnenin pastaya en çok 0.5 mm girebildiği an, bitiş anı olarak kabul edilmiştir (TS EN 196-3, 2002).



Şekil 4.4. Vicat aleti (a) priz başlama süresi için yandan görünüm, (b) priz sona erme süresi için tersine çevrilmiş kalıpla önden görünüm (1: kalıp, 2: düzeltici ağırlıklar için platform, 3: cam plaka, ölçüler mm'dir)

Hacimsel genleşme testi Şekil 4.5' de gösterilen Le Chatelier aleti ile gerçekleştirilmiş, priz süresinin belirlenmesinde kullanılan çimento pastasının bir kısmı bu test için kullanılmıştır. Standart kıvamda hazırlanan çimento pastası Le Chatelier kalıbının içine yerleştirilmiş,  $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 'de ve % 98'den az olmayan bağıl nemde  $(24\pm 0.5)$  saat muhafaza edilmiştir. Bu süre sonunda aletin gösterge uçları arasındaki mesafe mm (A) olarak ölçülmüştür. Sonra kalıp  $(30\pm 5)$  dakika içinde kaynama sıcaklığına kadar ısıtılmış, kaynama sıcaklığındaki su banyosunda  $(3 \text{ saat}\pm 5 \text{ dakika})$  bekletilmiştir. Kaynama süresi sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe mm (B) olarak ölçülmüştür. Kalıbın  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 'ye soğuması beklendikten sonra gösterge uçları arasındaki mesafe mm (C) olarak kaydedilmiş, genleşme,  $(C-A)$  ölçüm farkı ile hesaplanmıştır (TS EN 196-3, 2002).





Şekil 4.5. Le Chatelier cihazı (ölçüler mm'dir)

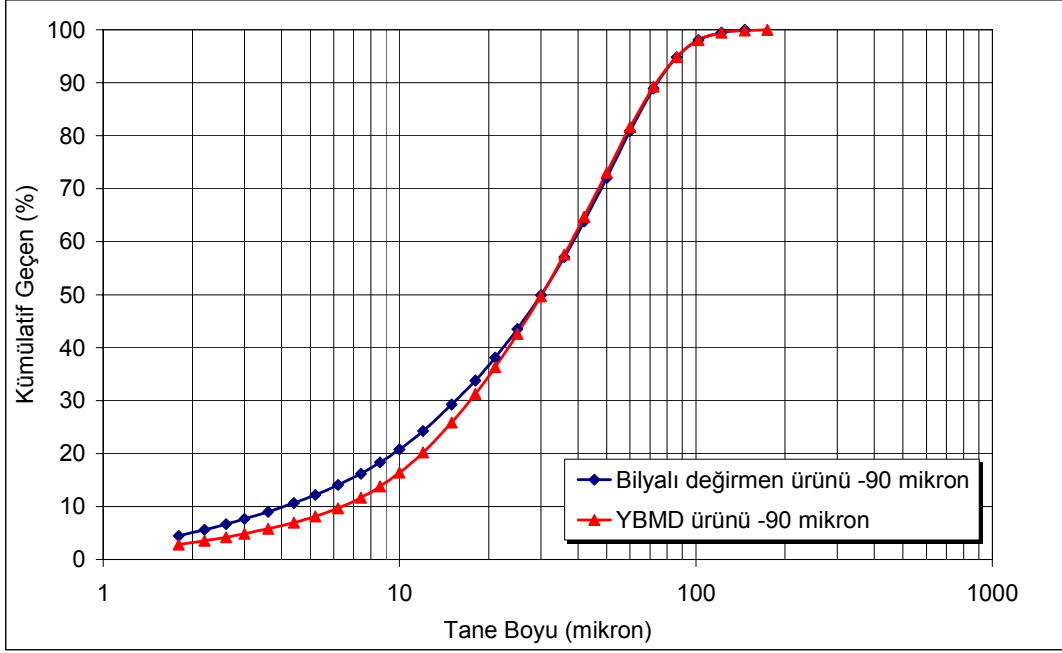
## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

Çimentonun fiziksel, kimyasal, mineralojik ve morfolojik özelliklerinin öğütme mekanizması ve öğütme devre tasarımına bağlı olarak değişimi, ve bu değişimin çimento servis özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği deneysel çalışmaların sonuçları bu bölümde verilmiştir.

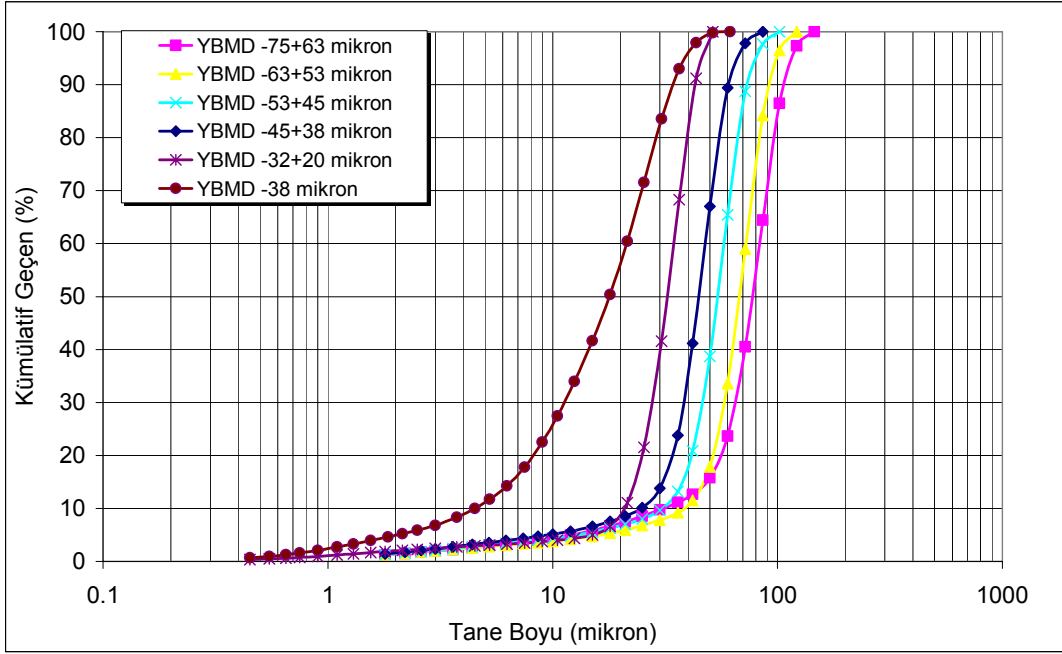
### 5.1. Öğütme Mekanizması Farklılığının Dar Tane Boyu Fraksiyonlarında İncelenmesi

OYAK Bolu Çimento Fabrikası'ndan ilk örnekleme döneminde alınan YBMD ürünü kek halinde olduğundan laboratuvarında, öğütücü ortam içermeyen bir değirmende dağıtılmıştır. Dağıtılan YBMD ürünü öncelikle 90  $\mu\text{m}$ 'dan elenmiştir. Literatürde 75  $\mu\text{m}$ 'dan daha iri tanelerin hidratasyona katılmadığı belirtilmektedir (Powers, 1939). Bu nedenle dar tane boyu örnekleri 75  $\mu\text{m}$  altındaki fraksiyonlardan oluşturulmuştur. Bilyalı öğütmenin etkisini tek başına görebilmek amacı ile çimento fabrikasından alınan aynı klinker örneği alçıtaşının olmadığı durumda, laboratuvar ölçekli bilyalı değirmende, iki aşamada öğütülmüştür. Bu anlamda, ilk aşamada daha iri bir bilya dağılımı kullanılarak endüstriyel ölçekteki bilyalı değirmenin 1. kamara benzetimi yapılmış, ikinci aşamada daha ince ürün verecek bir bilya dağılımı seçilerek değirmenin 2. kamarası temsil edilmiştir. Bilyalı değirmen ürününün de aynı şekilde 75  $\mu\text{m}$  altındaki dar tane boyu fraksiyonları hazırlanmıştır. Her iki öğütme mekanizması ürününün -90  $\mu\text{m}$  tane boyu dağılımları Şekil 5.1'de verilmektedir. Buna göre 20  $\mu\text{m}$ 'un altındaki boylarda YBMD daha iri bir dağılım gösterirken, çalışılan dar tane boyu fraksiyonlarında tane boyu dağılımları benzerdir.

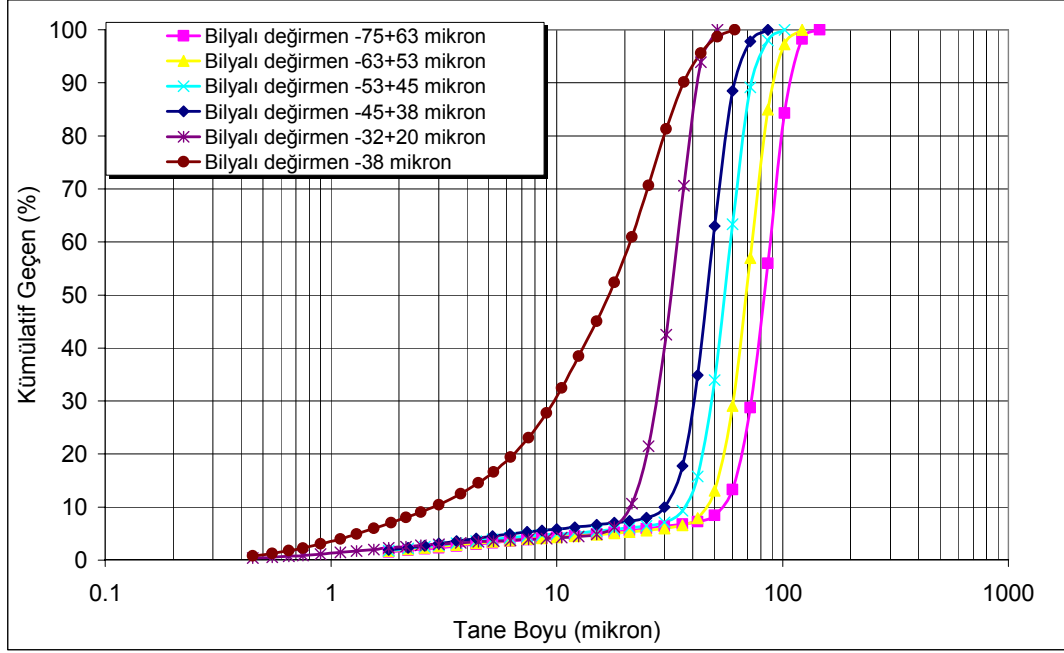
YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerinden hazırlanan dar tane boyu fraksiyonları ile -38  $\mu\text{m}$  fraksiyonlarının tane boyu dağılımları sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de grafiklendirilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen tüm değerler EK 2'de verilmektedir.



Şekil 5.1. YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerinin -90  $\mu\text{m}$  dağılımları



Şekil 5.2. YBMD ürünü dar tane boyu ve -38  $\mu\text{m}$  dağılımları



Şekil 5.3. Bilyalı değirmen ürünü dar tane boyu ve -38 µm dağılımları

### 5.1.1. Kimyasal Özellikler

YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerinin dar tane boyu fraksiyonlarında XRF yöntemi kullanılarak kimyasal analiz işlemi gerçekleştirilmiş, öğütme mekanizmasındaki farklılığın fraksiyonların kimyasal bileşimine etkisi incelenmiştir. YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerinin kendi içindeki fraksiyonlarında,  $Al_2O_3$  ve serbest kireç, tane boyu incelidikçe azalma eğilimindedir. Serbest kireç miktarı öğütme mekanizmasına bağlı olarak değişim göstermekte ve bilyalı değirmen öğütmesi ürünü tüm fraksiyonlarda yüksek değerler vermektedir. Genel olarak kimyasal bileşimin, tane boyu ve öğütme mekanizması farklılığına bağlı olarak, fraksiyonlar arasında değişim göstermediği söylenebilir. YBMD ve bilyalı değirmen fraksiyonlarının kimyasal bileşimleri sırasıyla Çizelge 5.1 ve 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5.1. YBMD ürün fraksiyonlarının kimyasal bileşimleri (SCaO: serbest kireç)

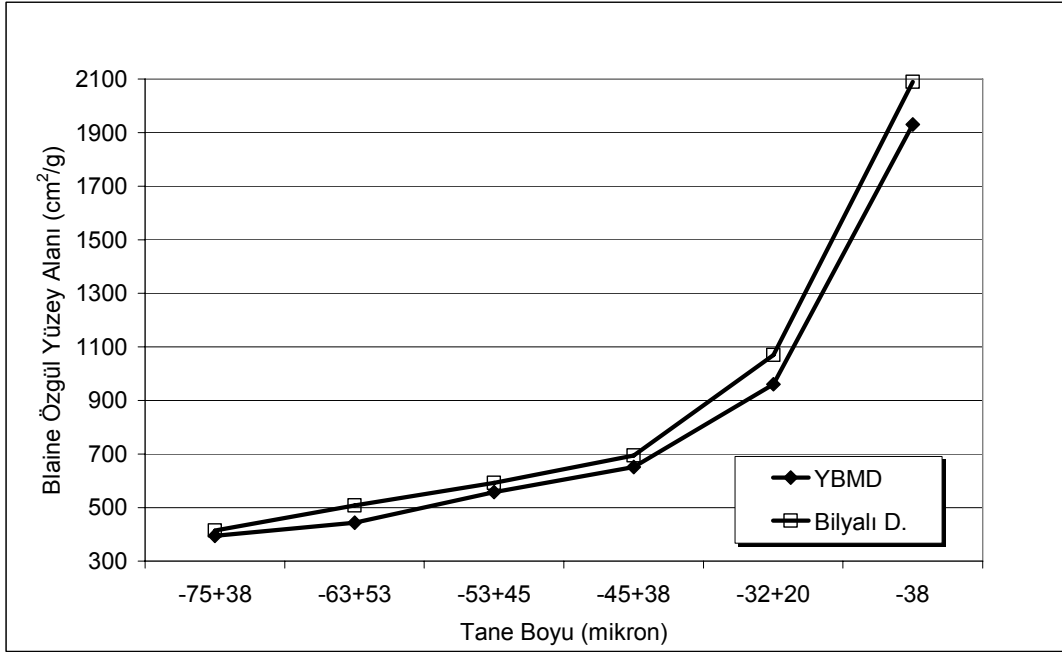
%	YBMD					
	-75+63 µm	-63+53 µm	-53+45 µm	-45+38 µm	-32+20 µm	-38 µm
SiO <sub>2</sub>	21.28	21.34	21.37	21.56	22.18	21.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.50	5.41	5.28	5.15	4.46	4.81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.47	3.41	3.29	3.17	3.11	2.93
CaO	67.09	67.17	67.21	67.47	67.22	67.65
MgO	1.25	1.25	1.24	1.24	1.22	1.21
SO <sub>3</sub>	0.47	0.46	0.46	0.46	0.43	0.49
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.09	0.08	0.08	0.16	0.08
K <sub>2</sub> O	0.56	0.54	0.53	0.52	0.56	0.58
TiO <sub>2</sub>	0.20	0.20	0.20	0.20	0.22	0.20
SCaO	1.06	0.85	0.67	0.44	0.17	0.10
Kızdırma kaybı	0.75	0.84	0.85	0.88	0.10	1.62

Çizelge 5.2. Bilyalı değirmen ürün fraksiyonlarının kimyasal bileşimleri (SCaO: serbest kireç)

%	Bilyalı Değirmen					
	-75+63 µm	-63+53 µm	-53+45 µm	-45+38 µm	-32+20 µm	-38 µm
SiO <sub>2</sub>	21.02	21.12	21.23	21.46	21.81	21.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.84	5.66	5.50	5.36	4.73	5.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.74	3.61	3.48	3.36	3.40	3.44
CaO	66.47	66.51	66.50	66.84	66.62	66.85
MgO	1.28	1.27	1.26	1.25	1.24	1.25
SO <sub>3</sub>	0.47	0.47	0.48	0.47	0.44	0.50
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.08	0.08	0.08	0.16	0.09
K <sub>2</sub> O	0.63	0.61	0.59	0.58	0.62	0.64
TiO <sub>2</sub>	0.20	0.20	0.20	0.20	0.22	0.20
SCaO	1.90	1.57	1.33	1.07	0.24	0.65
Kızdırma kaybı	0.48	0.50	0.45	0.50	0.10	1.03

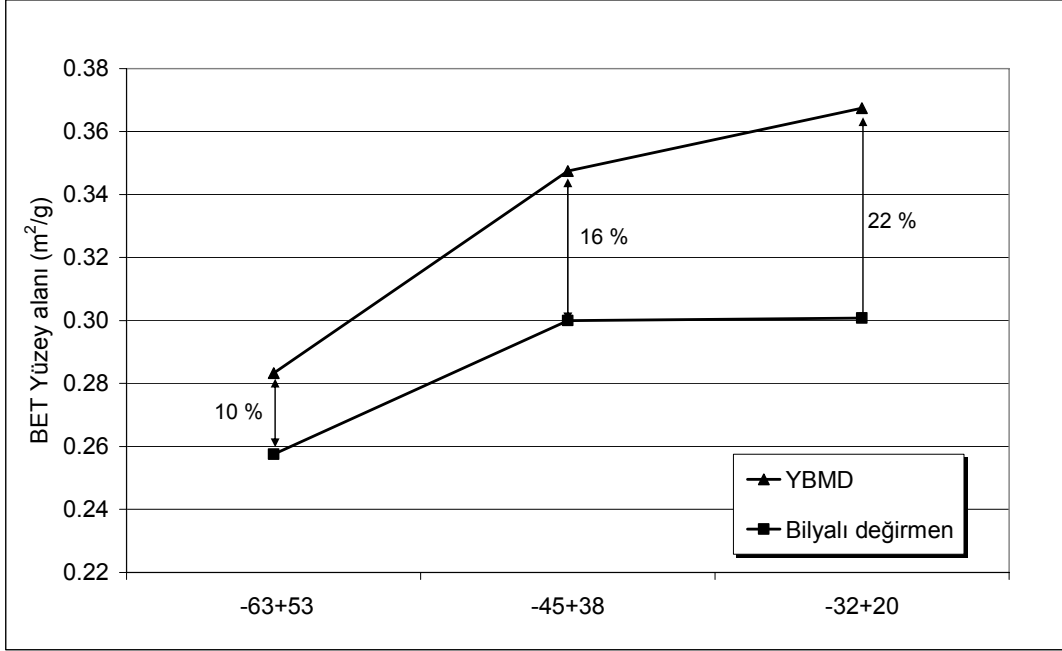
### 5.1.2. Yüzey Alanı Ölçümleri

Dar tane boyu fraksiyonlarının Blaine cihazı ile yapılan özgül yüzey alanı ölçümleri Şekil 5.4'de sunulmaktadır. Buna göre, tüm fraksiyonlar için bilyalı değirmen ürünlerinin % 5-15 arasında değişen yüzdelerle daha fazla yüzeye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının Blaine özgül yüzey alanı ölçümleri

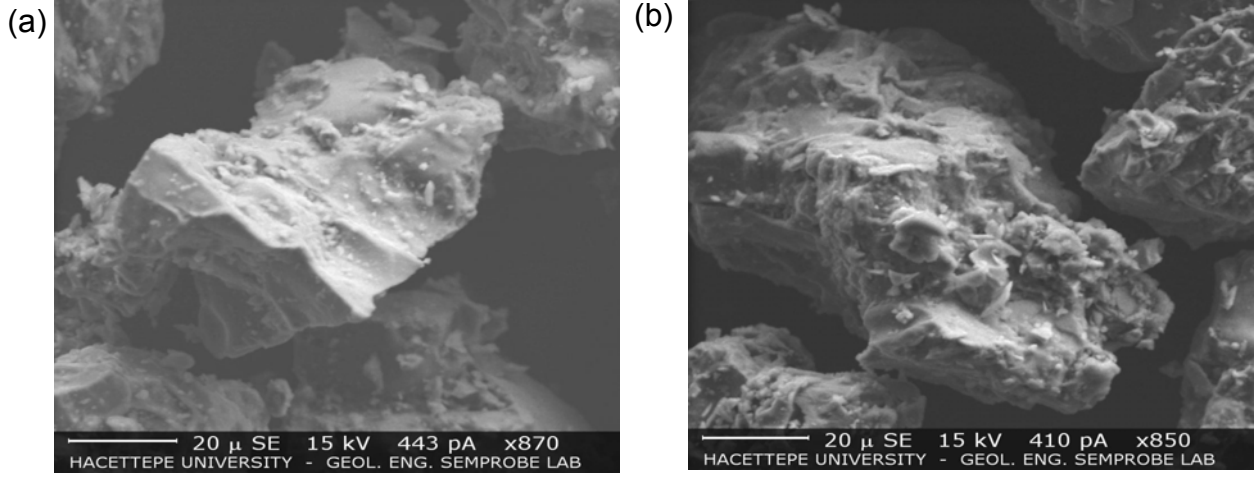
Öğütme mekanizmalarındaki farklılığın, tane gözenekleri ve mikro çatlakları da içeren toplam yüzey alanına daha iyi yansiyabileceği düşüncesiyle örneklerin BET yüzey alanı ölçümleri yapılmış, sonuçlar Şekil 5.5'de verilmiştir. Mineralojik ve morfolojik analiz çalışmalarında -63+53  $\mu\text{m}$ , -45+38 ve -32+20  $\mu\text{m}$  fraksiyonları incelendiği için, yalnızca bu fraksiyonların yüzey alanı ölçülmüştür. Şekil 5.5'de, grafik üzerinde, öğütme mekanizmasına bağlı olarak fraksiyonların özgül yüzey alanları arasındaki fark yüzde olarak belirtilmiştir. Buna göre Blaine yüzey alanı sonuçlarının tersine, YBMD fraksiyonları daha fazla yüzey alanına sahiptir; tane boyu incelidikçe fraksiyonlar arasındaki fark açılmaktadır.



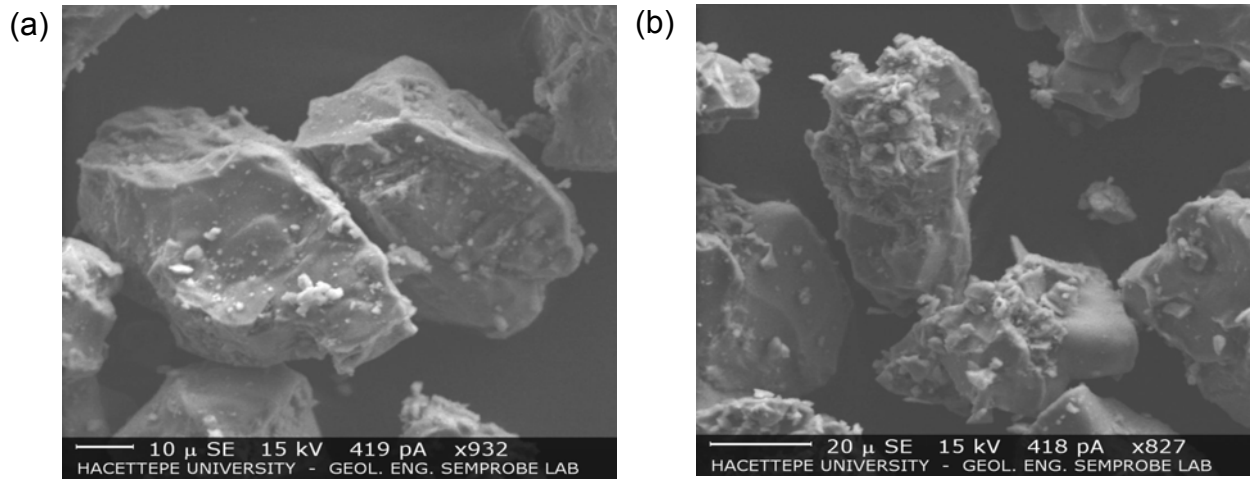
Şekil 5.5. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının BET yüzey alanı ölçümleri

### 5.1.3. Morfolojik Analiz

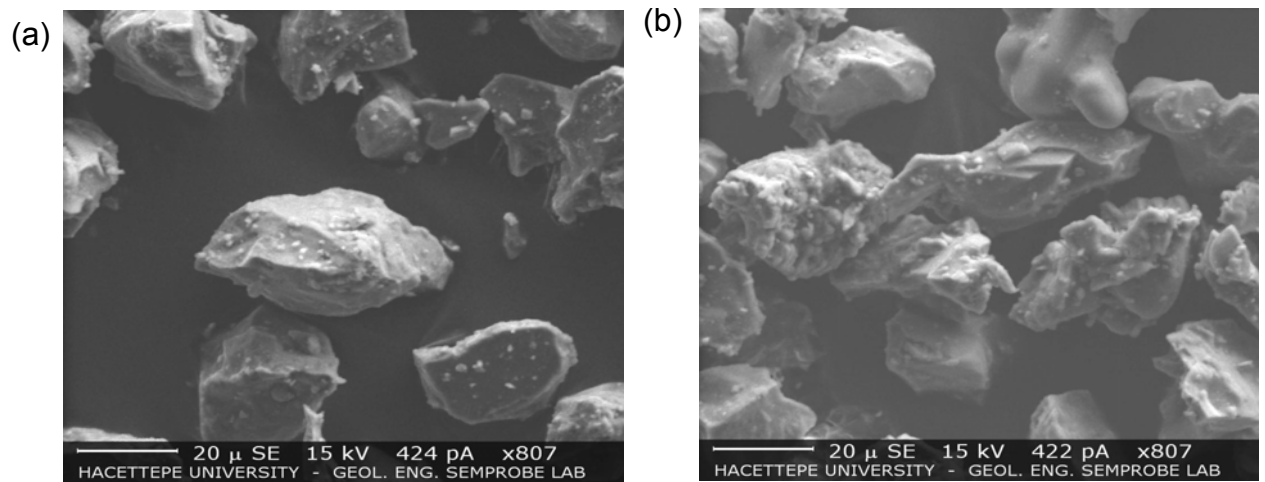
YBMD ile bilyalı değirmen ürünleri arasında BET yüzey alanı farklılıklarının görülmesi, yüzeylerin daha detaylı incelenmesi gerektiğini göstermiştir. Bu anlamda her iki öğütme mekanizmasının ürün fraksiyonları elektron mikroskobu altında incelenmiş, her örneğe ait tipik resimler Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'de verilmiştir. Resimlerden, örneklerin öğütme mekanizması farklılığına bağlı olarak farklı yüzey yapılarına sahip olduğu, YBMD ürünlerinin her fraksiyonda daha pürüzlü yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -63+53 μm ürünleri



Şekil 5.7. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -45+38 μm ürünleri



Şekil 5.8. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -32+20 μm ürünleri



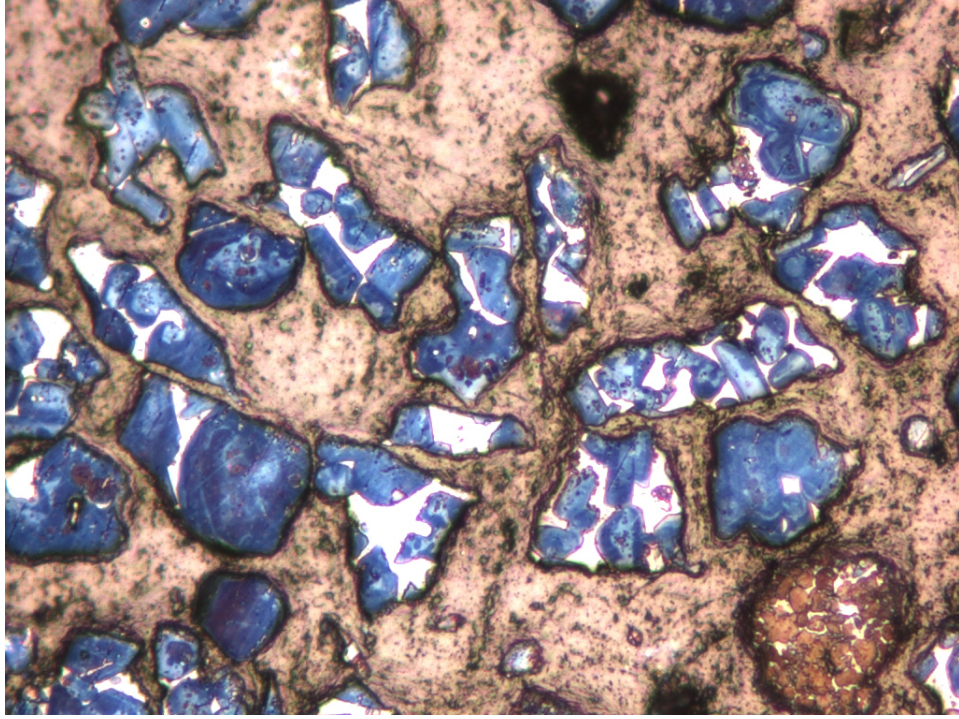
#### 5.1.4. Mineralojik Analiz

YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerinin dar tane boyu fraksiyonlarında hazırlanmasındaki amaç; mineralojik analizin, özellikle fazların serbestleşme derecesinin daha doğru ve kolay hesaplanabilmesini sağlamaktır.

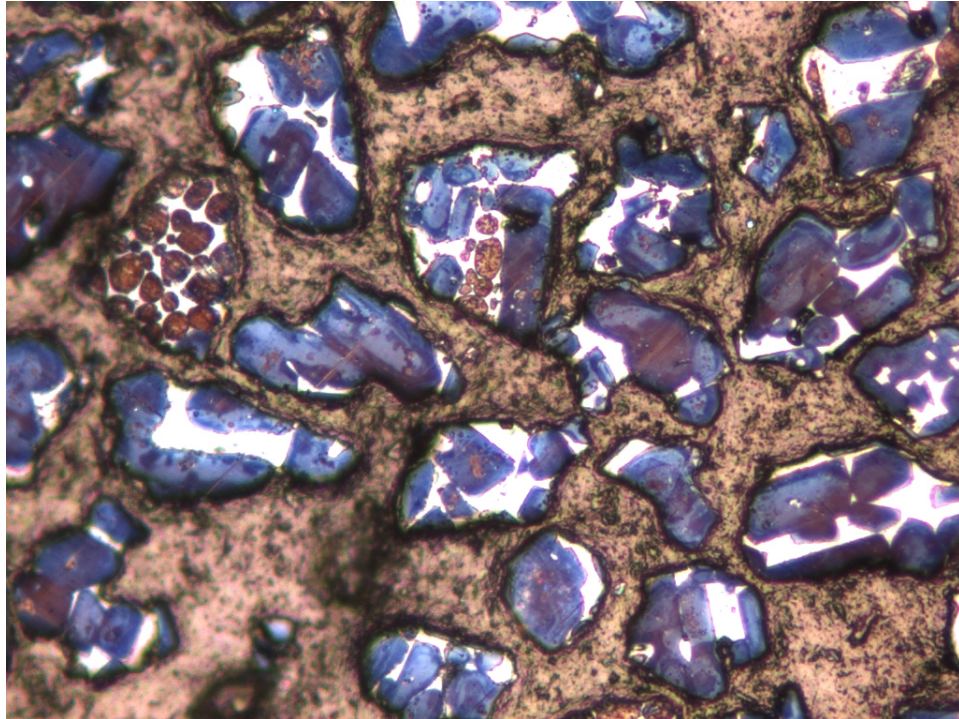
Clemex Vision PE 3.5 görüntü analiz cihazı ile her örnekten 60-85 adet görüntü rastgele seçilerek kaydedilmiş, her görüntüyü en doğru biçimde tanımlayacak ve istenen ölçümleri yapabilecek algoritmalar yazılmıştır. Görüntüde çimento taneleri, tane içindeki alit, belit ve ara faz (alüminat ile ferrit) bileşenleri tanımlanmış, tüm ölçümler bu bileşenler üzerinden yapılmıştır. Serbestleşme analizinde, algoritma içinde serbest, ikili bağlı ve üçlü bağlı tane tanımı yapılmıştır. Buna göre çimento tanesi, tek bir mineralden oluşuyorsa serbest tane, iki mineral bir arada bulunuyorsa ikili bağlı tane, alit, belit ve ara faz bir arada ise üçlü bağlı tane olarak kabul edilmiştir.

1:1000'lik HNO<sub>3</sub>:etil alkol çözeltisi ile farklı uygulama süreleri test edilerek her örnek için en uygun dağlama süresi bulunmuştur. Dağlama süresi sonunda her fraksiyon grubuna ait kaydedilen görüntülerden tipik resimler Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11'de verilmektedir. Mavi ve köşeli mineraller aliti, kahverengi ve daha yuvarlak olanlar beliti, yansıma özelliği daha kuvvetli olan ve beyaz renkte görülenler ise ara fazı (alüminat ve ferriti) temsil etmektedir. Belit minerali genellikle ara faz ile birlikte ve kümeler halinde bulunmaktadır.

(a)



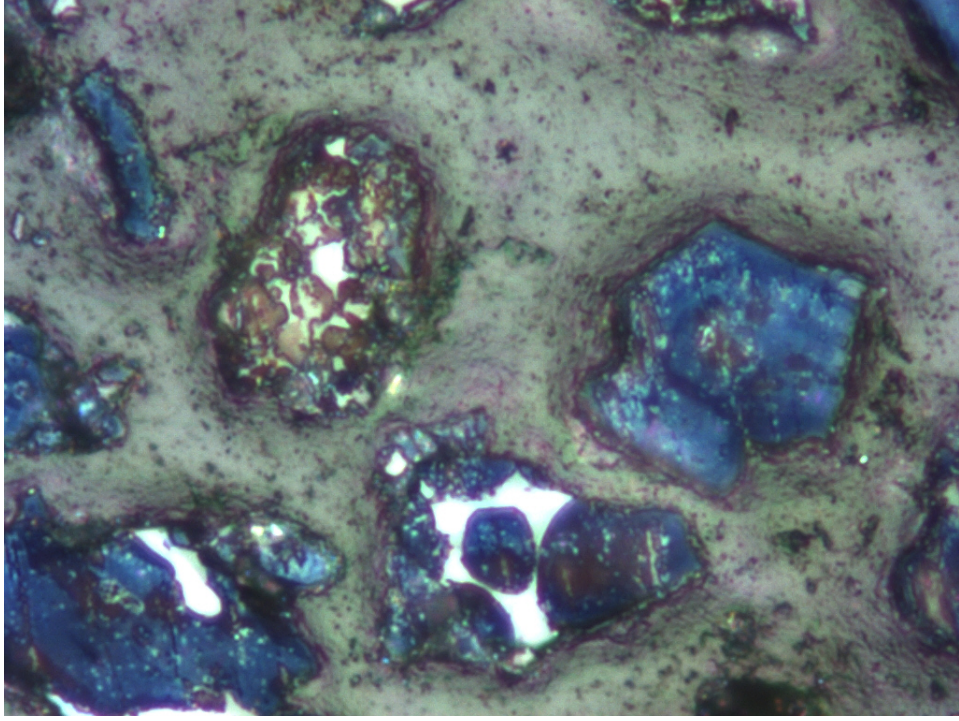
(b)



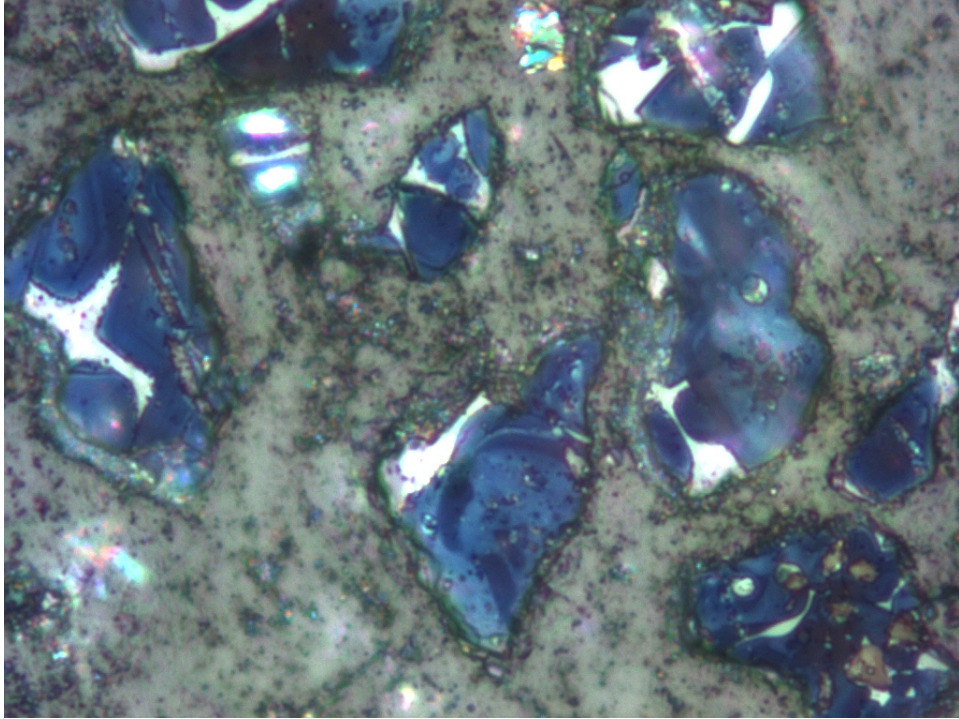
Şekil 5.9. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -63+53  $\mu\text{m}$  ürünleri (20x)



(a)

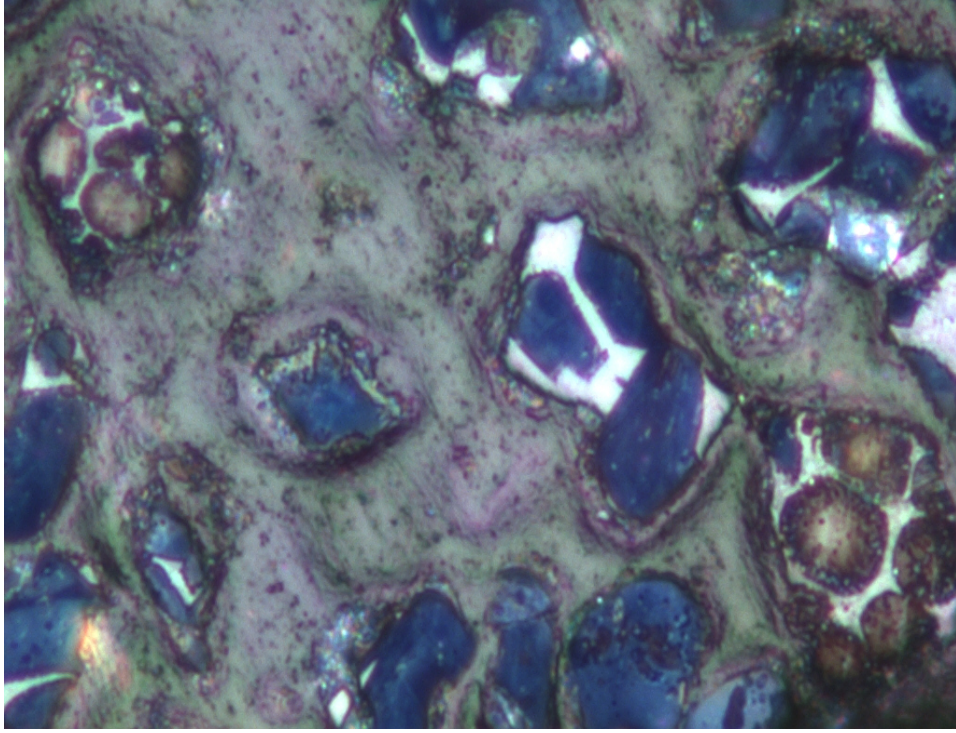


(b)

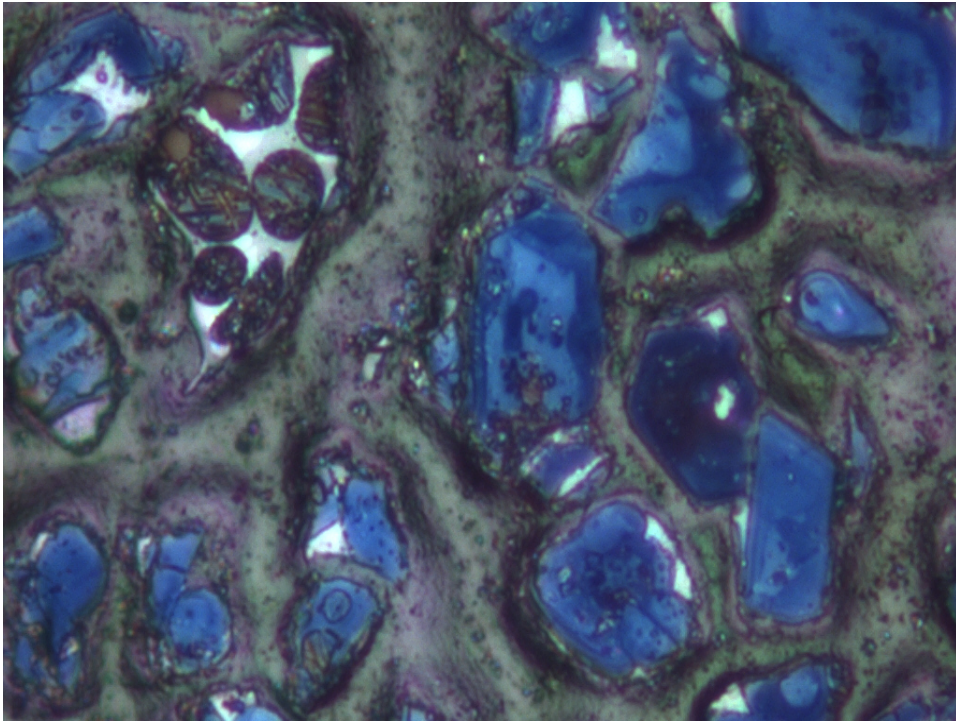


Şekil 5.10. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -45+38  $\mu\text{m}$  ürünleri (50x)

(a)



(b)



Şekil 5.11. Bilyalı değirmen (a) ve YBMD (b) -32+20  $\mu\text{m}$  ürünleri (50x)

Tüm tane alanları üzerinden YBMD ve bilyalı değirmen fraksiyonlarındaki alit, belit ve ara fazın alan yüzde dağılımları bulunmuş, sonuçlar Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. YBMD ve bilyalı değirmen fraksiyonlarının mineralojik bileşimleri

Fraksiyonlar µm	YBMD, %			Toplam	Bilyalı Değirmen, %			Toplam
	Alit	Belit	Ara faz		Alit	Belit	Ara faz	
-63+53	72.7	2.9	24.4	100.0	73.1	3.7	23.1	99.9
-45+38	77.9	4.5	17.5	99.9	76.4	2.8	20.8	100.0
-32+20	86.0	3.7	10.3	100.0	84.0	2.0	13.9	99.9

Çizelge 5.3'de verilen öğütme mekanizmalarına ait mineral faz dağılımları tane boyuna göre farklılık göstermektedir. Tane boyu incelidikçe alit miktarı artarken, ara faz miktarı azalmaktadır. Belit miktarının oldukça az olduğu dikkati çekmiş, literatürde benzer belit miktarına sahip örneklerle rastlanmıştır (Theisen, 1997).

Mineral fazlarının, tane boyu ve öğütme mekanizmasındaki farklılığa bağlı olarak, boyutlarındaki değişim; kristal büyüklüğü, Feret ortalaması, küresellik ve görünüm oranı gibi ölçümlerle belirlenmiştir. Kristal büyüklüğü, Clemex yazılımına göre, görüntüdeki alit kristalinin en uzun Feret çapı olarak tanımlanır. Feret uzunluğu bir objenin, belli bir açıda her iki yanından geçen ve birbirine paralel olan teğetleri arasındaki uzunluktur. Feret ortalaması, farklı açılarda kaydedilen Feret uzunluklarının ortalamasıdır. Bir objenin iki boyuttaki küreselliği ise, alanı ve çevresiyle ilgili olup aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir:

$$\frac{4\pi A}{P^2} \quad A: \text{alan} \quad P: \text{çevre} \quad (5.1)$$

Küresellik 0-1 arasında değer alabilir, 1 değeri tam küreselliği ifade eder.



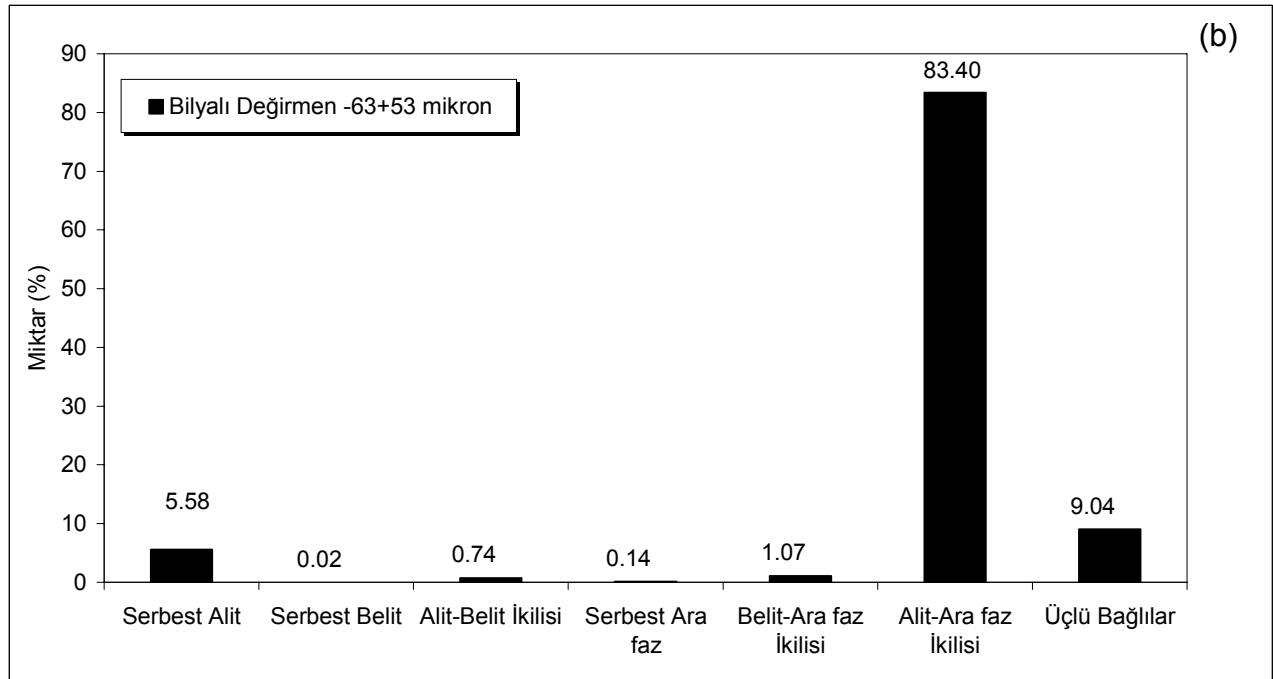
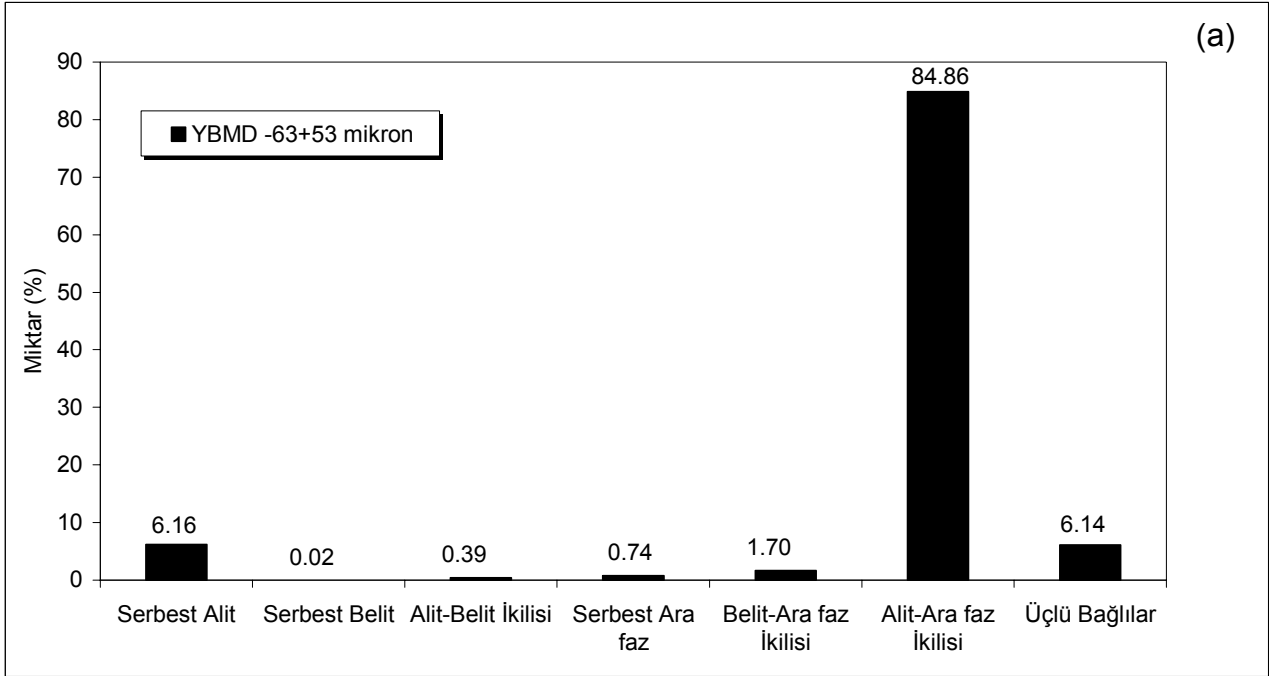
Görünüm oranı, objenin ölçülen en uzun Feret büyüklüğünün en kısa Feret büyüklüğüne oranıdır. Diğer bir deyişle uzunluğun genişliğe oranı olarak ifade edilir.

Her iki öğütme mekanizmasının fraksiyonlarındaki fazların büyüklük ve şekil karakteristikleri Çizelge 5.4'de verilmektedir. Beklendiği gibi tane boyu inceldikçe alit ve belitin kristal büyüklükleri de küçülmektedir. Belit mineralinin kristal büyüklüğü alite oranla daha küçüktür. Alit ve belit arasında özellikle görünüm oranı açısından farklılıklar görülmektedir. Alit için görünüm oranının, belite kıyasla daha yüksek olmasının nedeni, alit daha köşeli kristallenirken belitin daha yuvarlak kristaller halinde bulunması ile açıklanmaktadır. Belit için küresellik oranının 1'e daha yakın değerlerde çıkması da bunun ayrı bir göstergesidir.

Serbestleşme analizinde, tüm tane alanları üzerinden serbestleşme sınıf dağılımları belirlenmiştir. YBMD ve bilyalı değirmen -63+53  $\mu\text{m}$  fraksiyonları için serbestleşme sınıfları Şekil 5.12'de, -45+38  $\mu\text{m}$  fraksiyonları için Şekil 5.13'de ve -32+20  $\mu\text{m}$  fraksiyonlarının serbestleşme sınıfları ise Şekil 5.14'de verilmektedir. Her iki öğütme mekanizmasına ait üç fraksiyonda da alit genellikle ara faz ile bağlı tane konumundadır. Tane boyu inceldikçe alit-ara faz bağlı tane miktarı azalmakta, alitin serbest tanelerinin miktarı artmaktadır. Diğer beklenen bir sonuç; tane boyu inceldikçe üçlü bağlı tane oranının azalmasıdır. En dikkat çekici nokta ise, serbest alit miktarının tüm YBMD fraksiyonlarında bilyalı değirmen fraksiyonlarına göre daha fazla ölçülmesidir.

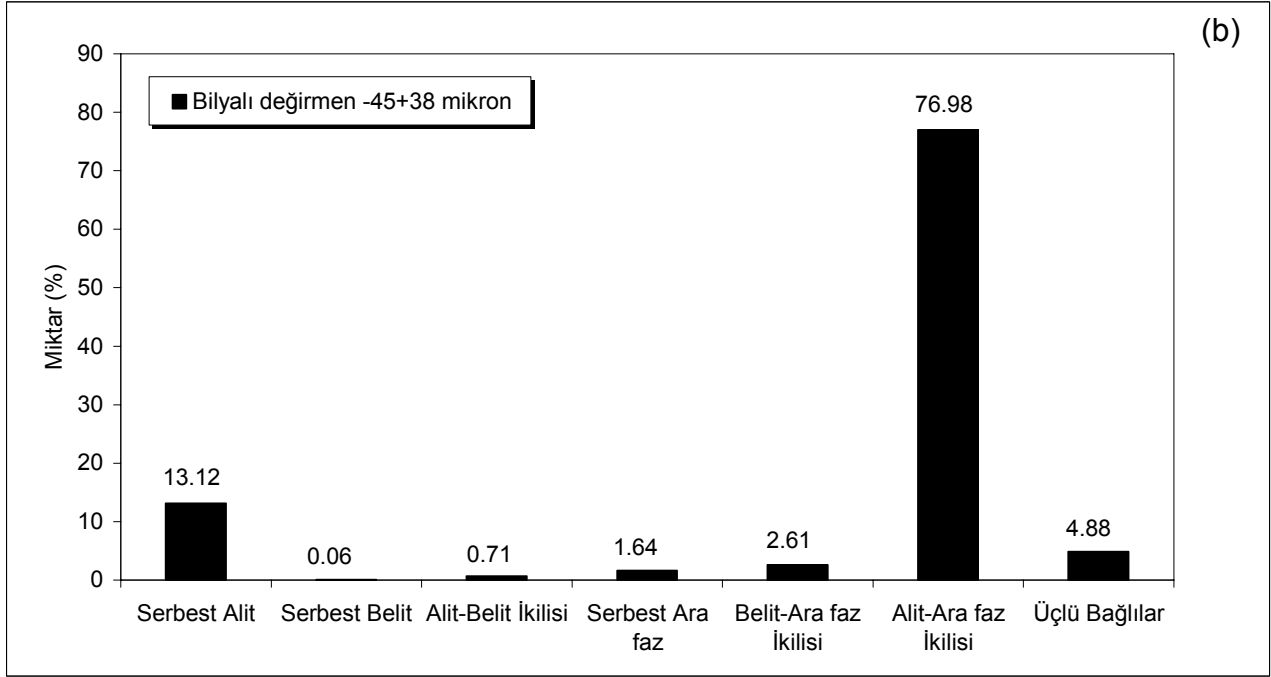
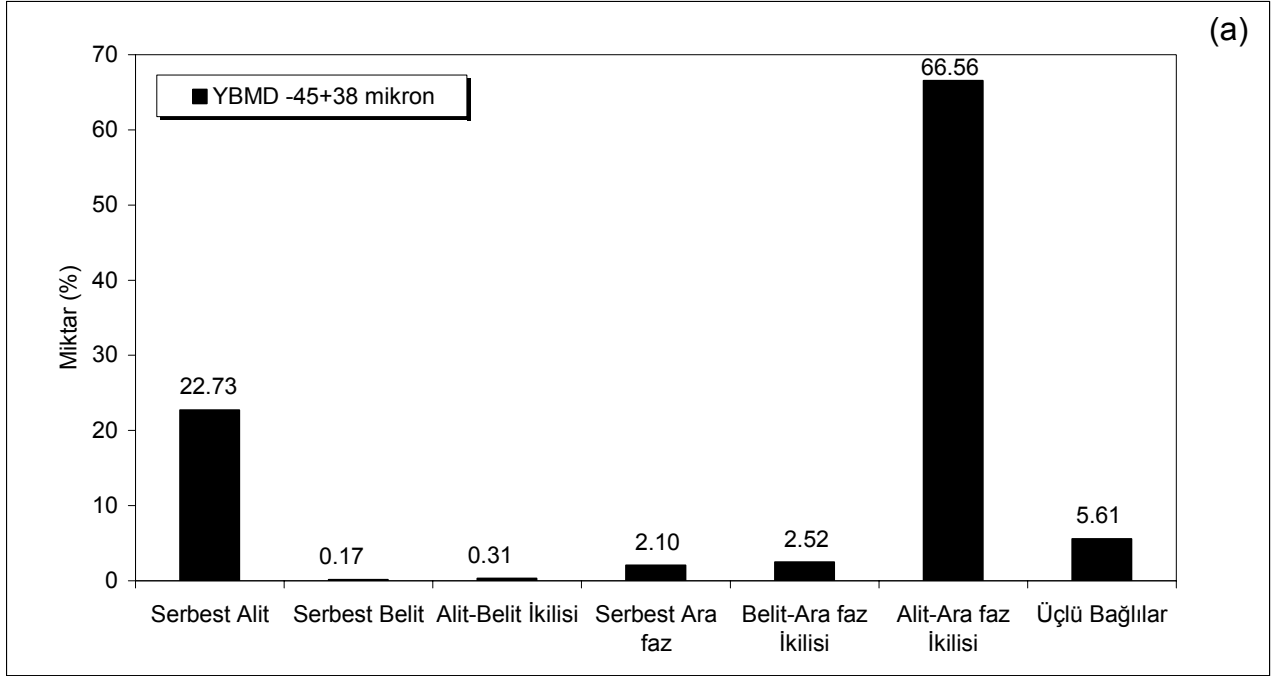
Çizelge 5.4. Alit ve belit kristallerinin dar tane boyu fraksiyonlarında büyüklük ve şekil özellikleri

<b>-63+53 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Alit</b>		<b>Belit</b>	
	<b>YBMD</b>	<b>Bilyalı D.</b>	<b>YBMD</b>	<b>Bilyalı D.</b>
Kristal Büyüklük, $\mu\text{m}$	Ortalama: 25.96 En büyük: 95.34 En küçük: 10.55	Ortalama:25.79 En büyük: 86.02 En küçük: 9.32	Ortalama:10.39 En büyük: 43.03 En küçük: 2.59	Ortalama: 9.79 En büyük: 58.95 En küçük: 2.47
Feret Ortalaması, $\mu\text{m}$	Ortalama: 21.36 En büyük: 72.81 En küçük: 8.36	Ortalama: 21.06 En büyük: 69.45 En küçük: 8.51	Ortalama: 8.81 En büyük: 35.21 En küçük: 2.03	Ortalama: 8.31 En büyük: 48.45 En küçük: 2.13
Küresellik Oranı	0.53	0.56	0.79	0.81
Görünüm oranı	1.76	1.79	1.54	1.52
<b>-45+38 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Alit</b>		<b>Belit</b>	
	<b>YBMD</b>	<b>Bilyalı D.</b>	<b>YBMD</b>	<b>Bilyalı D.</b>
Kristal Büyüklük, $\mu\text{m}$	Ortalama:17.98 En büyük: 57.22 En küçük: 6.63	Ortalama:18.18 En büyük: 58.91 En küçük: 6.66	Ortalama: 5.28 En büyük: 34.76 En küçük: 1.36	Ortalama: 4.97 En büyük: 22.67 En küçük: 1.24
Feret Ortalaması, $\mu\text{m}$	Ortalama:14.64 En büyük: 44.69 En küçük: 6.03	Ortalama:14.79 En büyük: 47.05 En küçük: 6.00	Ortalama: 4.47 En büyük: 30.98 En küçük: 1.20	Ortalama: 4.21 En büyük: 17.17 En küçük: 1.11
Küresellik Oranı	0.35	0.39	0.81	0.78
Görünüm oranı	1.85	1.84	1.54	1.66
<b>-32+20 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Alit</b>		<b>Belit</b>	
	<b>YBMD</b>	<b>Bilyalı D.</b>	<b>YBMD</b>	<b>Bilyalı D.</b>
Kristal Büyüklük, $\mu\text{m}$	Ortalama:16.6 En büyük: 70.9 En küçük: 4.2	Ortalama: 16.1 En büyük: 50.4 En küçük: 3.9	Ortalama: 5.1 En büyük: 25.2 En küçük: 1.2	Ortalama: 4.7 En büyük: 16.9 En küçük: 1.1
Feret Ortalaması, $\mu\text{m}$	Ortalama:13.65 En büyük: 51.8 En küçük: 3.3	Ortalama:13.18 En büyük: 40.2 En küçük: 3.1	Ortalama:4.37 En büyük: 18.9 En küçük: 1.9	Ortalama:4.00 En büyük: 15.6 En küçük: 1.0
Küresellik Oranı	0.49	0.50	0.84	0.85
Görünüm oranı	1.76	1.82	1.46	1.50

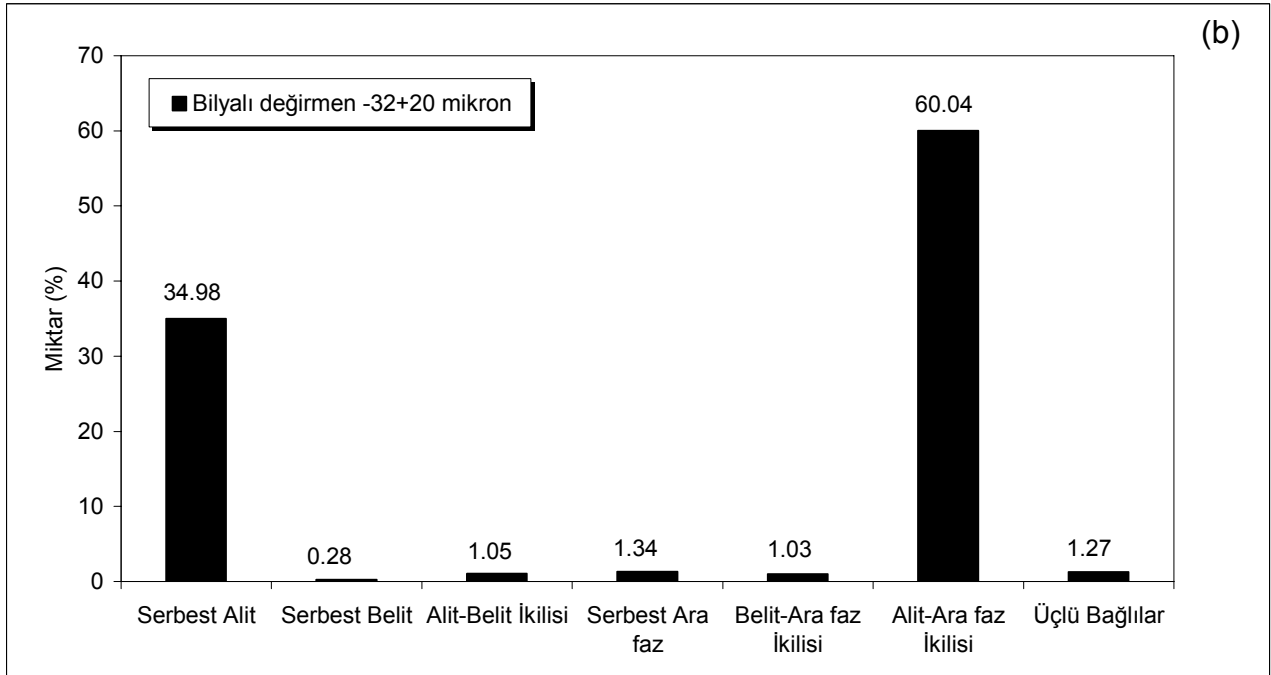
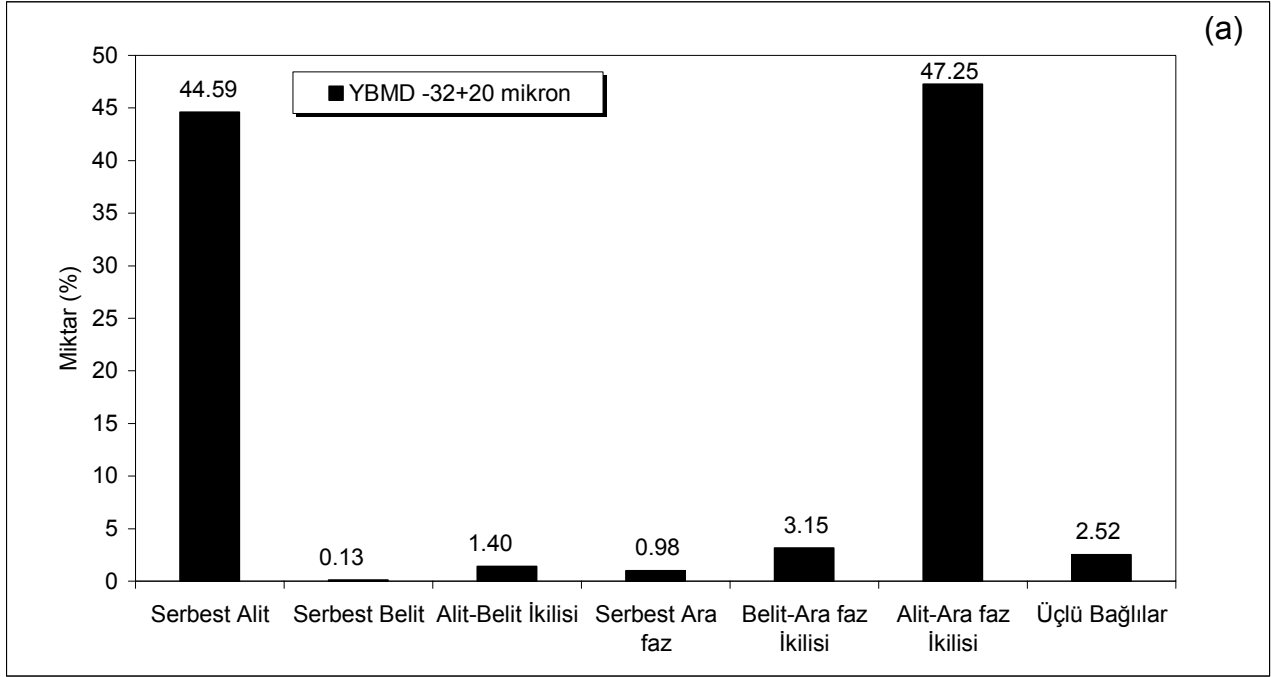


Şekil 5.12. YBMD (a) ve bilyalı değirmen (b) -63+53  $\mu\text{m}$  fraksiyonlarındaki serbestleşme sınıfları



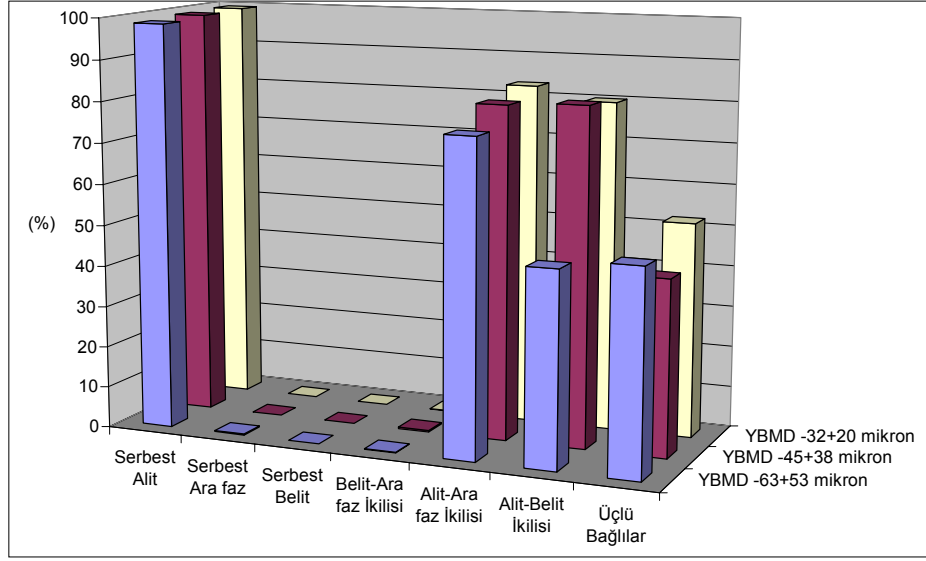


Şekil 5.13. YBMD (a) ve bilyalı değirmen (b) -45+38  $\mu\text{m}$  fraksiyonlarındaki serbestleşme sınıfları

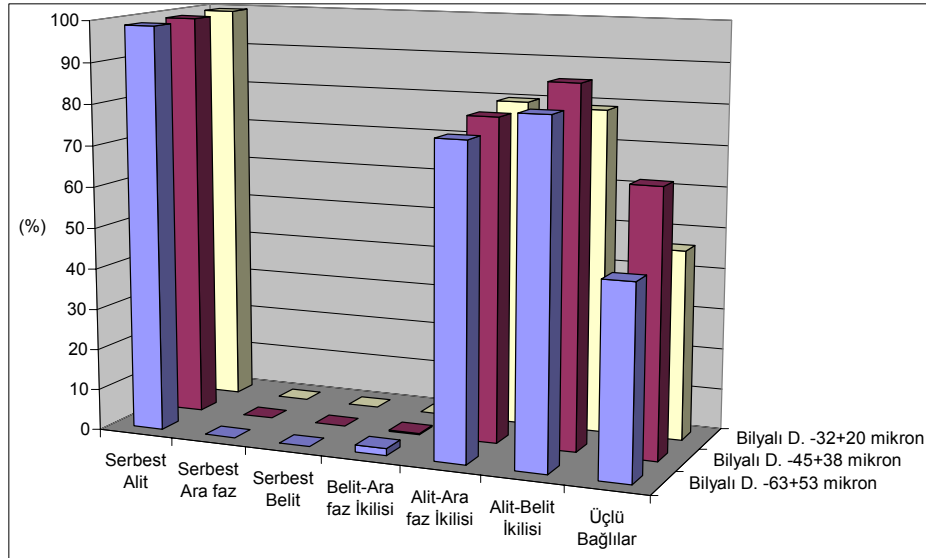


Şekil 5.14. YBMD (a) ve bilyalı değirmen (b) -32+20 µm fraksiyonlarındaki serbestleşme sınıfları

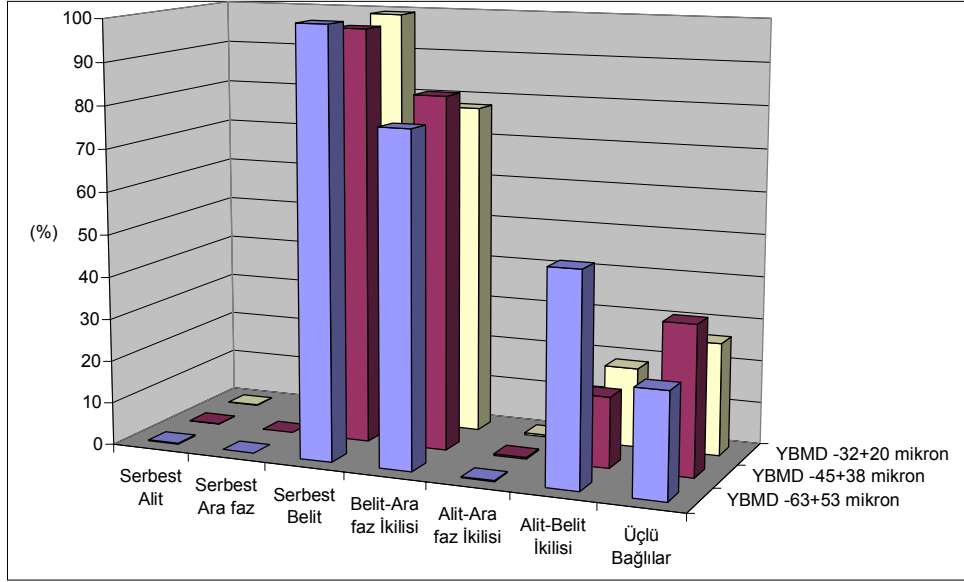
Serbestleşme sınıflarının algoritma içinde tanımları yapılırken serbestleşme sınırı olarak % 95 değeri kabul edilmiştir. Örneğin bir çimento tanesi içinde alan üzerinden alit miktarı % 95'den fazla ise, bu tane serbest alit olarak adlandırılmıştır. Eğer tane içinde her üç mineral de bulunuyor, fakat içlerinden biri % 5 sınırının altında kalıyor ise, bu tane diğer iki mineralin ikili bağlı tanesi olarak kabul edilmiştir. Alit, belit ve ara fazın her iki öğütme mekanizmasının fraksiyonlarındaki serbestleşme sınıfları içinde dağılımları sırasıyla Şekil 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 ve 5.20'de verilmektedir.



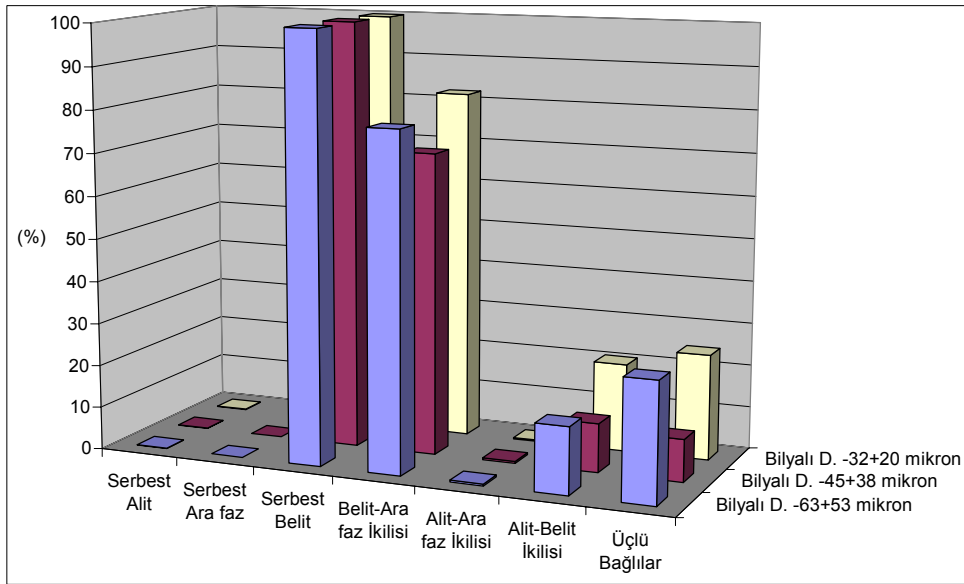
Şekil 5.15. Alit mineralinin YBMD fraksiyonlarındaki dağılımı



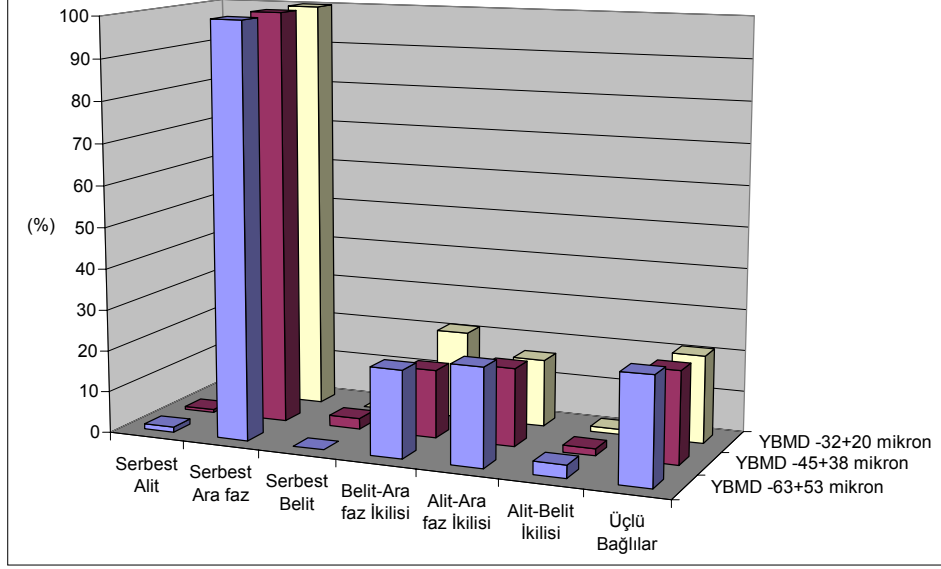
Şekil 5.16. Alit mineralinin bilyalı değirmen fraksiyonlarındaki dağılımı



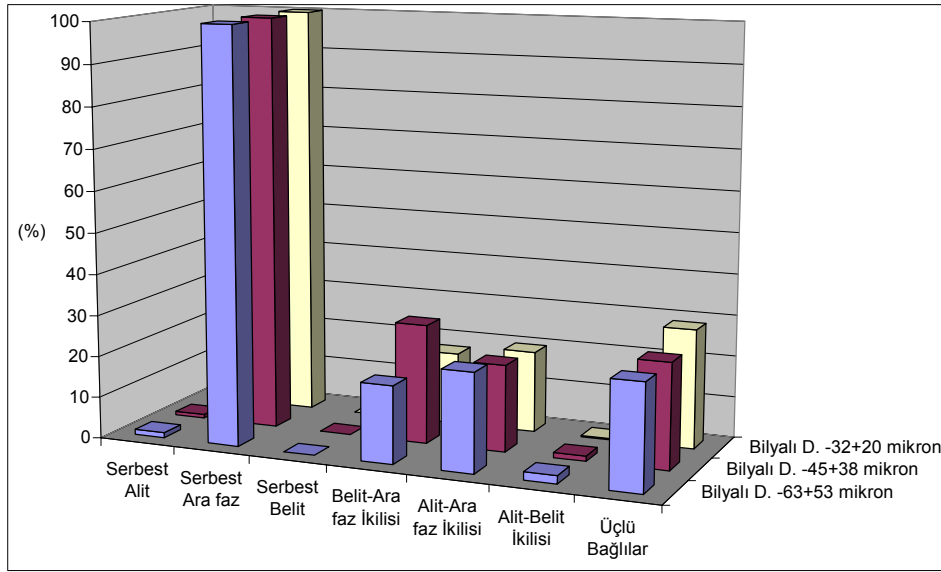
Şekil 5.17. Belit mineralinin YBMD fraksiyonlarındaki dağılımı



Şekil 5.18. Belit mineralinin bilyalı değirmen fraksiyonlarındaki dağılımı



Şekil 5.19. Ara faz mineralinin YBMD fraksiyonlarındaki dağılımı



Şekil 5.20. Ara faz mineralinin bilyalı değirmen fraksiyonlarındaki dağılımı

Şekillerden görüldüğü üzere alit ve belit minerallerinin ara faz ile yapmış oldukları ikili bağlı tanelerde, alit ve belit bulunma miktarı ara faza göre daha yüksektir.

Döner fırında 1250°C'den sonra alit minerali; belit ve ortamdaki CaO'in birbirleriyle tepkimeye girmesiyle oluşur. Bu tepkime yeteri hızda oluşmadığında ya da soğutma hızı yavaşladığında bazen bu tepkime tersinir duruma gelebilir ve bir miktar belit, alit

içinde düğmeler halinde kalabilir. Bu iki mineralin sertliği birbirinden farklı olup, belitin alite göre öğünebilirliği daha zordur. Öğütme mekanizmasındaki farklılığın alit içindeki gömülü belit miktarını etkilediği Çizelge 5.5'deki sonuçlardan görülmektedir. Tane boyu inceldikçe gömülü belit miktarı azalırken, her fraksiyon için bu miktar, YBMD ürünlerinde bilyalı değirmen ürünlerine göre daha az olmaktadır. Ayrıca, belitin alit içinde bulunduğu bağlı tane sayısının, bilyalı değirmen fraksiyonlarına göre YBMD fraksiyonlarında daha az olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 5.5. YBMD ve bilyalı değirmen ürün fraksiyonlarında gömülü belit miktarı

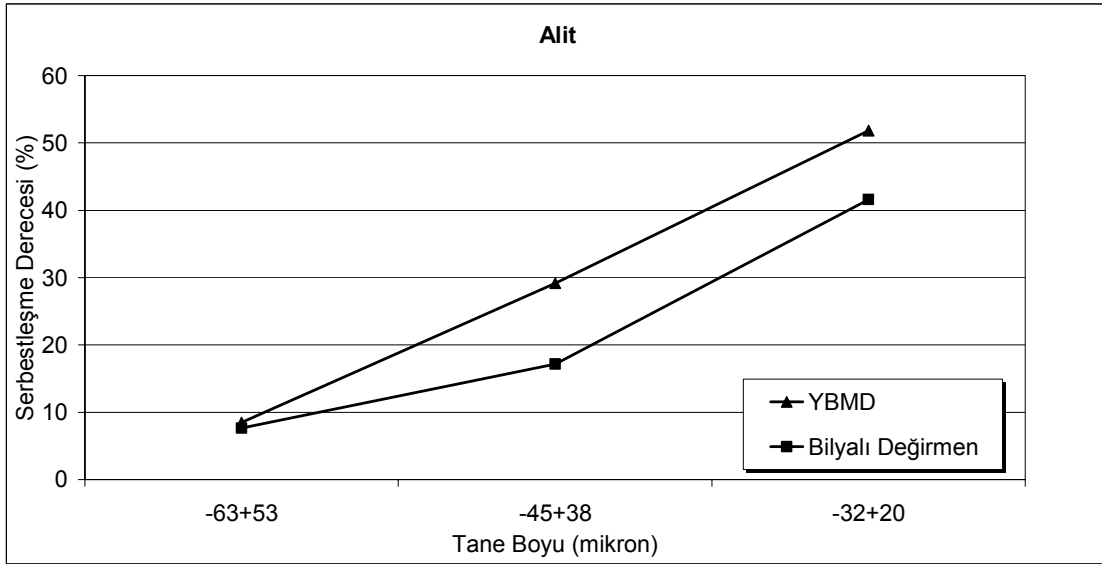
<b>-63+53 <math>\mu\text{m}</math></b>				
	Görüntü sayısı	Bağlı tane sayısı	Alit alanı (%)	Gömülü belit alanı (%)
YBMD	50	103	95.29	4.71
Bilyalı Değirmen	50	169	93.77	6.23
<b>-45+38 <math>\mu\text{m}</math></b>				
	Görüntü sayısı	Bağlı tane sayısı	Alit alanı (%)	Gömülü belit alanı (%)
YBMD	65	47	97.16	2.84
Bilyalı Değirmen	65	66	95.67	4.33
<b>-32+20 <math>\mu\text{m}</math></b>				
	Görüntü sayısı	Bağlı tane sayısı	Alit alanı (%)	Gömülü belit alanı (%)
YBMD	82	50	97.25	2.75
Bilyalı Değirmen	80	71	96.61	3.38

Mineral fazları için serbestleşme derecesi belirlenmiş, sonuçlar Çizelge 5.6'da verilmiştir. Serbestleşme derecesi, mineralin serbest miktarının örnek içindeki toplam miktarına oranlanmasıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 5.6. YBMD ve bilyalı değirmen fraksiyonlarındaki serbestleşme dereceleri

	Alit		Belit		Ara Faz	
	YBMD	Bilyalı değirmen	YBMD	Bilyalı değirmen	YBMD	Bilyalı değirmen
- 63+ 53 µm	8.47	7.63	0.84	0.54	3.04	0.60
-45+38 µm	29.17	17.16	3.78	2.10	11.97	7.88
-32+20 µm	51.84	41.59	3.68	15.49	9.40	9.55

Alit miktarının % 70'den fazla olduğu örneklerde, alit için serbestleşme derecesi tane boyu inceldikçe artmıştır. Özellikle -45+38 µm'dan başlayarak, YBMD ürünlerinde bilyalı değirmen ürünlerine göre daha fazla serbestleşme kaydedilmiştir. Belitin hem miktar bakımından az olması hem de alit kadar homojen dağılan bir mineral olmaması nedeniyle, serbestleşme derecesi hakkında bir yorum yapmak elde edilen sonuçlar ışığında mümkün değildir. Alit mineralinin serbestleşme derecesi ile öğütme mekanizması ve tane boyu arasındaki ilişki Şekil 5.21'de grafiklendirilmiştir.

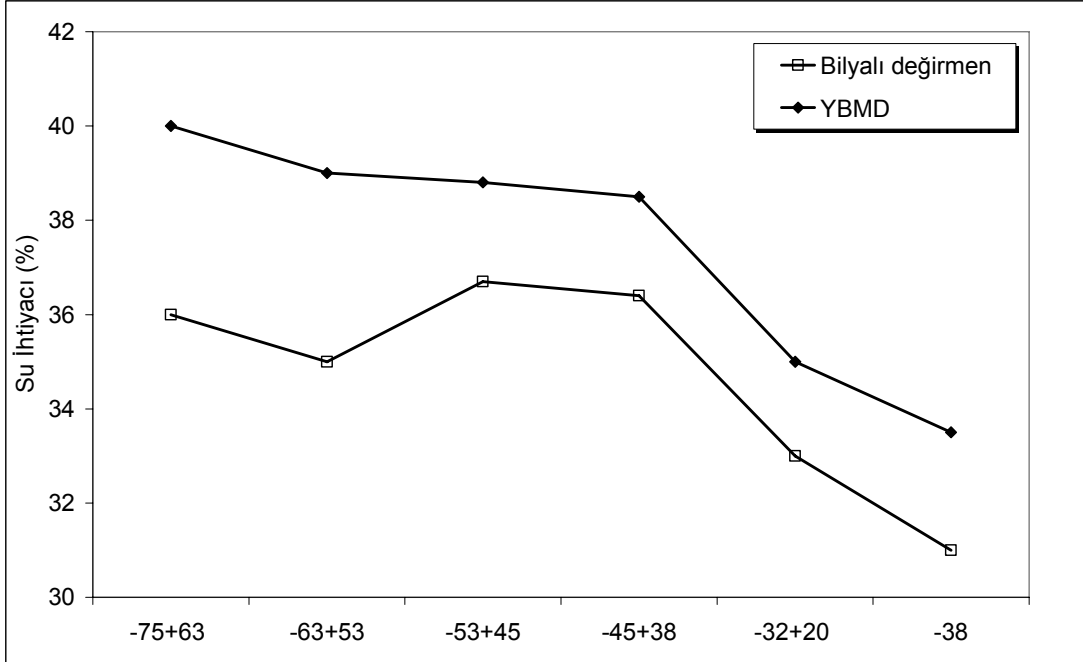


Şekil 5.21. Alit mineralinin öğütme mekanizmasına bağlı olarak tane boyu-serbestleşme derecesi ilişkisi

### 5.1.5. Servis Özelliklerinin Belirlenmesi

YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının su ihtiyacı, priz süresi ve basınç dayanımı gibi servis özellikleri belirlenmiş, değerler göreceli olarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Su ihtiyacını belirleme çalışmasında elde edilen değerler Şekil 5.22’de verilmektedir. Buna göre su ihtiyacı öğütme mekanizması ve tane boyuna göre değişmektedir. Su tüketimi özellikle YBMD fraksiyonlarında tane boyu inceldikçe azalırken, bilyalı değirmen fraksiyonlarına göre daha yüksek değerler almaktadır.



Şekil 5.22. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının su ihtiyacı

Priz süresi, deneysel yöntemde tanımlanan Vicat aleti ile belirlenmiş, prizin başladığı ve sona erdiği süreler kaydedilmiştir. -75+63 µm fraksiyonu oldukça iri tanelerden oluştuğu için hidrasyon süreci başlamamıştır. Literatürde “bleeding” olarak bilinen bu olay, suyun iri tanelerden dolayı malzemenin üstünde toplanmasıdır. Eklenen suyu



kusan bu fraksiyondan çimento hamuru oluşmamış, dolayısıyla basınç dayanımı testi yapılamamıştır.

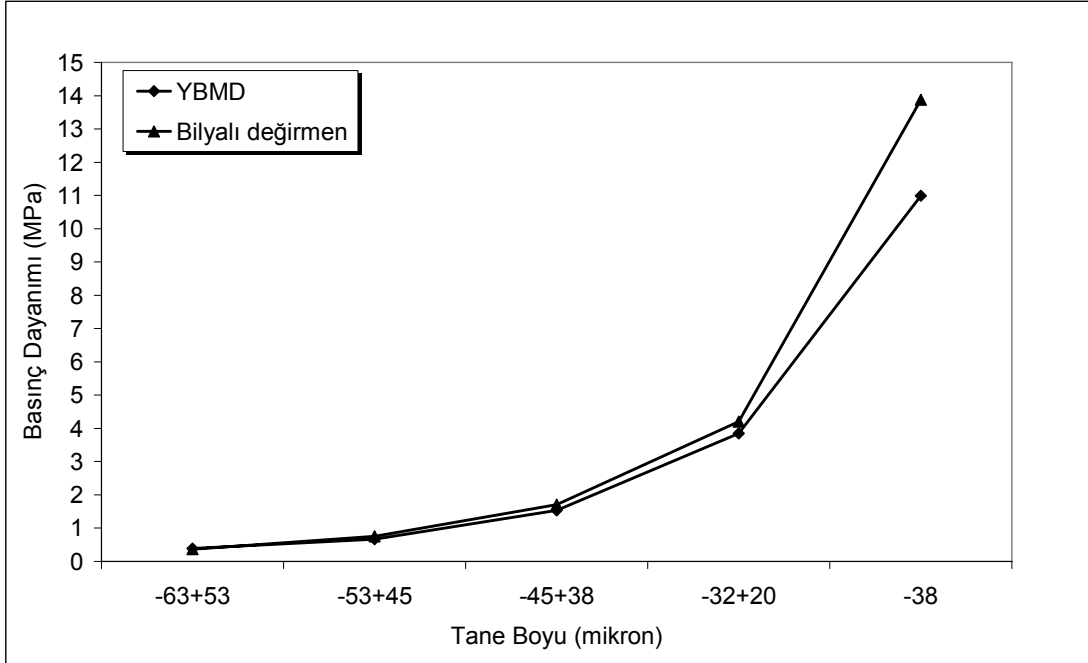
Priz süreleri Çizelge 5.7'de verilmektedir. Fraksiyonların tane boyu inceldikçe priz alma işlemi daha kısa sürede başlamış ve tamamlanmıştır. Dar tane boyu fraksiyonlarının priz sürelerinde öğütme mekanizmalarındaki farklılığa bağlı olarak herhangi bir değişim gözükmemektedir.

Çizelge 5.7. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının priz süreleri

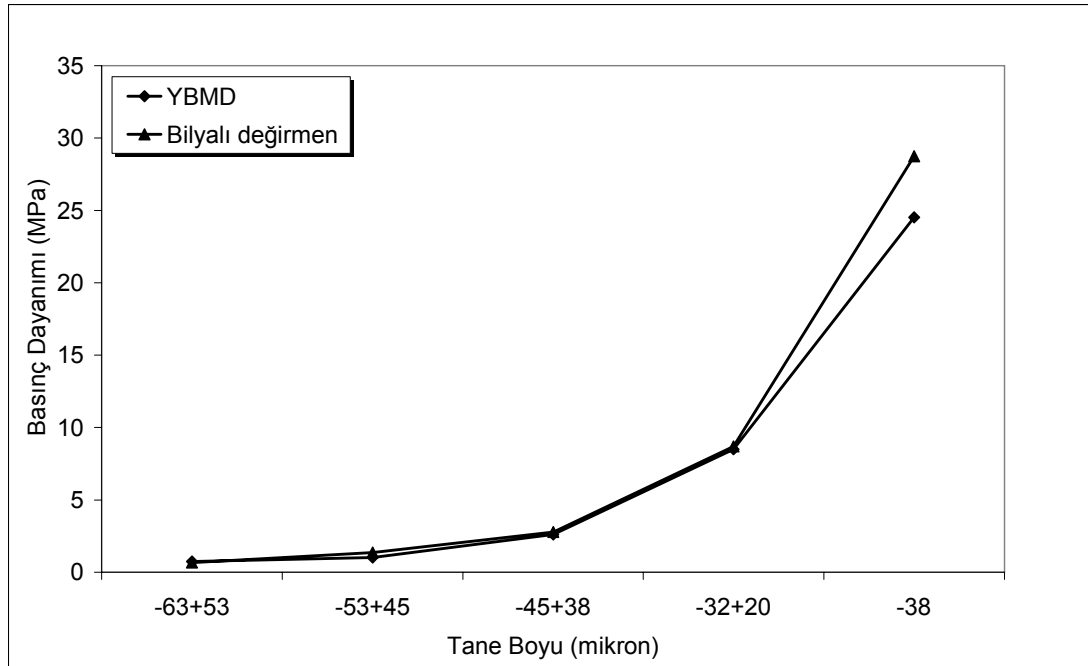
Fraksiyonlar µm	YBMD		Bilyalı Değirmen	
	Priz başlama	Priz sona erme	Priz başlama	Priz sona erme
-63+53	8 s 25 dk	12 s 25 dk	7 s 50 dk	12 s 05 dk
-53+45	7 s 15 dk	9 s 40 dk	7 s 35 dk	10 s 50 dk
-45+38	5 s 10 dk	7 s 00 dk	6 s 45 dk	8 s 50 dk
-32+20	5 s 00 dk	7 s 00 dk	5 s 05 dk	7 s 10 dk
-38	5 s 00 dk	6 s 55 dk	4 s 30 dk	6 s 55 dk

s.: saat, dk.: dakika

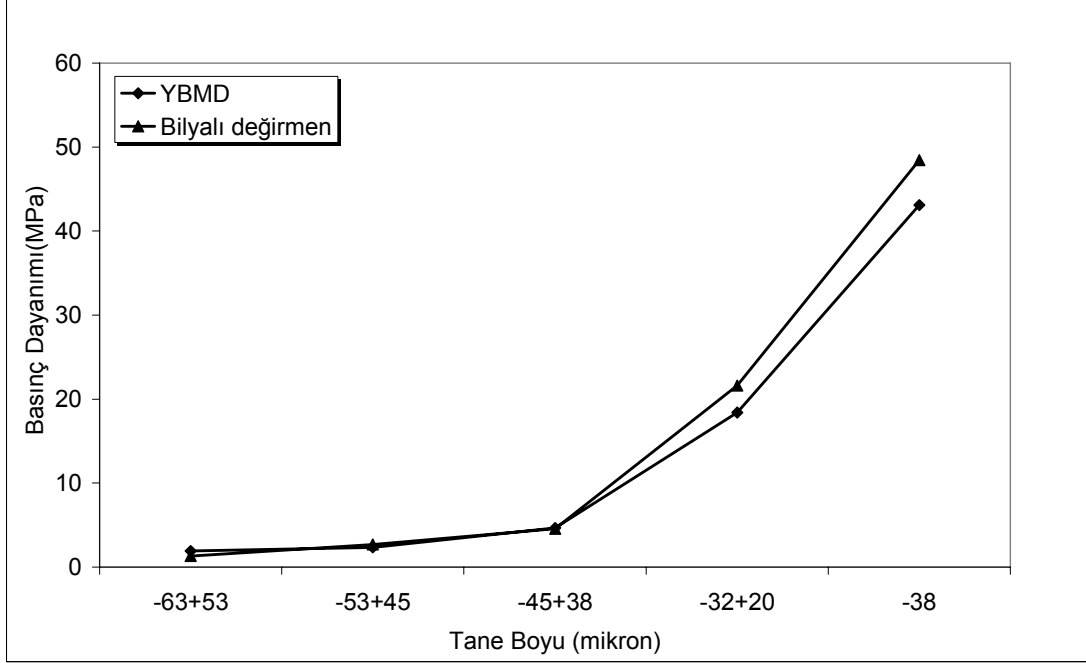
Basınç dayanım testi, serbestleşme ile dayanım arasında bir ilişki olup olmadığını belirleme amacıyla yapılmıştır. Su ortamında kürlenmiş dar tane boyu fraksiyonlarının 2, 7 ve 28 gün sonunda dayanım değerleri kaydedilmiştir. Serbestleşme analizinde özellikle miktarca çok olan alit mineralinin YBMD fraksiyonlarında daha yüksek oranda serbestleştiği görülmüş ve 2, 7 ve 28. günlerde elde edilen dayanım değerleri sırasıyla Şekil 5.23, 5.24 ve 5.25'de sunulmuştur. Her ne kadar çok büyük farklar olmasa da, tüm yaşlarda, özellikle -32+20 µm ve -38 µm fraksiyonlarında, bilyalı değirmen öğütme mekanizması daha yüksek dayanım değerleri vermektedir.



Şekil 5.23. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının 2 günlük basınç dayanımları



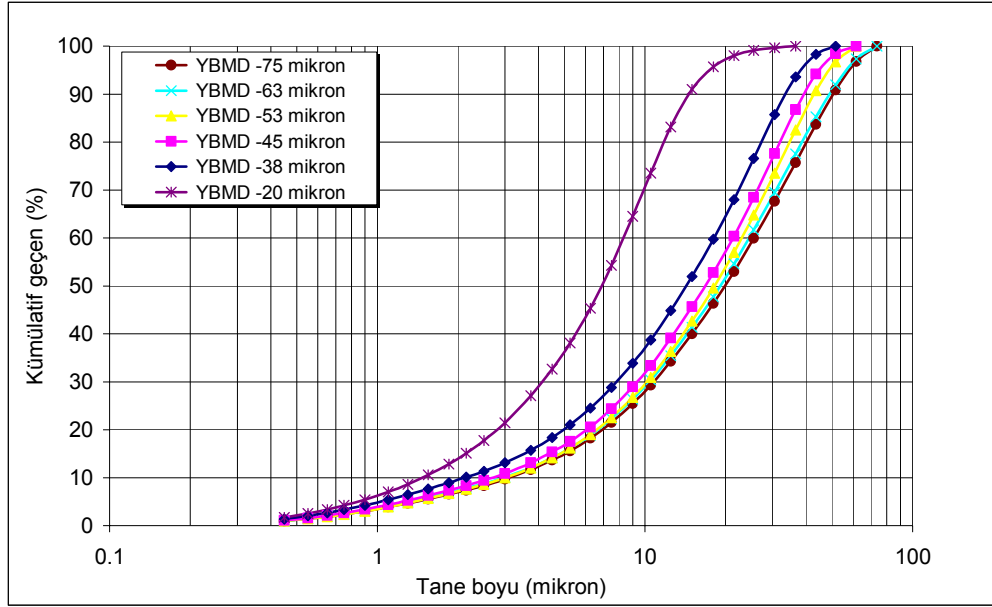
Şekil 5.24. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının 7 günlük basınç dayanımları



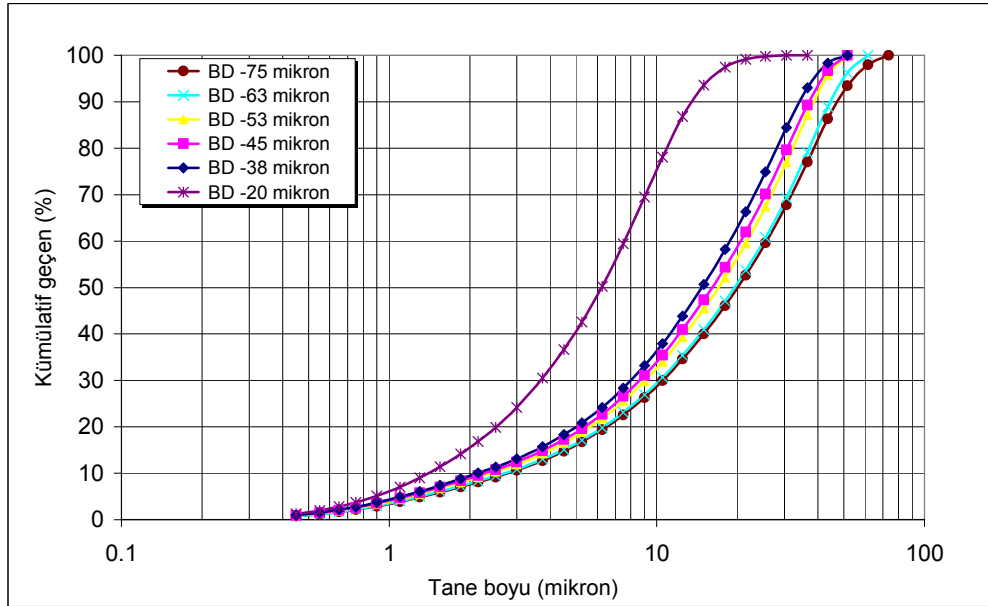
Şekil 5.25. YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının 28 günlük basınç dayanımları

## 5.2. Öğütme Mekanizması Farklılığının Dağılım Örneklerinde İncelenmesi

Oyak Bolu Çimento Fabrikası'ndan ikinci örnekleme döneminde alınan klinkerden, dar tane boyu fraksiyonları yerine dağılım örnekleri oluşturulmuştur. YBMD ürünü dağıtıldıktan sonra; -75  $\mu\text{m}$ , -63  $\mu\text{m}$ , -53  $\mu\text{m}$ , -45  $\mu\text{m}$ , -38  $\mu\text{m}$  ve -20  $\mu\text{m}$  tane boyu dağılımları hazırlanmıştır. Bilyalı değirmen ürünleri ise klinkerin, alçıtaşının katılmadığı durumda laboratuvar tipi bilyalı değirmende YBMD ürünü ile yaklaşık aynı dağılımı verecek şekilde öğütülmesi sonucu elde edilmiştir. Her iki öğütme mekanizmasının -20  $\mu\text{m}$  fraksiyonları laboratuvar tipi 3. nesil havalı separatör kullanılarak hazırlanırken, diğer fraksiyonlar eleme yöntemiyle oluşturulmuştur. YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerinin tane boyu dağılımları sırasıyla Şekil 5.26 ve 5.27'de verilmektedir.



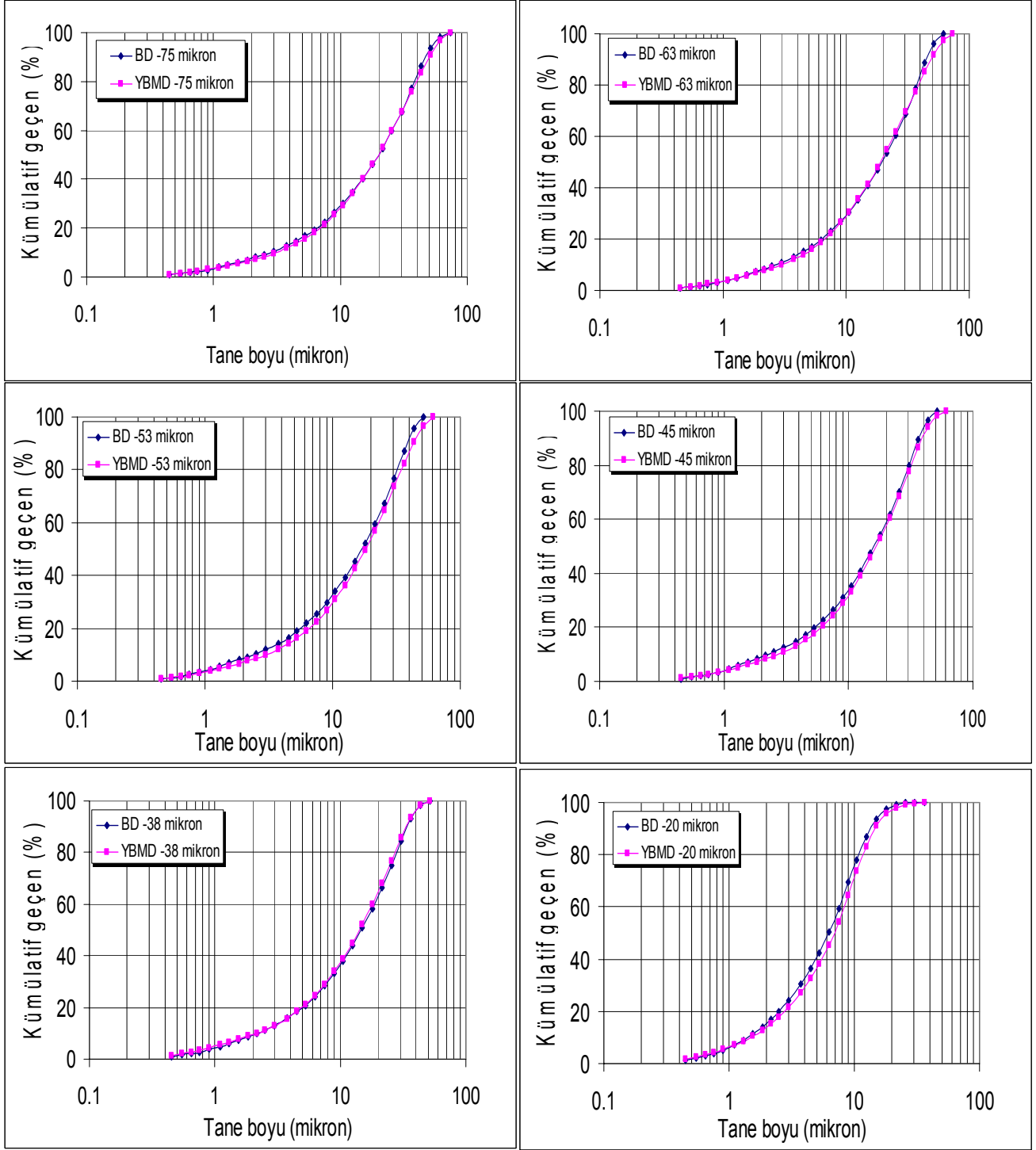
Şekil 5.26. YBMD ürünlerinin tane boyu dağılımları



Şekil 5.27. Bilyalı değirmen ürünlerinin tane boyu dağılımları

Örneklerin servis özelliklerinin karşılaştırılabilir olmasını sağlamak için; bilyalı değirmen ürün tane boyu dağılımları ile YBMD ürün tane boyu dağılımının benzer olmasına dikkat edilmiştir. Bu ürünlerden -75  $\mu\text{m}$ , -63  $\mu\text{m}$ , -53  $\mu\text{m}$ , -45  $\mu\text{m}$ , -38  $\mu\text{m}$  ve

-20 µm fraksiyonlarında hazırlanan örneklerin karşılaştırmalı tane boyu dağılım grafikleri Şekil 5.28’de sunulmuştur.



Şekil 5.28. YBMD ve bilyalı değirmen dağılım örneklerinin tane boyu dağılımları

### 5.2.1. Kimyasal Özellikler

Öğütme mekanizması ve incelik farklılığına bağlı olarak kimyasal yapıda bir değişim olup olmadığını görebilmek için seçilen fraksiyonlarda kimyasal analizler yapılmış, sonuçlar Çizelge 5.8’de verilmiştir. Buna göre,  $Al_2O_3$ ’deki küçük değişimler hariç, sonuçlarda önemli farkların oluşmadığı ve değerlerin standartlar çerçevesinde kaldığı görülmüştür.

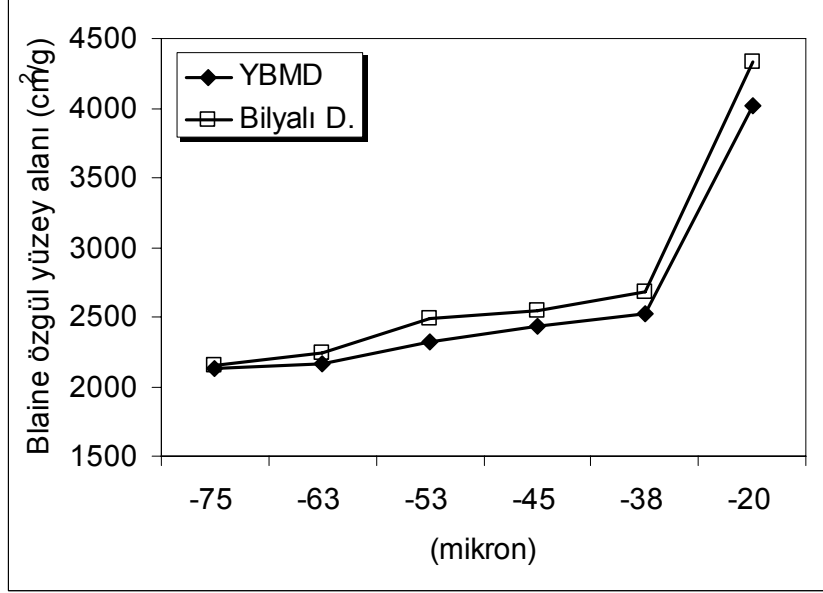
Çizelge 5.8. YBMD ve bilyalı değirmen ürün dağılımlarının kimyasal analizi

%	YBMD				Bilyalı Değirmen			
	-75 $\mu m$	-53 $\mu m$	-38 $\mu m$	-20 $\mu m$	-75 $\mu m$	-53 $\mu m$	-38 $\mu m$	-20 $\mu m$
CaO	67.12	67.15	67.11	66.69	66.89	66.97	66.8	66.28
SiO <sub>2</sub>	20.82	20.86	20.78	19.59	20.88	21.06	20.98	20.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.28	5.14	5.02	4.91	5.43	5.41	5.31	5.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.18	3.14	3.08	3.06	3.37	3.33	3.30	3.47
MgO	0.97	0.99	0.94	0.96	1.00	1.01	1.02	0.98
SO <sub>3</sub>	0.35	0.36	0.37	0.47	0.34	0.36	0.37	0.51
K <sub>2</sub> O	0.66	0.66	0.67	0.80	0.67	0.67	0.67	0.82
Na <sub>2</sub> O	0.51	0.50	0.48	0.52	0.59	0.54	0.55	0.52
Kızdırma kaybı	1.12	1.20	1.30	2.80	0.66	0.80	0.86	1.82

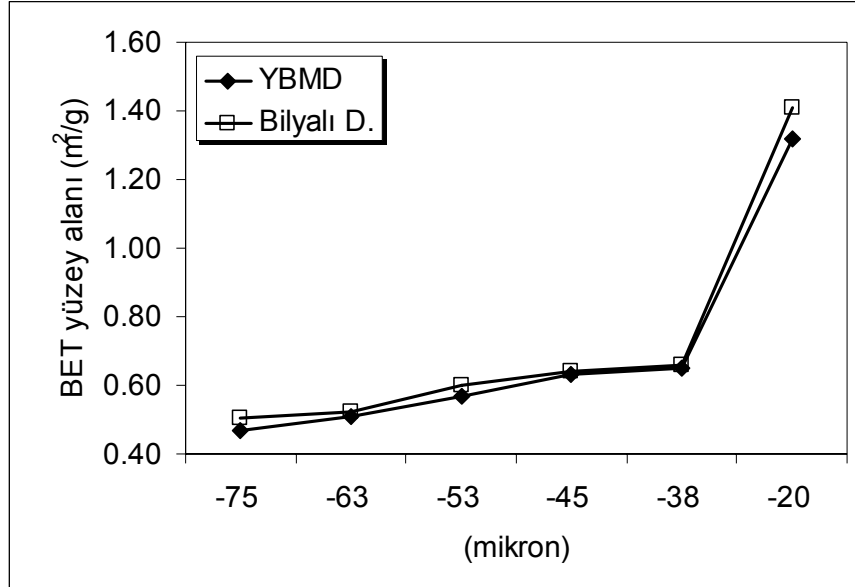
### 5.2.2. Yüzey Alanı Ölçümleri

Örneklerin yüzey alanı değerleri Blaine ve BET yöntemleriyle ayrı ayrı belirlenmiştir. Şekil 5.29’ da verilen Blaine özgül yüzey alanı grafiğine göre, bilyalı değirmen ürünleri YBMD ürünlerine oranla, en fazla % 7’lik bir farkla, daha fazla yüzey alanına sahiptir. Şekil 5.30’ daki BET yüzey alanı grafiğine göre ise, YBMD ürünleri ile bilyalı değirmen

ürünlerinin yüzey alanı değerleri birbirine daha yakındır. Dar tane boyu fraksiyonlarında YBMD ürünleri bilyalı değirmen ürünlerine göre daha fazla BET yüzey alanı verirken, aradaki bu fark; dağılım fraksiyonlarındaki ince malzemenin varlığından dolayı azalmıştır. YBMD ürünlerinin öğütme mekanizması sonucu daha çatlaklı bir yapı oluşturduğu bu sonuçlarla bir kez daha desteklenmektedir.



Şekil 5.29. YBMD ve bilyalı değirmen dağılım fraksiyonlarının Blaine özgül yüzey alanı değerleri



Şekil 5.30. YBMD ve bilyalı değirmen dağılım fraksiyonlarının BET yüzey alanı değerleri

### 5.2.3. Servis Özelliklerinin Belirlenmesi

YBMD ve bilyalı değirmen dağılım örneklerinin priz süresi, hacimsel sabitlik, su ihtiyacı ve basınç dayanımı gibi servis özellikleri belirlenmiştir. Çizelge 5.9 ve 5.10' da verilen sonuçlara göre, her iki öğütme mekanizma dağılımları standartlarda yer alan süreler içerisinde priz başlama ve sona ermesini tamamlamıştır. Öğütme mekanizmasındaki farklılığın priz süresine belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Priz başlama ve sona erme süreci her iki grubun -20 µm fraksiyonunda diğer fraksiyonlara oranla daha hızlı tamamlanmıştır. Bu sonuç, -20 µm fraksiyonunda daha fazla ince malzeme varlığından kaynaklanmakta ve bu incelikte bir çimentonun çok daha erken hidrate olacağını ifade etmektedir.

Çizelge 5.9. YBMD ürünlerinin priz süresi, su ihtiyacı ve hacimsel sabitlik özellikleri

Örnekler	Priz süresi, s.: saat, dk.: dakika		Su ihtiyacı, %	Hacim sabitliği, mm
	Başlama	Sona erme		
-75 µm	3 s 50 dk	4 s 15 dk	30.0	1
-63 µm	3 s 15 dk	4 s 35 dk	30.6	0
-53 µm	3 s 20 dk	4 s 20 dk	32.4	1
-45 µm	3 s 35 dk	4 s 30 dk	34.4	0
-38 µm	3 s 10 dk	4 s 35 dk	33.2	0
-20 µm	2 s 50 dk	3 s 40 dk	40.0	0

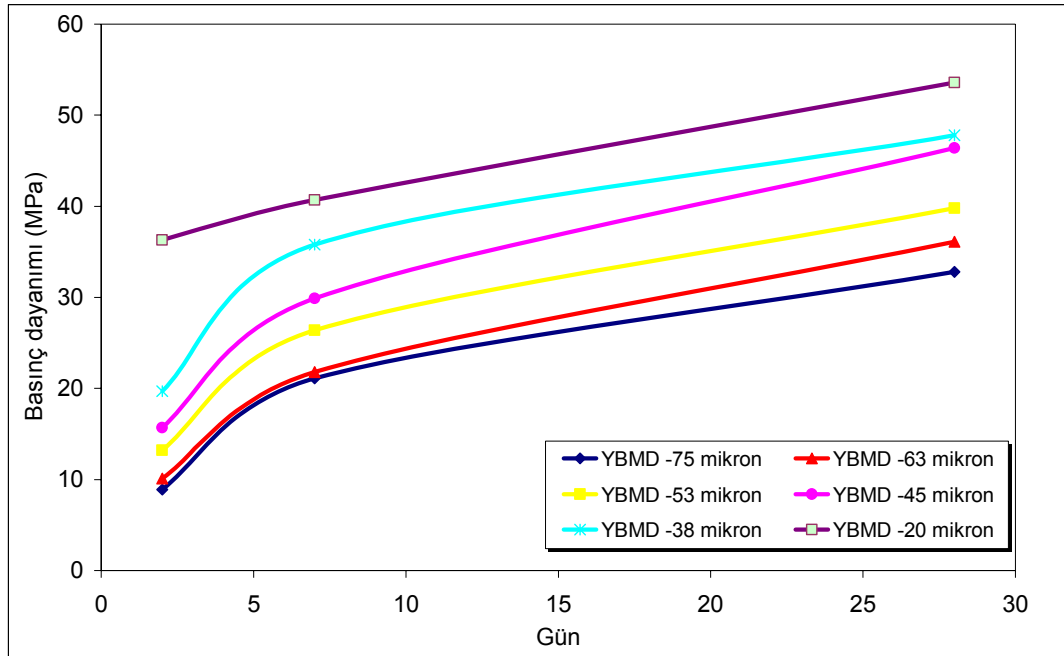
Hacimsel sabitlik açısından örneklerde herhangi bir genleşme görülmemiş, değerler, TS EN 197-1 standardında belirtilen en çok 10 mm sınırının altında kalmıştır. Örneklerin tane boyu inceldikçe su ihtiyacı artmıştır. YBMD ürünlerindeki su tüketiminin, bilyalı değirmen ürünlerine oranla, -20 µm hariç, daha fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuç, bir önceki örnek grubunda olduğu gibi YBMD ürünlerinin daha çatlaklı bir yapıda olduğunu ifade etmektedir.



Çizelge 5.10. Bilyalı değirmen ürünlerinin priz süresi, su ihtiyacı ve hacimsel sabitlik özellikleri

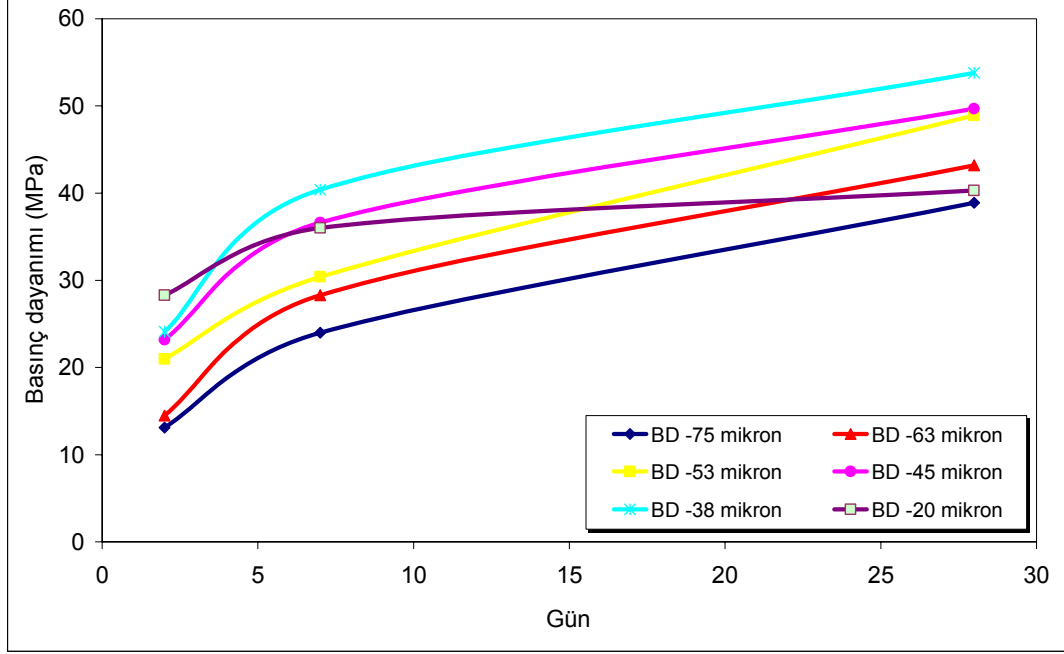
Örnekler	Priz süresi, s.: saat, dk.: dakika		Su ihtiyacı, %	Hacim sabitliği, mm
	Başlama	Sona erme		
-75 µm	3 s 05 dk	4 s 35 dk	29.2	0
-63 µm	3 s 00 dk	4 s 25 dk	29.6	0
-53 µm	3 s 05 dk	4 s 35 dk	30.0	1
-45 µm	3 s 20 dk	4 s 25 dk	31.6	0
-38 µm	3 s 20 dk	4 s 15 dk	33.0	0
-20 µm	2 s 55 dk	3 s 55 dk	42.0	0

YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerine % 5 öğütülmüş alçıtaşı katmak suretiyle 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanım testi uygulanmış, sonuçlar sırasıyla Şekil 5.31 ve 5.32'de grafiklendirilmiştir. YBMD ürün dağılımlarında tane boyu inceldikçe 2, 7 ve 28 günlük dayanım değerleri artmış; -75 µm ile -38 µm örneklerinin 28 günlük dayanımları arasında % 46'lık bir fark elde edilmiştir. Grafikten 2 ve 7 günlük dayanım gelişmesi izlendiğinde, -20 µm'luk örneğin erken dayanımının diğer örneklere oranla daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.31. YBMD ürün dağılımlarının 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanımı

Bilyalı değirmen ürünlerinde de benzer eğilim görülmüş; -38  $\mu\text{m}$ ' a kadar tane boyu incelidikçe dayanım değerleri artmıştır. -75  $\mu\text{m}$  ile -38  $\mu\text{m}$  örneklerinin 28 günlük dayanımları arasında % 38'lik bir fark elde edilmiştir. YBMD ürünlerinde en yüksek dayanımı -20  $\mu\text{m}$  dağılımı vermesine karşılık, bilyalı değirmen -20  $\mu\text{m}$  dağılımı daha çok ince içermesine rağmen düşük dayanım değeri vermiştir.

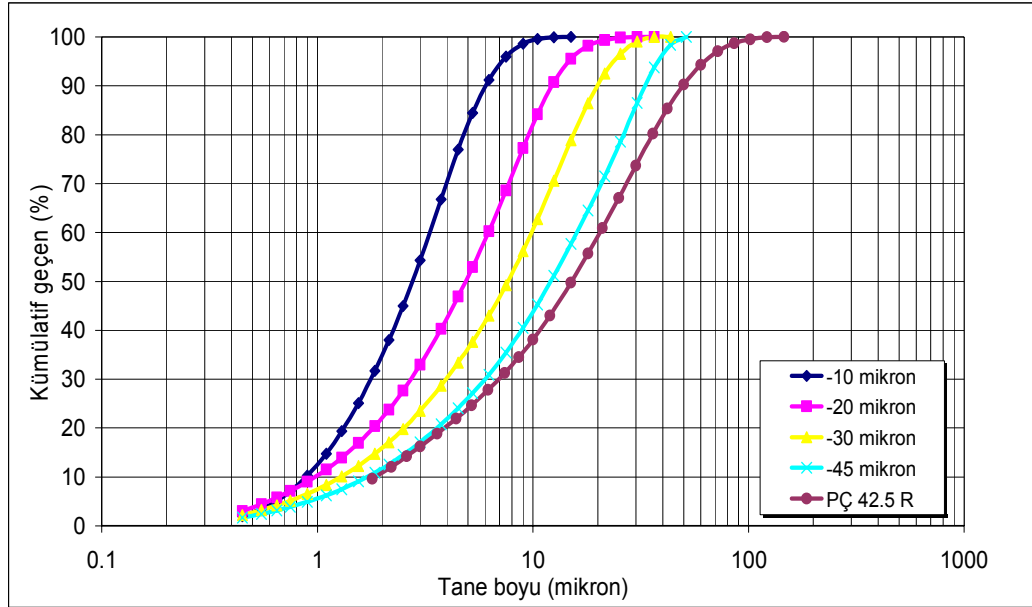


Şekil 5.32. Bilyalı değirmen ürün dağılımlarının 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanımı

### 5.3. Fiziksel Parametrelerin İncelenmesi

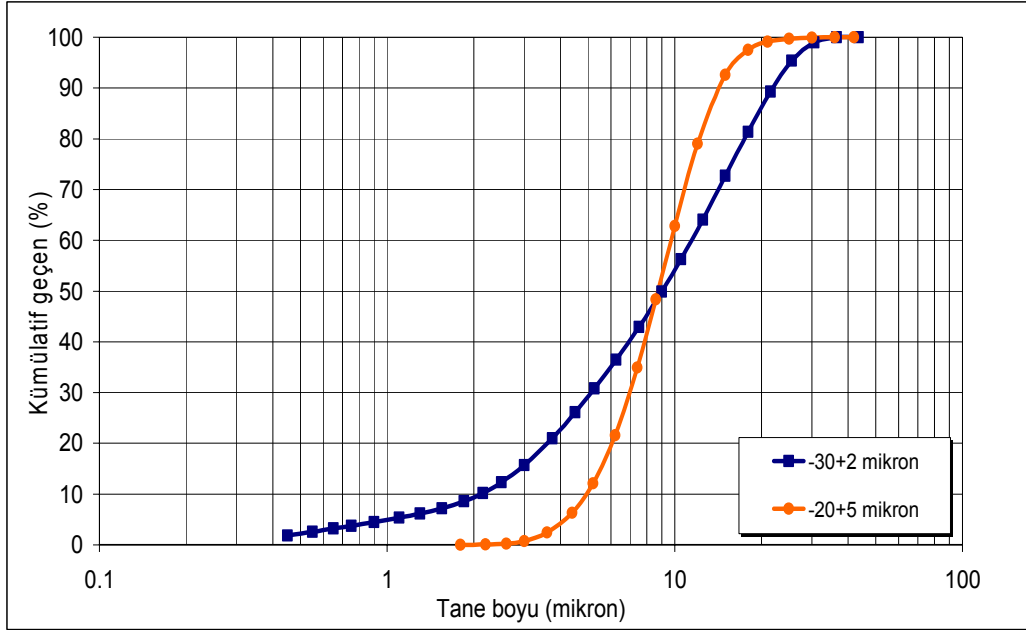
İncelik, tane boyu dağılımı ve dağılım eğrisinin eğimi gibi fiziksel parametrelerin, çimentonun servis özellikleri üzerindeki etkisini endüstriyel tipte bir çimentoda inceleyebilmek amacıyla Baştaş Çimento Fabrikası'ndan PÇ 42.5 R tipinde çimento örneği alınmıştır. Buradaki amaç; öğütme işlemi yapmadan, PÇ 42.5 R çimentosundan yapay olarak oluşturulan dağılımlarda, farklı fiziksel çimento özelliklerini inceleyebilmektir. Farklı incelik ve tane boyu dağılımlarında çimento örnekleri üretebilmek için laboratuvar ölçekli 3. nesil havalı separatör kullanılmıştır. PÇ 42.5 R' nin, separatörde farklı hava hızı ve rotor devri koşullarında ayrılmasıyla

-10 µm, -20 µm, -30µm ve -45 µm dağılımında oluşturulan örnekler ile PÇ 42.5 R'nin tane boyu dağılımları Şekil 5.33'de verilmektedir.



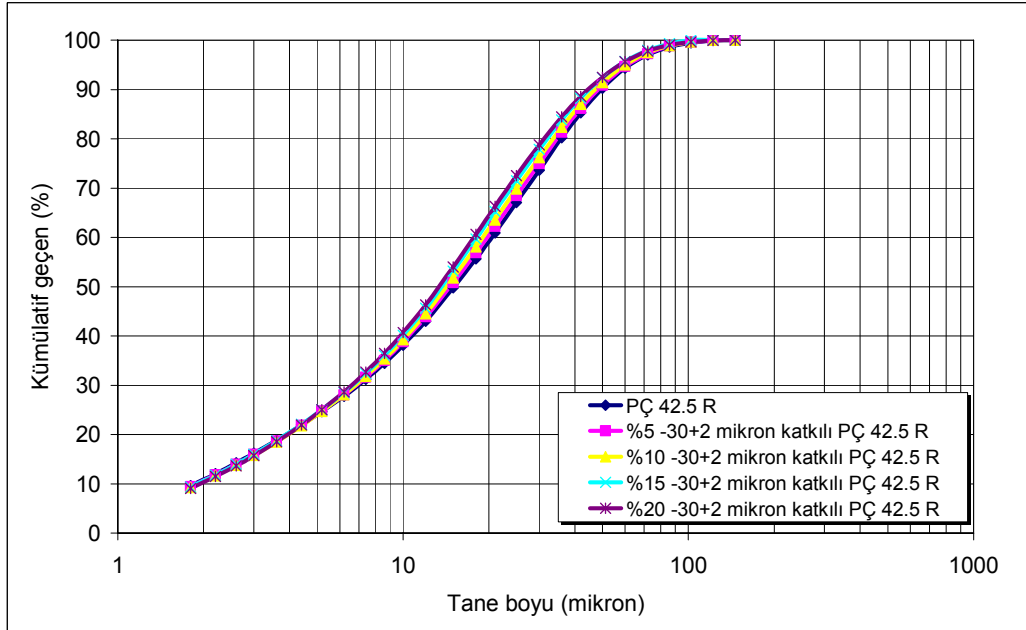
Şekil 5.33. PÇ 42.5 R ve PÇ 42.5 R'den oluşturulan dağılımlar

Çimento tane boyu dağılımının hangi aralıkta olması gerektiği, ya da hangi fraksiyonu ne oranda içermesi gerektiği gibi sorular uzun zamandır araştırma konusu olmuştur. Genel kabul; çimentoda 3-32 µm fraksiyonunun dayanım için çok önemli olduğu, 50-60 µm'luk tanelerin ise sadece dolgu görevi gördüğü ve dayanıma bir katkıda bulunmadıkları şeklindedir. Hatta 16-24 µm fraksiyonunun dayanımda daha etkili olduğu bile ifade edilmektedir (Tsivilis et.al, 1990). Çimento içindeki 3-32 µm fraksiyonunun dayanıma ne derece etki ettiğini inceleyebilmek için, havalı separatör ile PÇ 42.5 R örneğinden -30+2 µm dağılımı hazırlanmıştır. PÇ 42.5 R içindeki -30+2 µm miktarını kademeli olarak artırabilmek amacıyla, -30+2 µm örneği PÇ 42.5 R'ye % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında katılmıştır. Tane boyu dağılım eğrisi eğiminin, servis özellikleri üzerindeki etkisini inceleyebilmek için ise, daha dar tane boyu aralığı olan -20+5 µm dağılımındaki malzeme yine separatör kullanılarak hazırlanmıştır. -30+2 µm'dan farklı olarak katkı oranının etkisini daha iyi izleyebilmek için % 10, 20, 30 ve 40 oranlarında PÇ 42.5 R'ye eklenerek farklı eğimde yeni dağılımlar oluşturulmuştur. -30+2 µm ile -20+5 µm dağılımları Şekil 5.34'de verilmektedir.



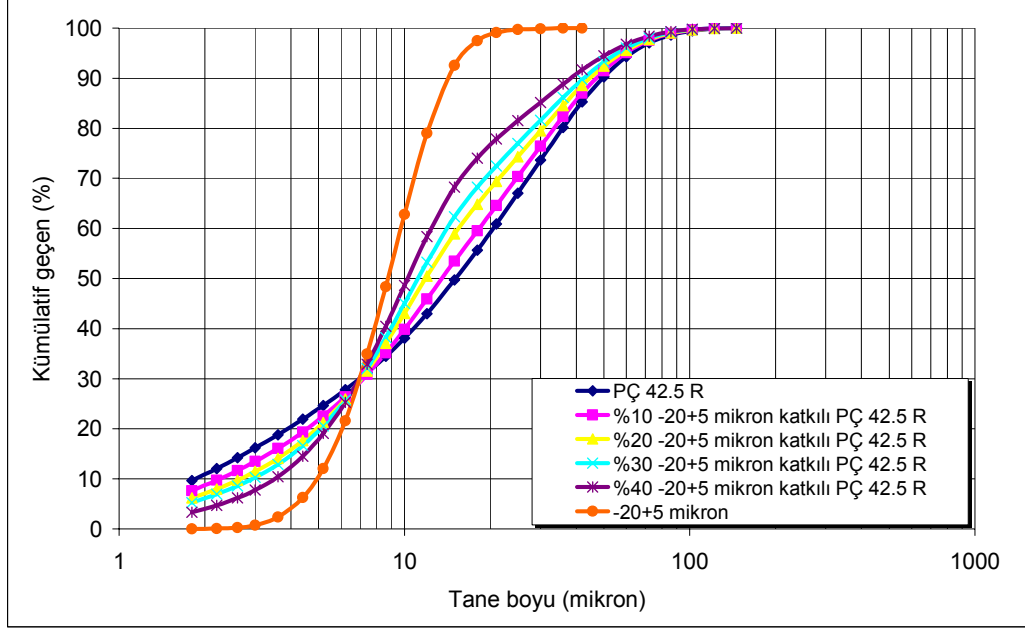
Şekil 5.34. PÇ 42.5 R örneğinden hazırlanan -30+2 µm ve -20+5 µm dağılımları

Şekil 5.35' de verilen tane boyu dağılımlarında, -30+2 µm örneğinin PÇ 42.5 R'ye farklı oranlarda katılmasıyla tane boyu dağılımı 10-40 µm aralığında, katılım oranıyla doğru orantılı olarak az miktarda incelmıştır.



Şekil 5.35. Farklı yüzdelerde -30+2 µm katılan PÇ 42.5 R dağılımları

Dağılım eğrisinin eğimini değiştirebilmek için PÇ 42.5 R'ye farklı yüzdelerde -20+5 µm katılarak oluşturulan dağılımlar Şekil 5.36'da verilmektedir. -20+5 µm katkı yüzdesi arttıkça daha dik dağılım eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 5.36. Farklı yüzdelerde -20+5 µm katılan PÇ 42.5 R dağılımları

### 5.3.1. Kimyasal Özellikler

PÇ 42.5 R'den, farklı inceliklerde oluşturulan dağılımların kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.11'de verilmektedir. Sonuçlardan; tane boyu inceldikçe  $SO_3$  miktarı ve kızdırma kaybının arttığı görülmektedir. PÇ 42.5 R üretiminde erken dayanım için % 5 kadar eklenen kalker, klinkere oranla daha kolay öğünebilir olduğundan ince boylarda yoğunlaşmaktadır. Bunun sonucu olarak,  $SO_3$  miktarı ve kızdırma kaybı özellikle -10 µm ve -20 µm dağılımlarında daha fazladır.

Çizelge 5.11. -10, -20, -30 ve -20 µm PÇ 42.5 R dağılımlarının kimyasal analiz sonuçları

%	-10 µm	-20 µm	-30 µm	-45 µm
CaO	60.39	60.95	62.01	62.48
SiO <sub>2</sub>	17.61	16.37	17.73	19.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.51	5.19	5.27	5.47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.96	2.57	2.6	2.71
SO <sub>3</sub>	5.18	5.12	4.16	3.05
MgO	1.38	1.35	1.38	1.42
Na <sub>2</sub> O	0.26	0.36	0.36	0.37
K <sub>2</sub> O	1.42	1.15	0.96	0.87
Kızdırma kaybı	7.63	6.35	5.02	3.56

PÇ 42.5 R, -30+2 µm ve -30+2 µm katkılı örneklerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.12'de verilmektedir. PÇ 42.5 R ile katkılı örneklerin kimyasal analiz değerleri, standartta tanımlanan sınırlar içinde yer almış ve örnekler arasında herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Çizelgedeki kalker katkı miktarı, PÇ 42.5 R üretiminde eklenen % 5'lik kalker miktarını ifade etmektedir.

Çizelge 5.12. PÇ 42.5 R, -30+2 µm ve -30+2 µm katkı örneklerin kimyasal analiz sonuçları

	PÇ 42.5 R	%5 -30+2 µm katkı PÇ 42.5 R	%10 -30+2 µm katkı PÇ 42.5 R	%15 -30+2 µm katkı PÇ 42.5 R	%20 -30+2 µm katkı PÇ 42.5 R	-30+2 µm
CaO	62.39	62.57	62.52	62.64	62.64	63.17
SiO <sub>2</sub>	20.45	20.49	20.46	20.46	20.53	20.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.71	5.71	5.70	5.70	5.70	5.68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.08	3.09	3.09	3.10	3.10	3.17
MgO	1.50	1.51	1.51	1.50	1.50	1.51
SO <sub>3</sub>	2.74	2.67	2.69	2.68	2.65	2.28
Cl <sup>-</sup>	0.013	0.013	0.013	0.013	0.012	0.012
Na <sub>2</sub> O	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.39
K <sub>2</sub> O	0.85	0.85	0.85	0.84	0.84	0.78
Kızdırma kaybı	3.20	3.17	3.19	3.15	3.30	3.55
Çözünmeyen kalıntı	1.95	0.64	0.65	0.55	0.40	0.61
Kalker katkı miktarı	4.93	4.88	4.70	4.93	5.04	5.83
Serbest kireç	0.61	0.6	0.61	0.60	0.61	0.55

-20+5 µm katılan PÇ 42.5 R örneklerinin kimyasal bileşimlerinin, katkı oranlarıyla değişip değişmediği incelenmiş, sonuçlar Çizelge 5.13'de verilmiştir. Tüm değerler standartta belirtilen sınırlar içerisinde yer almış, kimyasal bileşimde bir değişiklik görülmemiştir. -20+5 µm örneğinde kalker katkı miktarının diğer örneklere oranla daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.13. PÇ 42.5 R, -20+5 µm ve -20+5 µm katkılı örneklerin kimyasal analiz sonuçları

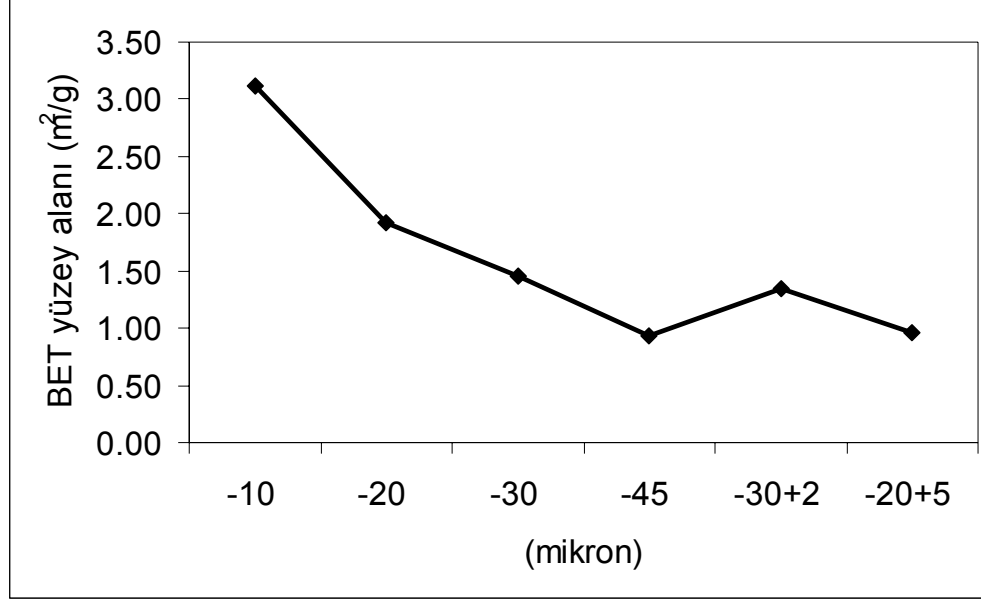
%	PÇ 42.5 R	%10	%20	%30	%40	-20+5 µm
		-20+5 µm katkılı	-20+5 µm katkılı	-20+5 µm katkılı	-20+5 µm katkılı	
		PÇ 42.5 R	PÇ 42.5 R	PÇ 42.5 R	PÇ 42.5 R	
CaO	62.39	63.00	62.94	63.23	63.27	63.76
SiO <sub>2</sub>	20.45	20.41	20.40	20.36	20.26	20.31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.71	5.68	5.68	5.65	5.62	5.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.08	3.07	3.07	3.07	3.06	3.04
MgO	1.50	1.50	1.49	1.49	1.49	1.47
SO <sub>3</sub>	2.74	2.83	2.94	3.08	3.13	3.34
Cl <sup>-</sup>	0.013	0.012	0.013	0.013	0.012	0.012
Na <sub>2</sub> O	0.40	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22
K <sub>2</sub> O	0.85	0.84	0.83	0.83	0.82	0.76
Kızdırma kaybı	3.20	3.49	3.67	3.81	3.89	4.57
Çözünmeyen kalıntı	1.95	0.31	0.29	0.38	0.49	0.34
Kalker katkı miktarı	4.93	5.54	5.79	5.99	5.88	7.01
Serbest kireç	0.61	0.63	0.62	0.60	0.57	0.46

### 5.3.2. Yüzey Alanı Ölçümleri

PÇ 42.5 R dağılım örnekleri ile -30+2 µm ve -20+5 µm örneklerinin yüzey alanları BET yöntemiyle ölçülmüş; sonuçlar Şekil 5.37'de verilmiştir. Beklendiği gibi tane boyu irileştikçe yüzey alanı azalmıştır. Şekil 5.34'de verilen -20+5 µm ile -30+2 µm tane boyu dağılımlarından, -20+5 µm'un daha dar bir dağılımda olduğu görülmektedir.

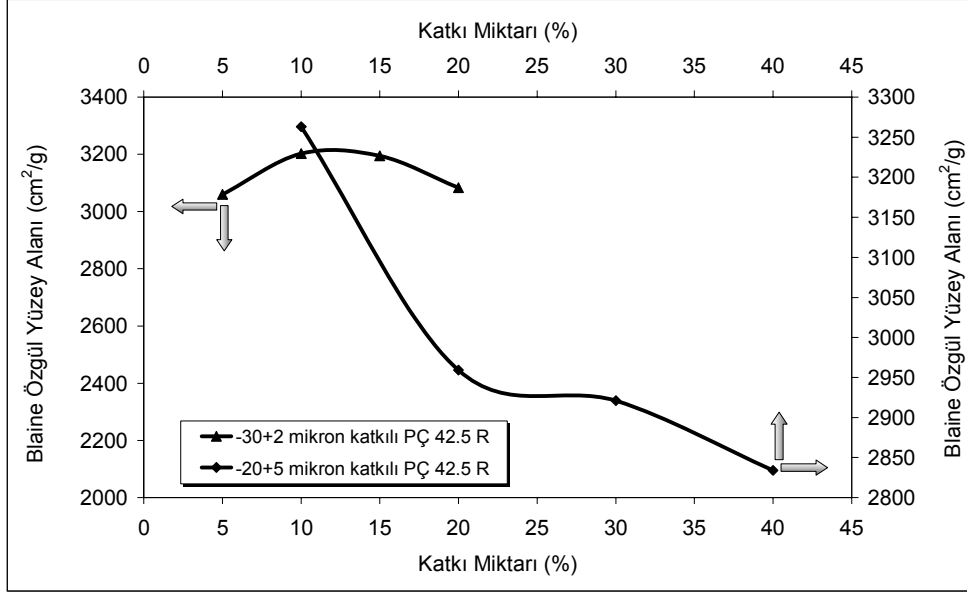


Hem dar tane boyu aralığı, hem de dağılımda 5 µm'dan ince tanelerin daha az miktarda olması yüzey alanı değerini azaltmakta, grafikten -20+5 µm'un, -30+2 µm'a göre daha az yüzey alanına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.37. PÇ 42.5 R dağılım örnekleri ile -30+2 µm ve -20+5 µm örneklerinin BET yüzey alanı değerleri

-30+2 µm ile -20+5 µm örneklerinin farklı yüzdelerde PÇ 42.5 R'ye katılmasıyla oluşturulan örneklerin Blaine özgül yüzey alanı değerleri Şekil 5.38'de verilmektedir. -30+2 µm katılan örneklerde, katılım yüzdesi arttıkça tane boyu dağılımı az da olsa incelmış; yüzey alanı 3000-3200 Blaine arasında değerler almıştır. Ancak, -20+5 µm örneği, PÇ 42.5 R'ye katıldığında örneklerin dağılım eğrilerinin eğimi dikleşmiş; bunun sonucu olarak katkı yüzdesi arttıkça yüzey alanı değerleri azalmıştır. Grafik üzerindeki okların yönü, eğri üzerindeki değerlerin ait olduğu eksenleri göstermektedir.



Şekil 5.38. -30+2 µm ve -20+5 µm katkıli PÇ 42.5 R örneklerinin Blaine özgül yüzey alanı karşılaştırması

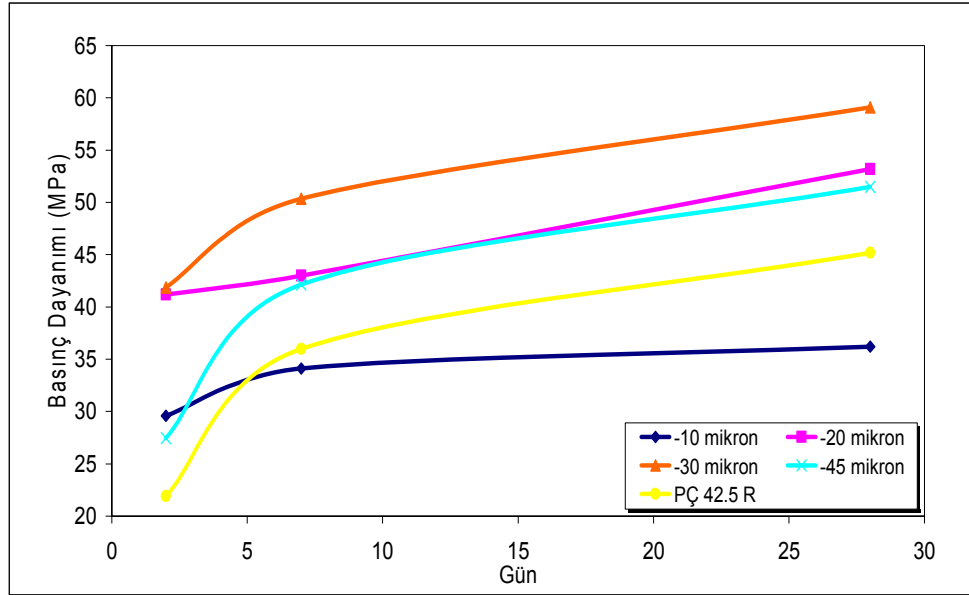
### 5.3.3. Servis Özelliklerinin Belirlenmesi

Servis özelliklerinden priz süresinin tayini ve hacimsel sabitlik testi -20 µm, -30 µm ve -45 µm PÇ 42.5 R örnekleri için yapılmış, sonuçlar Çizelge 5.14'de verilmiştir. -10 µm örneği için de analizler denenmiş, çok ince malzeme içermesi nedeniyle işlemler standartlara uygun gerçekleştirilememiştir. Priz süresi ve hacimsel sabitlik değerleri TS EN 197-1 standardında belirtilen sınırlar içerisinde yer almış; tane boyu irileştikçe priz başlama ve sona erme süresi uzamıştır. Hacimsel sabitlik değerlerinde tane boyuna bağlı olarak herhangi bir değişim görülmemiştir.

Çizelge 5.14. -20 µm, -30 µm ve -45 µm PÇ 42.5 R dağılımlarının priz süresi ve hacimsel sabitlik test sonuçları

Örnekler	Priz süresi, s.:saat, dk.:dakika		Hacimsel sabitlik, mm
	Başlama	Sona erme	
-20 µm	2 s 25 dk	3 s 20 dk	1
-30 µm	2 s 30 dk	3 s 20 dk	1
-45 µm	2 s 50 dk	3 s 45 dk	1

Şekil 5.27’de tane boyu dağılımları verilen PÇ 42.5 R, -10 µm, -20 µm, -30 µm ve -45 µm örneklerinin 2, 7, 28 günlük basınç dayanım testleri yapılmış, sonuçlar Şekil 5.39’da grafiklendirilmiştir.

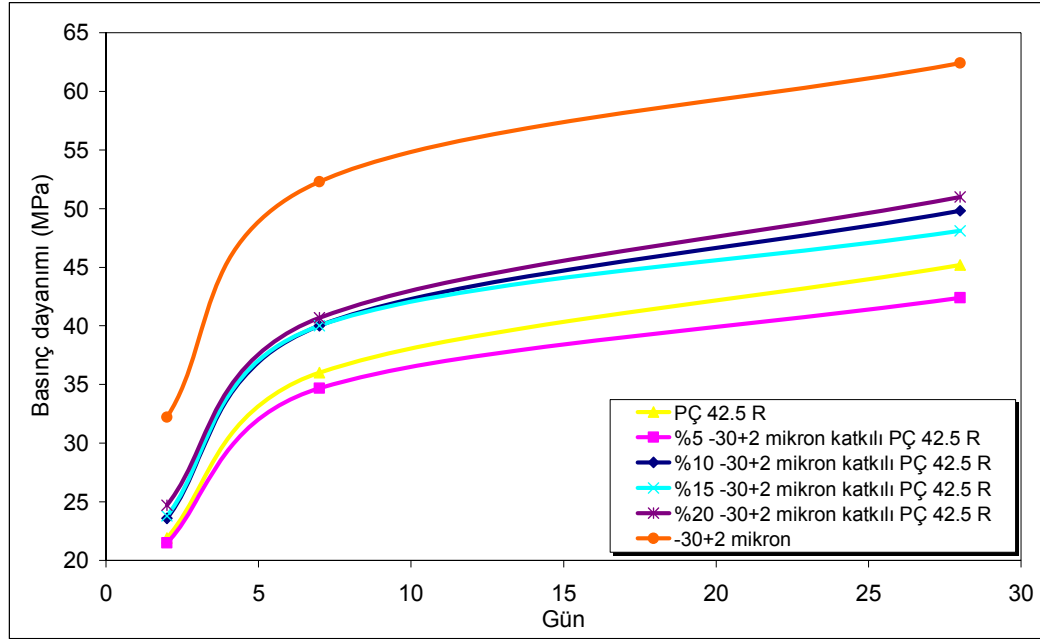


Şekil 5.39. PÇ 42.5 R ile -10 µm, -20 µm, -30 µm ve -45 µm örneklerinin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

Şekil 5.39’ da verilen dayanım grafiğine göre, inceliğin 2 günlük çimento erken dayanımı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Ancak 10-15 µm’a kadar olan inceliklerde 7 ve 28 günlük geç dayanım olumsuz yönde değişmektedir. Örneğin; -10 µm örneği erken dayanımda PÇ 42.5 R ve -45 µm’dan daha yüksek bir

değer alırken, 28 günlük dayanım değerlerinde bu durum tersine dönmüştür. Diğer yandan en yüksek dayanımı tüm yaşlarda -30 µm örneği vermektedir.

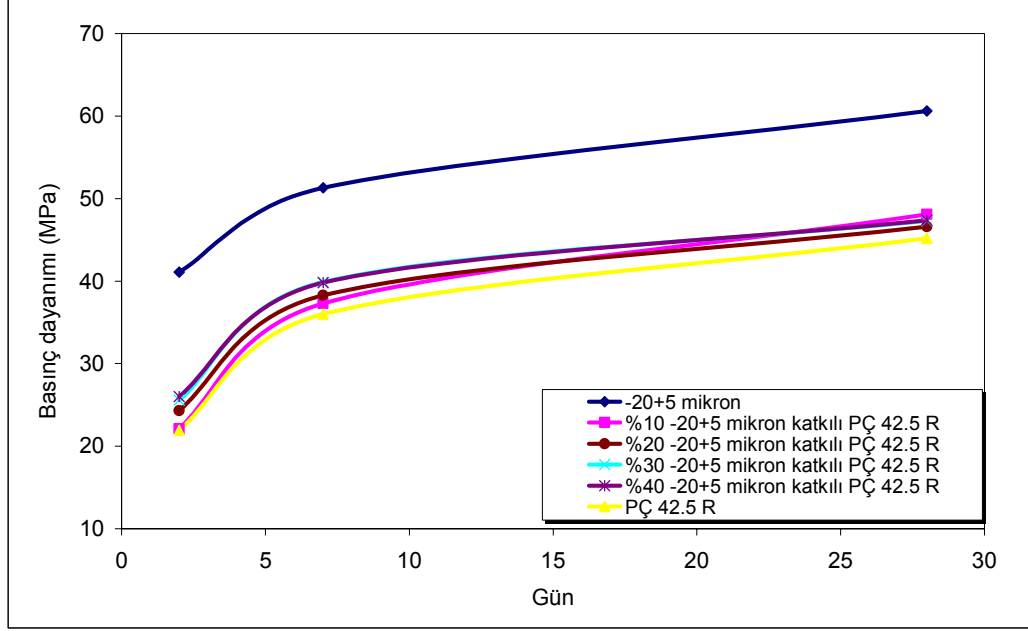
PÇ 42.5 R, -30+2 µm ve -30+2 µm katkıli örneklerin 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanım testleri yapılmış, sonuçlar Şekil 5.40'da verilmiştir. -30+2 µm boyut aralığındaki malzemenin PÇ 42.5 R'ye katılmasıyla elde edilen dayanım değerleri, çalışılan katkı oranlarında, % 5 katılım oranı hariç, artmaktadır. Diğer katkı yüzdelerinde benzer artış eğilimi görüldüğü için, % 5 katılım oranı olan örnekte deneysel hatanın gerçekleşmiş olabileceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra -30+2 µm fraksiyonu PÇ 42.5 R ve diğer katkıli örneklerle karşılaştırıldığında tüm yaşlar için en yüksek dayanım değerini vermiştir. Özellikle PÇ 42.5 R ile karşılaştırıldığında, 28. günde % 38'lik bir dayanım farkı elde edilmiştir.



Şekil 5.40. PÇ 42.5 R, -30+2 µm ve -30+2 µm katkıli örneklerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

-20+5 µm boyut aralığındaki malzemenin PÇ 42.5 R'ye katılmasıyla elde edilen erken dayanım değerleri, çalışılan katkı oranlarında, artmaktadır. Erken dayanım açısından -20+5 µm örneği ile katkıli örnekler PÇ 42.5 R' den daha yüksek sonuçlar vermektedir

(Şekil 5.41). PÇ 42.5 R ile -20+5 µm karşılaştırıldığında, 28. günde % 34'lük bir dayanım farkı elde edilmiştir. Ayrıca -20+5 µm katkı oranı arttıkça tane boyu dağılımı daha dikleşmekte, Blaine özgül yüzey alanı değeri düşmektedir. Buna rağmen, dayanım değerleri % 10, 20, 30 ve 40 katkı oranlarında fazla değişmezken, PÇ 42.5 R'ye göre yaklaşık % 5 kadar artmaktadır.



Şekil 5.41. PÇ 42.5 R, -20+5 µm ve -20+5 µm katkıli örneklerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

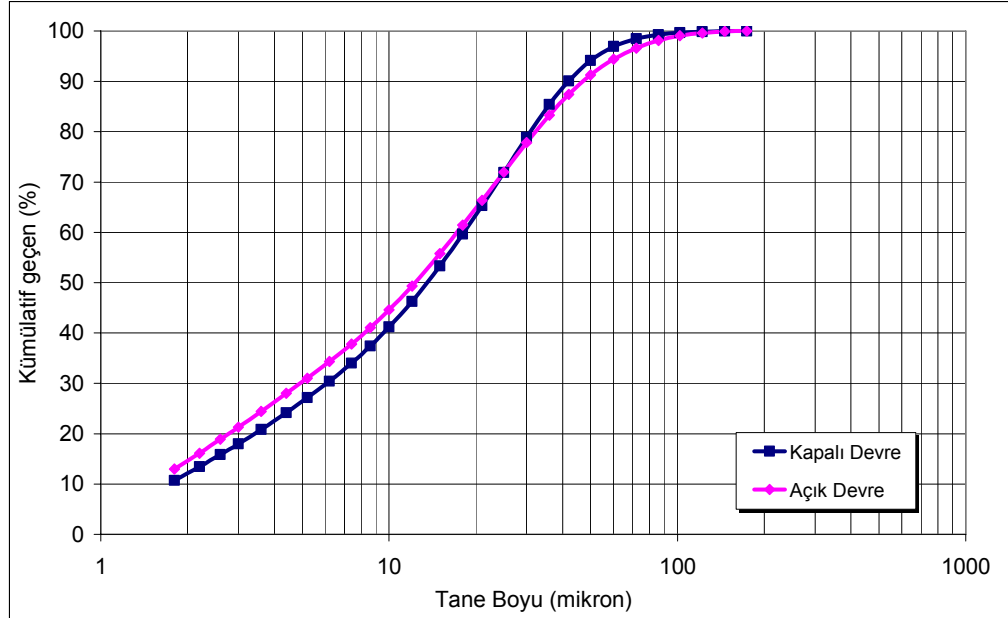
#### 5.4. Fiziksel Parametrelerin Farklı Öğütme Devre Tasarımları İçin İncelenmesi

Çimento inceliği, tane boyu dağılımı ve dağılım eğrisinin eğimi, endüstride farklı öğütme mekanizmalarına sahip ekipmanlar kullanıldığında değişebildiği gibi, öğütme devresinin farklı tasarımında da değişkenlik göstermektedir. Çimento tesislerinde YBMD, bilyalı değirmen ve separatörün bir arada kullanıldığı farklı akım şemaları mevcut olup, bu şemalardan farklı incelik ve tane boyu dağılımında ürün elde etmek mümkündür. Bu ekipmanlar açık ya da kapalı devre şeklinde çalıştırılabilirler. Açık ya da kapalı devre öğütme sisteminde, ürünün değişen en belirgin fiziksel özelliği incelik, tane boyu dağılımı ve dağılımın eğimidir. Çalışmanın bu kısmında, öğütme devre

tasarımından ötürü değişen fiziksel parametrelerin çimentonun servis özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bir önceki çalışma döneminde % 5 kalker katkılı PÇ 42.5 R çimentosu kullanılmış; -30+2 µm aralığındaki tane boyu dağılımı en yüksek dayanımı vermiştir. Bu deneysel bulgu, klinkere % 5 alçıtaşı ilavesi dışında herhangi bir katkı içermeyen PÇ 42.5 N çimentosu için de test edilmiştir.

Örnekler, Set Ankara Çimento Fabrikası'nın bilyalı değirmen açık ve kapalı öğütme devrelerinden alınmıştır. Her iki öğütme devresinin ürünü üzerinde tane boyu dağılımı, Blaine özgül yüzey alanı, su ihtiyacı, basınç dayanımı, priz süresi ve hacimsel sabitlik gibi fiziksel ve mekanik testler yapılmıştır.

Açık ve kapalı devre ürünlerinin tane boyu dağılımları Şekil 5.42'de verilmektedir. Kapalı devre öğütme sisteminin açık devreye göre beklentilere uygun olarak daha dik dağılımlı bir ürün verdiği görülmektedir.



Şekil 5.42. Açık ve kapalı devre ürünlerinin tane boyu dağılımı

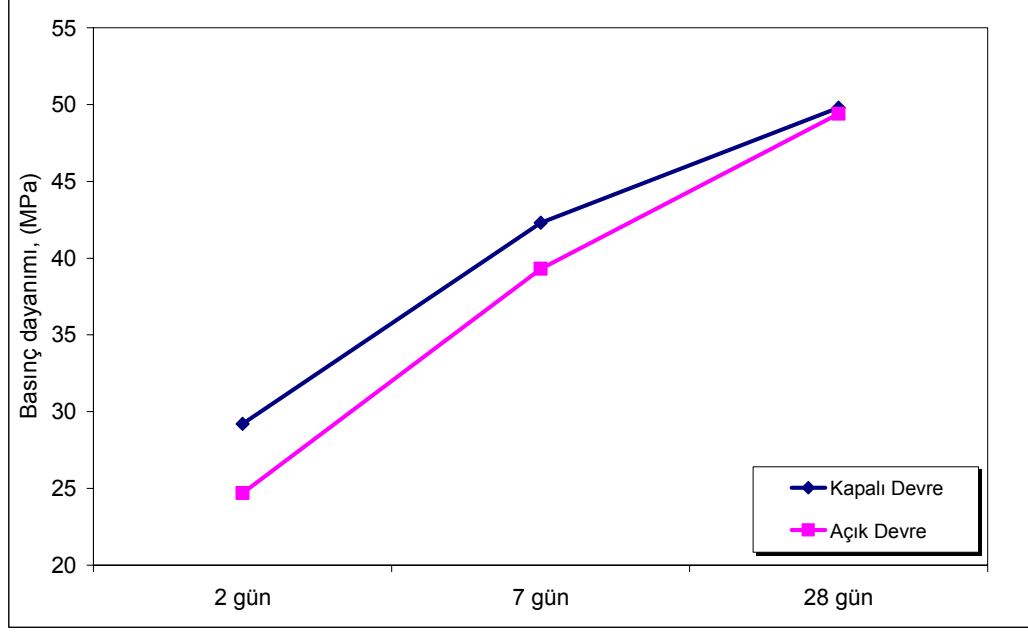
Açık ve kapalı devre ürünlerinin priz süresi, hacimsel sabitlik, su ihtiyacı ve Blaine özgül yüzey alanı değerleri belirlenmiş, sonuçlar Çizelge 5.15'de verilmiştir. Açık devre ürününde, kapalı devre ürününe oranla priz alma süresi daha erken başlamış,

aynı şekilde priz sonu da daha erken tamamlanmıştır. Hacimsel sabitlik; açık ve kapalı devre ürünlerinde standart limitler içerisinde yer almış, önemli bir değişim kaydedilmemiştir. Su ihtiyacının kapalı devre ürününde daha yüksek olması; bu üründe tane boyu dağılımının daha dik ve dolayısıyla taneler arası boşluğun daha fazla olması ile açıklanabilir. Her iki ürünün yüzey alanı değerleri birbirinden çok farklı olup, açık devre örneğinin Blaine özgül yüzey alanının kapalı devre örneğine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, ince tanelerin açık devre ürününde daha fazla olması ve kapalı devre ürününün dik dağılımda olmasının bir sonucudur.

Çizelge 5.15. Açık ve kapalı devre ürünlerinin priz süresi, su ihtiyacı, hacimsel sabitlik ve özgül yüzey alanı sonuçları

	Açık Devre	Kapalı Devre
Priz Süresi, s.: saat, dk.: dakika		
Başlama	2 s 15 dk	2 s 45 dk
Sona Erme	3 s 40 dk	4 s 15 dk
Hacimsel Sabitlik, mm	2	1
Su İhtiyacı, %	28.6	29.8
Blaine, cm <sup>2</sup> /g	3676	2992

Açık ve kapalı devre ürünlerinin 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanım testleri yapılmış, sonuçlar Şekil 5.43'de grafiklendirilmiştir.

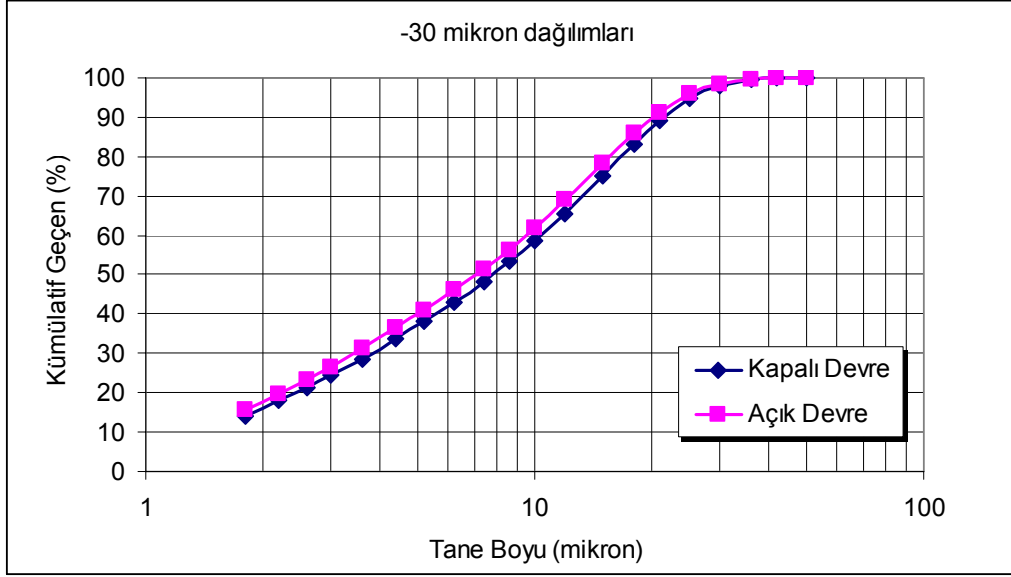


Şekil 5.43. Açık ve kapalı devre ürünlerinin basınç dayanım değerleri

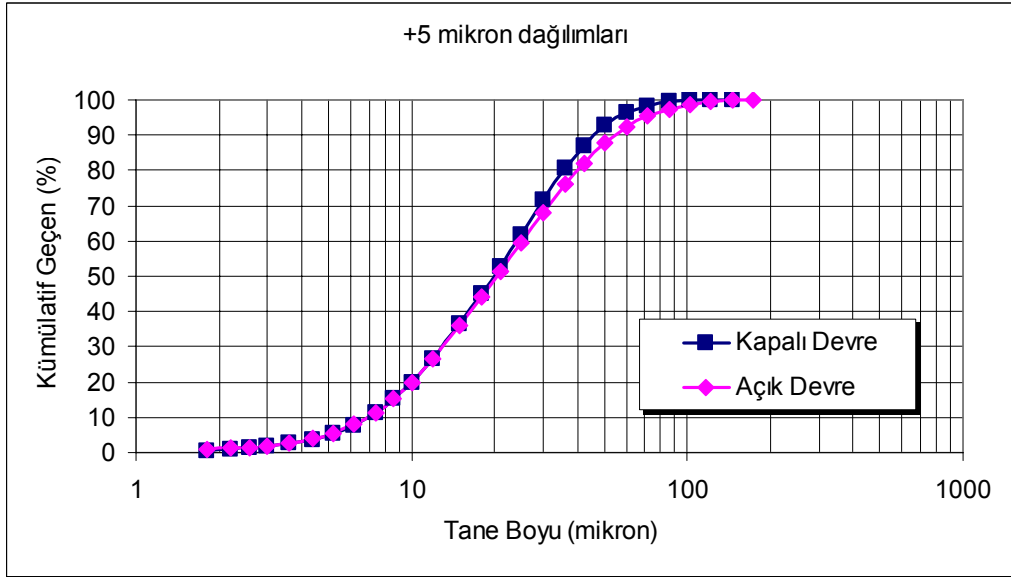
Şekil 5.43'deki sonuçlara göre; kapalı devre ürünü 2 ve 7. günlerde açık devre ürününe göre daha iyi dayanım verirken, 28. günde bu açık kapanmakta ve hemen hemen aynı değere ulaşmaktadır.

Literatürde, çimento dağılımında 3-32  $\mu\text{m}$  miktarının yaklaşık % 65'den az olmamasının dayanım açısından önemli olduğu vurgulanmaktadır (Tsivilis et.al, 1990). Belirlenen 3-32  $\mu\text{m}$  aralığının dışında kalan ince ve iri tanelerin servis özellikleri üzerindeki etkisi ise, çalışmanın bu kısmında incelenmiştir. Set Ankara Çimento Fabrikası'ndan alınan açık ve kapalı devre ürünlerinin ince ve iri taneleri içeren kısımları 3. nesil havalı separator kullanılarak dağılımdan bir miktar uzaklaştırılmıştır. 5  $\mu\text{m}$ 'dan daha ince tane miktarı açık devre ürün dağılımında % 31, kapalı devre ürün dağılımında yaklaşık % 27'dir (Şekil 5.42). Her iki üründe -5  $\mu\text{m}$  miktarı yaklaşık % 5 olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. -30  $\mu\text{m}$  miktarı açık ve kapalı devre ürünlerinde yaklaşık % 77-78 oranındayken, iri tanelerin uzaklaştırılması işleminde -30  $\mu\text{m}$  miktarı yaklaşık % 98 olacak şekilde ayarlanmıştır. Örneklerin -30  $\mu\text{m}$  ve +5  $\mu\text{m}$  tane boyu dağılımları Şekil 5.44 ve 5.45'de sunulmaktadır.



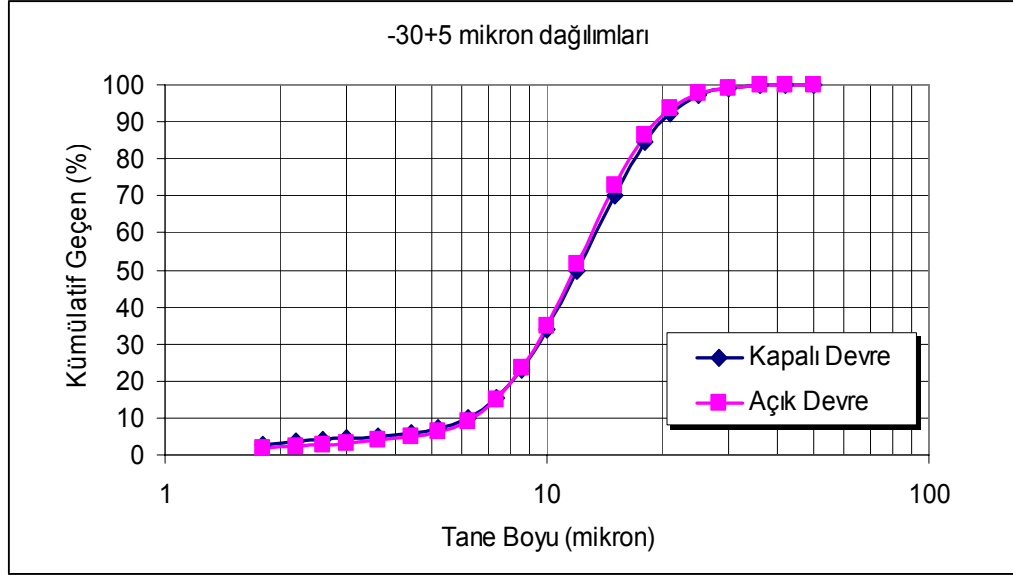


Şekil 5.44. Açık ve kapalı devre ürünlerinin -30 µm dağılımları



Şekil 5.45. Açık ve kapalı devre ürünlerinin +5 µm dağılımları

PÇ 42.5 R çimentosu için en iyi servis özellikleri veren tane boyu dağılımının -30+2 µm olduğu görülmüştür. Aynı sonucun, kapalı ve açık devre ürünü olan PÇ 42.5 N için de tekrar edip etmeyeceğini görebilmek amacıyla, her iki devre ürünün yaklaşık -30+5 µm aralığında tane boyu dağılımları hazırlanmıştır. Örneklerin -30+5 µm tane boyu dağılımları Şekil 5.46'da verilmektedir.



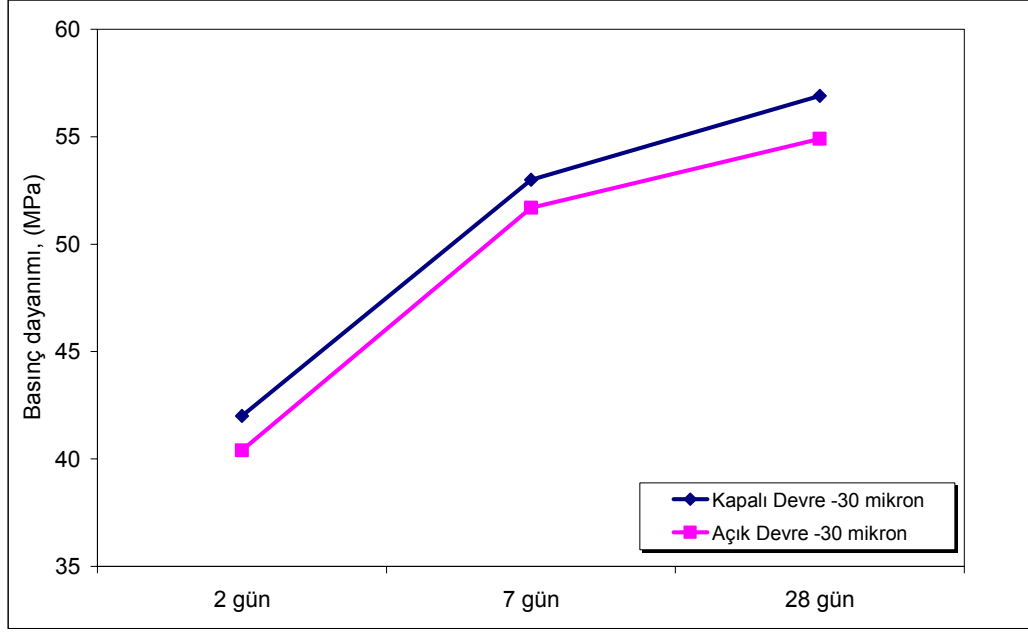
Şekil 5.46. Açık ve kapalı devre ürünlerinin -30+5  $\mu\text{m}$  dağılımları

Açık ve kapalı devre ürünlerinin -30  $\mu\text{m}$ , -30+5  $\mu\text{m}$  ve +5  $\mu\text{m}$  dağılımları için yapılan priz süresinin tayini, hacimsel sabitlik, su ihtiyacı ve Blaine özgül yüzey alanı testlerinin sonuçları Çizelge 5.16'da verilmiştir. Kapalı ve açık devre örneklerinin priz sürelerine bakıldığında; aynı dağılımlar için, açık devre ürünleri daha erken prizlenmeye başlamış ve yine aynı şekilde prizin tamamlanması daha erken gerçekleşmiştir. Örneklerde hacimsel değişim gözlenmemiştir. Örneklerin normal kıvamlılığa eriştikleri andaki su ihtiyacının, kapalı devre ürünlerinde tüm dağılımlar için açık devre ürünlerine oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Blaine özgül yüzey alanı değerlerinin ise -30 ve -30+5  $\mu\text{m}$  dağılımlarında açık devre ürünleri için daha fazla olduğu görülmüştür. Fakat +5  $\mu\text{m}$  dağılımında kapalı devre ürünü daha fazla Blaine özgül yüzey alanı değeri vermiştir. Şekil 5.45'deki kapalı devre örneğinin 20  $\mu\text{m}$ 'dan daha iri tane boyu kısmında, dağılımın açık devre ürününe göre incelmeye başlaması, +5  $\mu\text{m}$  örneğinin Blaine değerindeki değişikliği açıklamaktadır. Priz alma süreleri ve hacimsel sabitlik değerleri TS EN 197-1 standardına uygundur.

Çizelge 5.16. Kapalı ve açık devre -30 µm, -30+5 µm ve +5 µm dağılımlarının priz süresi, hacimsel sabitlik, su ihtiyacı ve özgül yüzey alanı sonuçları

	Priz Süresi, s.: saat, dk.: dakika		Hacimsel Sabitlik, mm	Su İhtiyacı, %	Blaine, cm <sup>2</sup> /g
	Başlama	Sona Erme			
Kapalı Devre -30 µm	2 s 45 dk	4 s 10 dk	1	36.0	3761
Açık Devre -30 µm	1 s 35 dk	3 s 15 dk	1	35.2	5177
Kapalı Devre -30+5 µm	3 s 30 dk	4 s 45 dk	1	38.0	2305
Açık Devre -30+5 µm	3 s 15 dk	4 s 35 dk	1	37.0	2892
Kapalı Devre +5 µm	4 s 00dk	5 s 40 dk	1	31.4	1830
Açık Devre +5 µm	3 s 30 dk	4 s 50 dk	1	30.2	1718

Kapalı ve açık devre ürünlerinin -30 µm, -30+5 µm ve +5 µm dağılımlarında 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım testleri yapılmış; sonuçlar sırasıyla Şekil 5.47, 5.48 ve 5.49'da verilmiştir. Buna göre -30 µm dağılımının grafiğinde 2, 7 ve 28 gün için kapalı devre ürünü açık devre ürününden daha yüksek dayanım göstermiştir. En yüksek 2 günlük erken dayanım değeri tüm örnekler içinde -30 µm dağılımlarında görülmektedir, çünkü ince tanelerin oranı tüm tane boyu dağılımı içinde iri tanelerin yokluğundan dolayı artmaktadır.



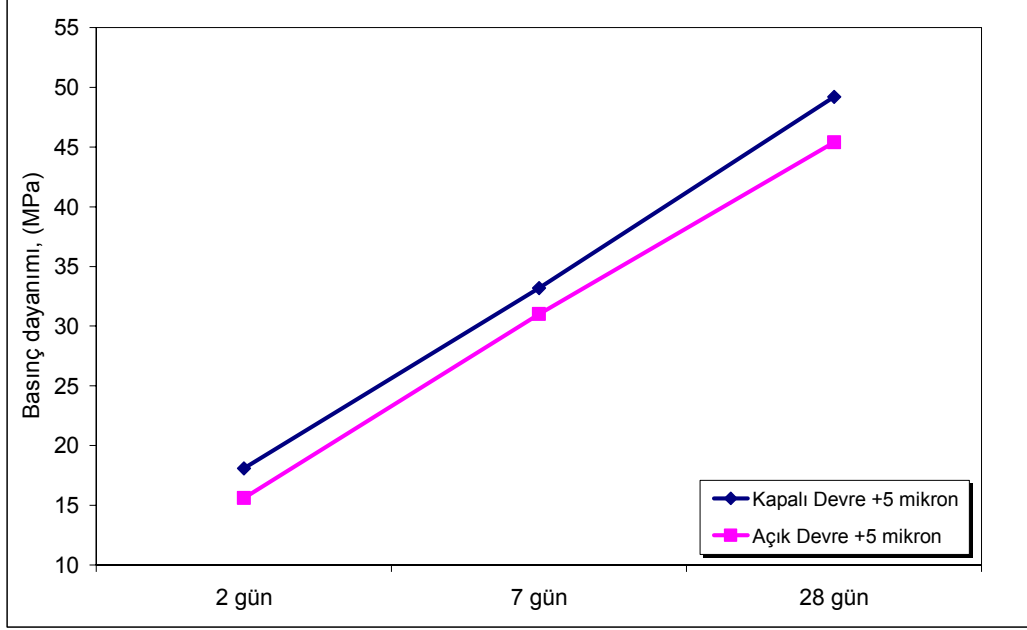
Şekil 5.47. Açık ve kapalı devre -30 µm ürünlerinin basınç dayanım değerleri

İnce tane miktarının azaltıldığı +5 µm dağılımlarında, kapalı devre ürünü yine açık devre ürününden tüm yaşlar için daha fazla dayanım göstermekle birlikte (Şekil 5.48), tüm örnekler içinde en düşük erken dayanım değerini vermiştir. Fakat, +5 µm kapalı devre örneği % 5' den daha fazla ince tane içermemesine rağmen, 28. gün dayanımı, orjinal kapalı devre örneğinin 28 günlük dayanımıyla aynı değeri vermektedir.

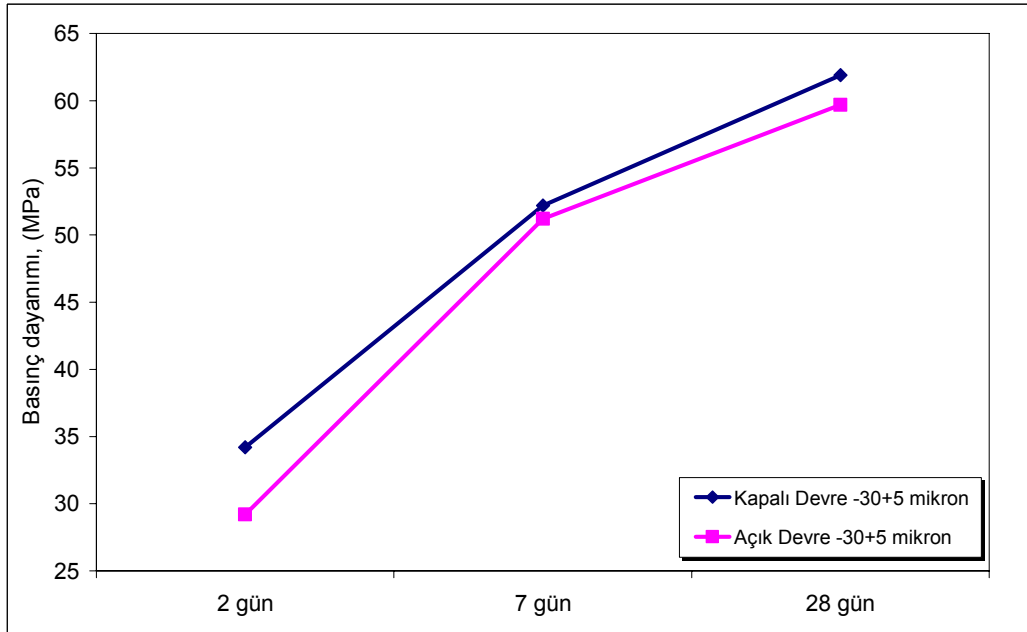
Kapalı ve açık devre ürünlerinin yaklaşık % 95'nin -30+5 µm aralığında oluşturulmasıyla hazırlanan örneklerin basınç dayanım değerleri Şekil 5.49'da verilmektedir. Kapalı devre -30+5 µm dağılımı tüm örneklerden daha yüksek dayanım değeri vermiş; TS EN 197-1 standardında tanımlanan PÇ 42.5 N için en yüksek 28 günlük dayanım limitine ulaşmıştır.

Kapalı ve açık devre ürünlerinin oluşturulan farklı dağılımlarında özellikle dayanım açısından farklılıklar görülmektedir. En iyi sonuçlar PÇ 42.5 R çimentosu örneklerinde olduğu gibi -30+5 µm ürünlerinde elde edilmiştir. İnce tane miktarının oldukça

azaltıldığı +5 µm dağılımlarında orjinal örneklerin değerlerine yakın sonuçlar kaydedilmiştir.



Şekil 5.48. Açık ve kapalı devre +5 µm ürünlerinin basınç dayanım değerleri



Şekil 5.49. Açık ve kapalı devre -30+5 µm ürünlerinin basınç dayanım değerleri

## 6. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çimentonun fiziksel, kimyasal, mineralojik ve morfolojik özelliklerinin, öğütme mekanizması ve devre tasarımına bağlı olarak değişimi ve bu değişimin çimento servis özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği deneysel sonuçlar bu bölümde değerlendirilmektedir.

### 6.1. Öğütme Mekanizması Farklılığının Dar Tane Boyu Fraksiyonlarında İncelenmesi

YBMD ve bilyalı değirmende öğütülen klinker ürünleri, -75+63 µm, -63+53 µm, -53+45 µm, -45+38 µm, -32+20 µm dar tane boyu fraksiyonları ve -38 µm dağılımında hazırlanmıştır. Her iki öğütme mekanizması ürünlerinin aynı fraksiyonlarda benzer tane boyu dağılımında olmasına dikkat edilmiştir.

#### 6.1.1. Kimyasal Bileşim, Yüzey Alanı ve Morfolojik Özellikler

Tane boyu ve öğütme mekanizma farklılığına bağlı olarak kimyasal bileşimin değişmediği Çizelge 5.1 ve 5.2'den görülmektedir. Kimyasal bileşimde önemli değişimlerin olmaması, diğer karakterizasyon testlerinin ve servis özelliklerinin karşılaştırılabilir olmasını sağlamıştır.

Yüzey alanı ölçümlerinde Blaine ve BET gibi iki ayrı yöntem kullanılmıştır. Şekil 5.4'deki Blaine sonuçlarına göre, bilyalı değirmen fraksiyonlarının YBMD fraksiyonlarına göre az da olsa daha fazla özgül yüzey alanına sahip olduğu görülmektedir. Bilyalı değirmen öğütme mekanizmasında tane paketlenme yoğunluğunun daha yüksek olması nedeniyle, yüzeyleri düz olan taneler arasında boşluklar daha azdır. Dolayısıyla bilyalı değirmen ürünlerinde, ölçüm sırasında hava akışına karşı yüzeyin direnci daha fazladır. BET yöntemi, mineralojik ve morfolojik analizin gerçekleştirildiği -63+53 µm, -45+38 µm ve -32+20 µm fraksiyonları için yapılmış, sonuçlar Şekil 5.5'de verilmiştir. Buna göre Blaine yüzey alanı sonuçlarının

tersine, YBMD fraksiyonları daha fazla yüzey alanına sahiptir; tane boyu incelidikçe fraksiyonlar arasındaki yüzey alanı farkı açılmaktadır. Yüksek basınç altında tane içinde çatlak ve kırıkların oluşumu daha fazla olmaktadır; BET yöntemi gaz soğurum prensibine dayandığı için çatlak yüzeylerine soğurulabilen gaz miktarı yüzey alanına artış olarak yansımaktadır.

YBMD örneklerinde çatlaklı yapıdan dolayı elde edilen yüksek BET yüzey alanı değerleri, elektron mikroskobu ile çekilen görüntülerle desteklenmektedir. Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'de YBMD ve bilyalı değirmen fraksiyonlarının elektron mikroskobu görüntüleri karşılaştırmalı olarak verilmekte; YBMD ürünlerinin daha pürüzlü ve çatlaklı yapıya sahip olduğu görülmektedir. Yüksek basınç altında, minerallerin faz sınırı boyunca birbirinden ayrılması ve çatlakların oluşumu, YBMD örneklerinin yüzey yapılarını daha pürüzlü hale getirmektedir. Bilyalı değirmen öğütme mekanizmasında ise, taneler rastgele kırılma sonucu faz boyutu boyunca küçüldükleri için yüzeyler daha düz ve köşeli görülmektedir.

### **6.1.2. Mineralojik Özellikler**

YBMD ve bilyalı değirmen -63+53  $\mu\text{m}$ , -45+38  $\mu\text{m}$  ve -32+20  $\mu\text{m}$  fraksiyonlarının parlak kesitleri üzerinde, Clemex görüntü analiz cihazı ile mineralojik bileşim, serbestleşme analizi, alit içindeki gömülü belit miktarı, minerallerin boyut ve şekil özellikleri belirlenmiştir. Çizelge 5.3'de verilen mineralojik bileşime göre, her öğütme mekanizmasının kendi fraksiyonları içinde mineral faz dağılımları tane boyuna göre farklılık göstermektedir. Tane boyu incelidikçe alit miktarı artarken, ara faz miktarı azalmaktadır. Alitin ince tane boylarında yoğunlaşması, belite göre daha kolay öğünebilir bir mineral olması ile açıklanabilir.

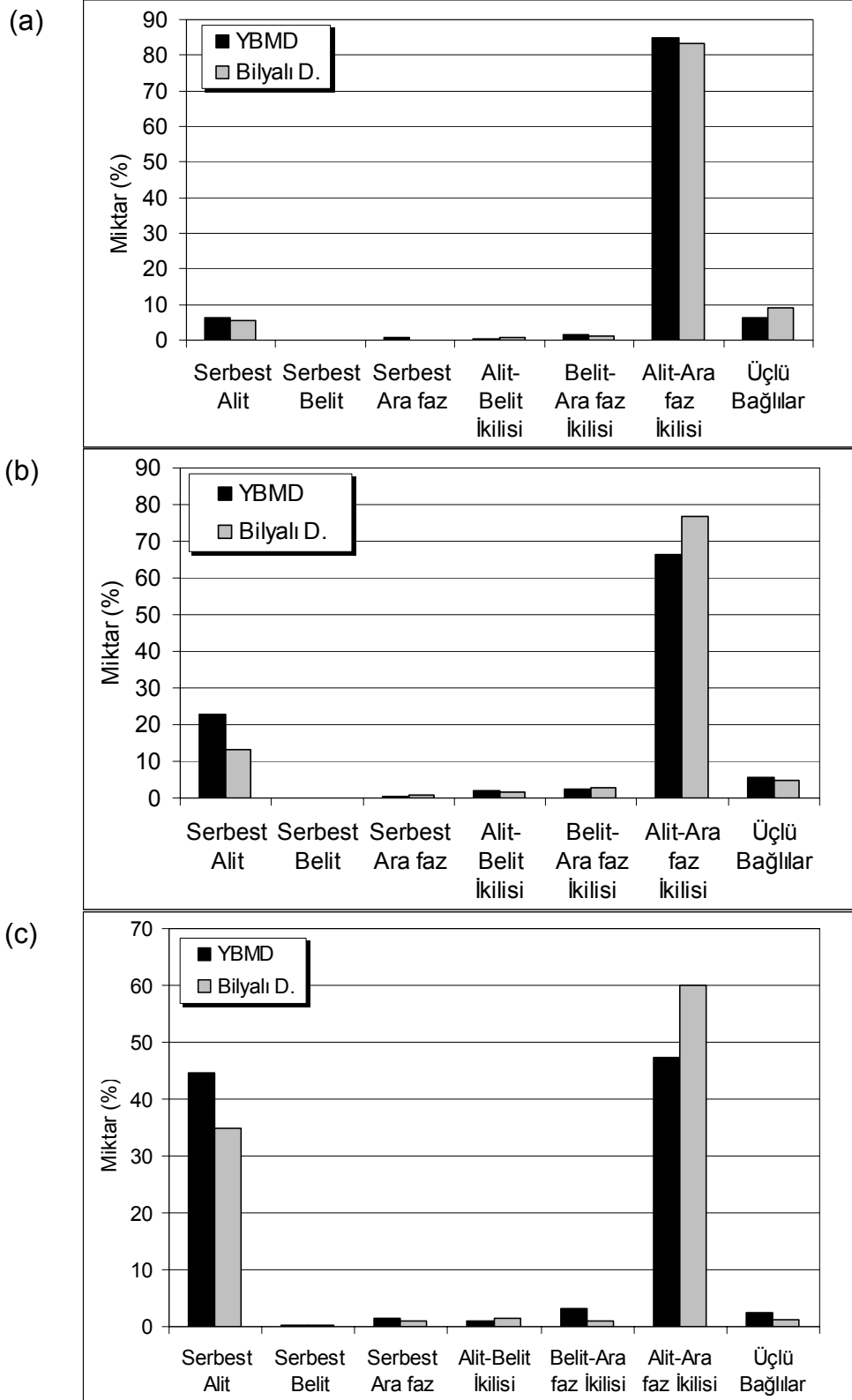
Çizelge 5.4'de alit ve belit fazlarının büyüklük ve şekil karakteristikleri verilmiştir. Belitin alite göre kristal büyüklüğü daha küçüktür. Alit ve belitin kristal yapılarındaki farklılık, görünüm oranı ve küresellik ölçüm sonuçlarına yansımaktadır. Hekzagonal yapıdaki alitin görünüm oranı belite göre daha yüksek iken, küresellik oranı daha

düşüktür. Minerallerin kristal büyüklüğü ve şekil karakteristiklerinde öğütme mekanizma farklılığına dayalı belirgin bir fark görülmemektedir.

Şekil 6.1'de YBMD ve bilyalı değirmen fraksiyonlarının karşılaştırmalı serbestleşme sınıfı dağılım sonuçları verilmektedir. Serbestleşme sınıflarında bağlı tane olarak genellikle alit-ara faz ikili bağlı tanesi göze çarpmakta, ancak bu sınıfın miktarı tane boyu inceldikçe azalmaktadır. Buna karşılık alitin serbest tanelerinin miktarı artmaktadır. Diğer beklenen bir sonuç, tane boyu inceldikçe üçlü bağlı tanelerin oranının azalmasıdır. Serbest alit miktarı ise, YBMD ürününün her üç fraksiyonunda da bilyalı değirmen ürünlerine göre daha fazladır. Buna neden olarak, YBMD'deki öğütmenin, basınç etkisiyle tercihli olarak mineral faz sınırlarından kopma ile gerçekleşmesi gösterilebilir. Alit için serbestleşme derecesi beklendiği gibi tane boyu inceldikçe artmaktadır. Serbestleşme derecesinin özellikle alit minerali için açıklanmasının nedeni; örneklerin % 70'den fazlasının alit mineralinden oluşması ve az miktardaki belitin kümelenme eğiliminde olmasıdır.

Ayrıca alit içinde düğmeler halinde bulunan belit miktarı hesaplanmış, sonuçlar Çizelge 5.5'de verilmiştir. Elde edilen değerlere göre, alit içindeki gömülü belit miktarı tane boyu ve öğütme mekanizma farklılığına bağlı olarak değişmektedir. Bu oran tane boyu inceldikçe azalırken, YBMD örneklerinde bilyalı değirmen örneklerine göre daha az olmaktadır. Buna, YBMD'deki öğütme mekanizması gereği, serbestleşmenin mineral faz sınırlarında oluşmasının neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, alit ve belit mineralleri arasındaki sertlik farkı; YBMD öğütme mekanizmasında uygulanan basıncın faz sınırlarında yoğunlaşmasına ve serbestleşmenin, bu zayıf düzlem boyunca daha kolay gerçekleşmesine yardımcı olmaktadır.





Şekil 6.1. -63+53 µm (a), -45+38 µm (b) ve -32+20 µm (c) YBMD ve bilyalı değirmen örneklerindeki serbestleşme sınıfları

### 6.1.3. Servis Özellikleri

YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarında, özellikle alit mineralinin serbestleşme farklılıkları görülmüş ve bu farklılıkların servis özellikleri üzerinde pozitif bir etkisinin olup olmadığı incelenmiştir.

Şekil 5.22'den, YBMD fraksiyonlarının bilyalı değirmen fraksiyonlarına göre normal kıvamda bir çimento hamuru oluşturabilmek için daha fazla suya ihtiyaç duyduğu görülmektedir. YBMD ürününün daha fazla su tükettiği bilgisine literatürde de rastlanmaktadır. Dar tane boyu dağılımında taneler arası boşluğun daha fazla olması, uygulanan basıncın etkisiyle iç çatlakların oluşması ve dolayısıyla yüzey alanının artmasıyla suyun daha fazla tüketileceği açıklamaları mevcuttur.

Çizelge 5.7'de priz başlama ve sona erme süreleri verilmektedir. Dar tane boyu fraksiyonlarının yeterince ince malzeme içermemesi nedeniyle priz süreleri daha geç başlayıp daha geç sona ermektedir. Tane boyu inceldikçe bu sürelerin kısaldığı, ancak, öğütme mekanizmalarındaki farklılığa bağlı olarak fraksiyonlar arasında herhangi bir ilişkinin olmadığı görülmektedir.

Çimentoya dayanım kazandıran en önemli mineral olan alit; hem erken hem de geç dayanımda etkilidir. Gerek Şekil 6.1'den, gerekse Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11'den çimento tanesi içinde genellikle alit ve belitin ara faz ile birlikte olduğu görülmektedir. Ara faz; alit ve beliti çevreleyen, matriks görevi gören bir fazdır. Belit ise daha çok, geç dayanımın gelişmesinde etkindir. Çimento tanesi su ile temas ettiğinde, su belli bir derinliğe kadar nüfuz eder. Hatta bazı durumlarda çimento tanesinin bir kısmı su ile tepkimeye girmeden kalabilir. Bu anlamda tane içinde oluşan çatlaklar suyun temas edebileceği yüzey alanını artırabilir. Aynı şekilde serbest olan mineral yüzeylerinin de su ile tepkimeye girme olasılığı artabilir. Farklı öğütme mekanizmasıyla öğütülen fakat, aynı tane boyu dağılımı ve kimyasal bileşime sahip örneklerde, çatlaklı yapı ve yüzey alanı arttıkça dayanım değerinin de artabileceği düşünülmüştür. Yapılan morfolojik analiz ve BET ölçümlerinde, YBMD örneklerinin bilyalı değirmen

örneklerine göre daha fazla çatlaklı bir yapıya ve dolayısıyla yüzey alanına sahip olduğu görülmüştür. Benzer şekilde alit mineralinin serbestleşme derecesi YBMD örneklerinde, bilyalı değirmen örneklerine göre -45+38 µm fraksiyonunda % 70, -32+20 µm fraksiyonunda ise % 25 daha fazladır. Her ne kadar dayanım testinde kullanılan örnekler dar tane boyu fraksiyonundan oluşup, normalde olması gereken ince taneyi içermese de, çıkan sonuçları göreceli değerlendirme açısından 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.23, 5.24 ve 5.25’de sırasıyla 2, 7 ve 28 günlük dayanım grafikleri verilmektedir. -63+53 µm, -53+45 µm ve -45+38 µm fraksiyonlarında belirgin bir fark olmasa da, -32+20 µm ve -38 µm fraksiyonlarında bilyalı değirmen örnekleri bütün yaşlarda daha fazla dayanım değeri vermektedir. Elde edilen sonuçlar bu konuda uzman bir araştırmacı ile tartışılmış; tane boyu ve kimyasal bileşimin benzer olmasına rağmen dayanımda görülen farklılığın alit ve belit kristal büyüklükleri farkından kaynaklanabileceği yorumuna varılmıştır (Glasser, 2005, yazılı görüşme). Ancak, yapılan mineralojik analizde alit ve belit minerallerinin kristal büyüklüğü ve Feret ortalamaları ölçülmüş (Çizelge 5.4), öğütme mekanizmaları arasında herhangi bir değişim görülmemiştir.

Literatürde bilyalı öğütme ile YBMD mekanizmasını dayanım açısından inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Ancak literatürdeki sonuçlar, farklı öğütme mekanizmalarıyla üretilen normal çimento dağılımına sahip örnekler içindir. Bu anlamda dar tane boyu yerine dağılım halindeki yeni örnek grubu hazırlanmış, karakterizasyon ve servis özellikleri belirleme çalışmalarına devam edilmiştir.

## **6.2. Öğütme Mekanizması Farklılığının Dağılım Örneklerinde İncelenmesi**

YBMD ve bilyalı değirmen ürünü klinkerin -75 µm, -63 µm, -53 µm, -45 µm, -38 µm ve -20 µm dağılımlarında örnekleri hazırlanmış; sonuçların karşılaştırılabilir olması için, YBMD ve bilyalı değirmen ürünleri aynı fraksiyonlarının, benzer tane boyu dağılımında olmasına dikkat edilmiştir (Şekil 5.28).

### **6.2.1. Kimyasal Bileşim ve Yüzey Alanı Özellikleri**

Seçilen dağılım örneklerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 5.8'de görülmektedir. Hem tane boyuna hem de öğütme mekanizmasındaki farklılığa bağlı olarak kimyasal bileşimde bir değişim gözlenmemiştir.

Dağılım örneklerinin hem Blaine hem de BET yüzey alanları ölçülmüş, sonuçlar Şekil 5.29 ve 5.30'da verilmiştir. Bilyalı değirmen dağılımlarının Blaine özgül yüzey alanı bir önceki örnek grubunda olduğu gibi daha fazladır. Bu sonuç; bilyalı öğütme mekanizmasındaki ürünün, YBMD öğütme mekanizmasına göre daha yüksek paketleme yoğunluğuna sahip olması ile açıklanabilir. BET yüzey alanı sonuçlarında ise, YBMD ile bilyalı değirmen ürünleri arasındaki yüzey alanı farkının kapandığı görülmektedir. Bunun nedeni; YBMD ürünlerindeki çatlaklı yapıdan dolayı yüzey alanının artmasıdır. Her iki yüzey alanı ölçümünde de beklendiği gibi tane boyu incelidikçe yüzey alanı artmaktadır.

### **6.2.2. Servis Özellikleri**

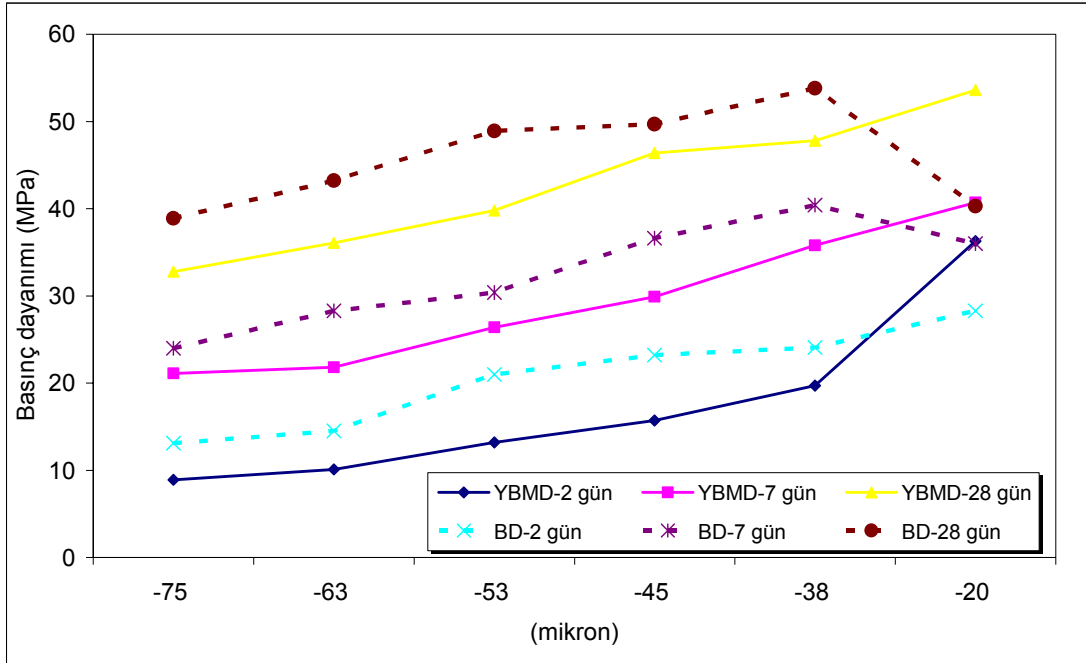
Dağılım örneklerinde priz süresi, standart kıvam için su ihtiyacı, hacimsel sabitlik ve 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanımı özellikleri incelenmiştir. Çizelge 5.9'da verilen priz sürelerine bakıldığında, öğütme mekanizmasındaki farklılığın süreler üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Genel anlamda priz süresi üzerinde inceliğin daha etken olduğu söylenebilir. Özellikle tane boyu incelidikçe priz başlama süresi kısalmaktadır. Buna neden olarak, inceliğin artmasıyla su ile temas eden yüzeyin artması ve hidrasyon tepkimelerinin daha hızlı başlaması gösterilebilir.

Su ihtiyacı ise, hem tane boyu, hem de öğütme mekanizma farklılığına göre değişmektedir. Tane boyu incelidikçe su tüketimi artmaktadır. Suyun öncelikli işlevi, fiziksel olarak malzemenin ıslanabilmesi ve oluşan hidrasyon ürünleri arasındaki boşluğun doldurulmasıdır. Su aynı zamanda kimyasal olarak malzemeye tepkimeye girip yeni hidrasyon ürünlerinin oluşmasını sağlar. Kimyasal olarak bağlanan su ile,

ıslanma ve boşluk doldurma gibi fiziksel olarak tüketilen su; çimentonun yüzey alanı ile tane boyu dağılımına bağlıdır. Malzemede ince tane miktarı arttıkça, bu tanelerin birbirleri üzerinde standart bir kıvam yoğunluğunda kolaylıkla hareket edebilmelerini sağlamak için daha fazla suya ihtiyaç vardır (Kuhlmann et.al, 1985). YBMD öğütme mekanizmasında tüketilen su miktarı, bilyalı öğütme mekanizmasına göre daha fazladır. Bu sonucun; örneklerin tane boyu dağılımları aynı olduğu için YBMD ürünlerindeki çatlaklı yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Hacimsel sabitlik tüm örneklerde standartlar içerisinde yer almış, tane boyu ya da öğütme mekanizmasına bağlı olarak değişim göstermemiştir.

YBMD ve bilyalı değirmen dağılım örneklerinin standart 2, 7 ve 28 günlük dayanım değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 6.2'de verilmektedir. Bilyalı değirmen -20 µm örneği hariç, tüm dağılım örneklerinde ve tüm yaşlarda bilyalı öğütme mekanizmasının YBMD öğütme mekanizmasına göre daha iyi dayanım verdiği görülmektedir.



Şekil 6.2. YBMD ve bilyalı değirmen dağılım örneklerinin karşılaştırmalı basınç dayanımı

Bilyalı değirmen -20 µm örneğinin 2 günlük erken dayanım değeri aynı öğütme mekanizması dağılımlarından daha yüksek olsa da, YBMD -20 µm örneği dayanımına ulaşamadığı görülmektedir. 7 ve 28. gün dayanımlarında bu durum daha belirgin hale gelmiştir. YBMD ile kıyaslandığında bilyalı değirmen öğütme mekanizması daha fazla ince tane üretmekte, tane boyu inceldikçe de normal kıvamlı bir çimento hamuru için su tüketimi artmaktadır. Dolayısıyla bu fraksiyonda standart test gereği eklenen suyun fiziksel ve kimyasal işlev açısından yeterli gelmediği düşünülmektedir. Su ve ince tanelerin çok iyi homojenize edilmediği kıvamdaki bir çimento hamurunda, ince tanelerin kümelenmediği yer ile diğer bölgeler arasında zayıf kısımlar oluşabilmekte, bu da dayanım değerini düşürmektedir.

Her iki öğütme mekanizma ürünleri karşılaştırıldığında, benzer tane boyu dağılımı ve kimyasal bileşimde olmalarına karşın bilyalı değirmen ürün dağılımları daha yüksek dayanım değerleri vermiştir. Literatürde bu durumu destekleyen sonuçlar mevcuttur. Örneğin yapılan bir çalışmada, aynı kimyasal bileşim ve tane boyu dağılımına sahip bilyalı değirmen ve YBMD ürünlerinin dayanım değerlerinde önemli farklar görülmüş, bilyalı değirmen ürünü daha yüksek dayanım değeri vermiştir. Bu durum; öğütme mekanizmasındaki farklılık nedeni ile her bir klinker fazının, tane boyu sınıflarında farklı miktarlarda yoğunlaşabileceği şeklinde açıklanmıştır. Klinker fazları farklı öğütülebilirliğe sahiptir ve dayanıma farklı oranda katkı sağlarlar. Öğütülmüş klinkerdeki her bir tane boyu aralığı farklı faz bileşimi gösterebilir. Darbe ve aşındırma etkisinin görüldüğü bilyalı değirmen öğütmesinde, klinker fazlarının ezme mekanizmasına göre tane boyu sınıflarına daha farklı oranlarda dağıldığı düşünülmektedir ve bu konuda çalışmalar devam etmektedir (Müller-Pfeiffer and Clemens, 2004).

### **6.3. Fiziksel Parametrelerin İncelenmesi**

İncelik, tane boyu dağılımı ve dağılım eğrisinin eğimi gibi fiziksel parametrelerin, çimentonun servis özellikleri üzerindeki etkisi PÇ 42.5 R tipinde bir çimentoda incelenmiştir.

-10 µm, -20 µm, -30 µm, -45 µm, -30+2 µm ve -20+5 µm örnekleri PÇ 42.5 R çimentosundan hazırlanmış, kimyasal bileşim ve yüzey özellikleri belirlenmiştir. PÇ 42.5 R'nin içindeki % 5 kalker oranı kolay öğünebilir olmasından dolayı özellikle ince tane boyundaki örneklerde yoğunlaşmıştır. Temel karma oksit bazındaki kimyasal bileşimlerde herhangi bir olumsuzluk görülmemektedir.

Çimento dağılımında, 3-32 µm aralığındaki malzeme miktarının önemi PÇ 42.5 R'ye % 5, 10, 15 ve 20 oranında -30+2 µm örneği katılarak incelenmiştir. Tane boyu dağılım eğimi, -20+5 µm örneğinin PÇ 42.5 R'ye % 10, 20, 30 ve 40 oranlarında katılmasıyla değiştirilmiştir. -30+2 µm katkısıyla örneklerin Blaine yüzey alanı değerleri 3000-3200 Blaine arasında değişirken, -20+5 µm katkısıyla örneklerin yüzey alanı değerleri katkı oranı artışıyla birlikte azalmaktadır (Şekil 5.38). Bu azalmaya tane boyları birbirine daha yakın tanelerin miktarının artması neden olmuştur.

-20 µm, -30 µm ve -45 µm örneklerinin incelenen priz sürelerinde tane boyunun etkisi daha çok ilk priz anında belirgindir. -10 µm, -20 µm, -30 µm ve -45 µm örneklerinin PÇ 42.5 R örneği ile 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları karşılaştırılmış, en iyi dayanım değerinin -30 µm örneğinde elde edildiği görülmüştür (Şekil 5.39). İnceliğin özellikle erken dayanımda etkisi oldukça fazladır. -10 µm örneği erken dayanımda PÇ 42.5 R ve -45 µm örneğinden daha yüksek bir değer alırken geç dayanımda bu durum tersine dönmüştür. Bilindiği gibi Portland Çimentosunun yüzey alanı büyük olduğunda su ile temas ettiği andan itibaren prizlenme süreci daha hızlıdır. Hatta özgül yüzey alanı fazla, Rosin Rammler tane boyu dağılımındaki pozisyon parametresi küçük olan çimentoların hidrasyon tepkimelerinin daha hızlı olduğu bildirilmektedir (Sprung et.al, 1985). İncelikteki değişim, etkisini 28 günlük geç dayanımdan çok, erken dayanımda göstermektedir. Bunun da nedeni, sertleşmenin başladığı anda oluşan hidrasyon ürünlerinin miktarı, katı taneciklerin yüzey alanı ile suyun etkileşebilme hızına bağlıdır. Fakat ince taneler dayanımı sadece belli bir limite kadar arttırır ki, bu da 28 günlük dayanımdan çok erken dayanım için geçerlidir (Kuhlmann et.al, 1985). İncelik özellikle erken dayanımda etkili olurken, geç dayanımda kimyasal ve mineralojik özellikler daha etkindir (Tsivilis and Parissakis, 1995; Odler, 1998).

PÇ 42.5 R'ye -30+2 µm katılan örneklerin basınç dayanımları, % 5 katkı oranı hariç, hem katkı yüzdesi artışına, hem de PÇ 42.5 R örneğine göre artmaktadır. Fakat en çarpıcı dayanım değerini -30+2 µm örneğinin kendisi vermiş, PÇ 42.5 R örneğinin 28 günlük dayanımına göre % 38'lik bir iyileşme sağlamıştır (Şekil 5.40).

PÇ 42.5 R'ye -20+5 µm katılan örneklerin basınç dayanımları, örnek içindeki -20+5 µm miktarı artıkça PÇ 42.5 R örneğine göre artmış, fakat farklı miktarda -20+5 µm içeren örnekler birbirine yakın dayanım değerleri vermiştir. Ancak, -20+5 µm örneğinin kendisi özellikle 2 günlük erken dayanımda % 50'ye yakın bir oranla daha yüksek dayanım değeri sağlamıştır. PÇ 42.5 R ile -20+5 µm karşılaştırıldığında 28. gün dayanım için -20+5 µm örneği % 34 kadar daha fazla dayanıma ulaşmaktadır (Şekil 5.41).

-20+5 µm örneğinin % 10, 20, 30 ve 40 oranlarında PÇ 42.5 R'ye katılmasıyla Blaine yüzey alanı değeri düşerken, tane boyu dağılımının eğimi de artmıştır. Dağılım eğrisinin Gates-Gaudin-Schuhman'a göre belirlenen eğim değerleri Çizelge 6.1'de verilmektedir.

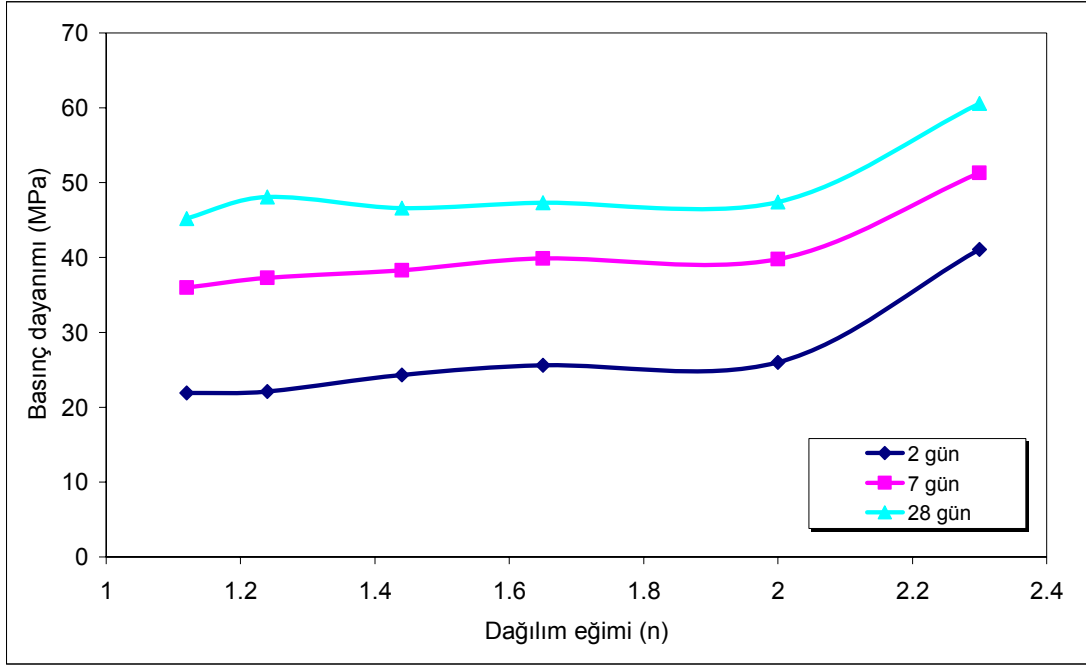
Çizelge 6.1. PÇ 42.5 R ile -20+5 µm katılan örneklerin dağılım eğrilerinin eğimleri (n)

Örnekler	Dağılım eğrisinin eğimi, n
PÇ 42.5 R	1.12
% 10 -20+5 µm katkılı PÇ 42.5 R	1.24
% 20 -20+5 µm katkılı PÇ 42.5 R	1.44
% 30 -20+5 µm katkılı PÇ 42.5 R	1.65
% 40 -20+5 µm katkılı PÇ 42.5 R	2.00
-20+5 µm	2.30

-20+5 µm katkı oranı artan örneklerin, eğim-basınç dayanımı ilişkisi Şekil 6.3'de grafiklendirilmiştir. Buna göre, eğim değeri 2'e kadar olan örneklerin dayanım değerlerinde belirgin bir fark görülmezken, 2'den daha büyük eğim değerlerinde

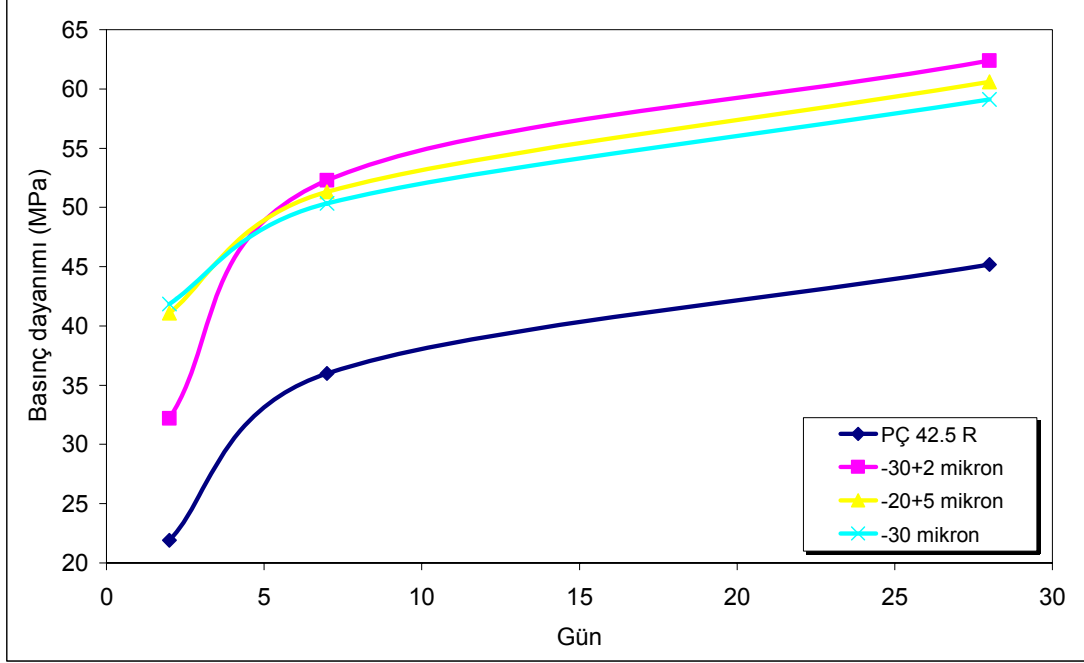


dayanım değeri artmaktadır. Diğer bir deyişle, dar tane boyu dağılımı ve düşük Blaine yüzey alanına sahip bir örnek, geniş tane boyu dağılımına sahip, yüksek Blaine yüzey alanı değeri veren bir örneğin basınç dayanımı ile aynı değeri verebilmektedir. Tane boyu dağılımının dikleşmesi basınç dayanımı üzerinde olumsuz etki yaratmamakta, hatta eğimin 2'den büyük olduğu durumda dayanım değeri artmaktadır. Bu sonuçlardan tane boyu dağılımındaki, ince ve iri taneyi temsil eden iki zıt ucun dayanım üzerinde etkisinin önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 6.3. Dağılım eğrisinin eğimi ile basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 6.4'de PÇ 42.5 R, -30+2  $\mu\text{m}$ , -20+5  $\mu\text{m}$  ve -30  $\mu\text{m}$  örneklerinin dayanım karşılaştırma grafiği verilmektedir.



Şekil 6.4. PÇ 42.5 R ile -30+2  $\mu\text{m}$ , -20+5  $\mu\text{m}$  ve -30 mikron örneklerinin 2, 7, 28 günlük basınç dayanımı karşılaştırması

-30  $\mu\text{m}$  örneği, ince tanelerden dolayı erken dayanımda -30+2  $\mu\text{m}$  örneğinden daha yüksek dayanım verirken; benzer etki -20+5  $\mu\text{m}$  örneğinde iri tanenin olmayışı ile de sağlanmaktadır. PÇ 42.5 R örneğinden ince ve iri tanelerin uzaklaştırılmasıyla PÇ 42.5 R sınıfı için TS EN 197-1'de tanımlanan en yüksek 28 günlük dayanıma ulaşabilmenin mümkün olduğu görülmektedir. Endüstriyel koşulda PÇ 42.5 N'nin erken dayanımının 20 MPa'dan daha yüksek olması için % 5 kalker katılarak PÇ 42.5 R tipinde çimento üretilmiştir. PÇ 42.5 R çimentosundan oluşturulan -30  $\mu\text{m}$  ve -20+5  $\mu\text{m}$  dağılımıyla 20 MPa'lık dayanım değeri 42 MPa'a kadar ulaşmıştır. 28 günlük geç dayanımda ise PÇ 42.5 R dayanımı normal koşulda 45 MPa değerini alırken, -30+2  $\mu\text{m}$  örneği ile bu değer 62.5 MPa'a kadar çıkmıştır. Dolayısıyla çimento dağılımında ince tanelerin özellikle erken dayanımda etkisi büyükken, geç dayanımda ise iri tanelerin etkisi daha fazladır.

#### 6.4. Fiziksel Parametrelerin Farklı Öğütme Devre Tasarımları İçin İncelenmesi

Ankara SET Çimento Fabrikası'nın bilyalı değirmen açık ve kapalı öğütme devrelerinden alınan PÇ 42.5 N çimentosunun tane boyu dağılımları birbirinden farklı olup kapalı devre ürünü daha dik dağılımdadır. Bu farklılığın yüzey alanı ve servis özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

Kapalı devre ürününün yüzey alanı açık devre ürününe göre daha az olurken su ihtiyacı daha fazladır (Çizelge 5.15). Bu sonuç, tane boyu dağılımının daha dik bir eğime sahip olması ile ilgilidir. Priz süresi ise, kapalı devre ürününde açık devre ürününe göre daha geç başlayıp tamamlanmaktadır. Açık devre ürününde priz sürecinin daha erken sürelerde gerçekleşmesi, bu ürünün daha fazla ince tane içermesinden kaynaklanmaktadır. Bu örnek grubunda da tane boyu dağılımının priz süresi üzerinde oldukça etken olduğu görülmektedir.

Açık ve kapalı devre ürünlerinin 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanım testleri yapılmış, sonuçlar Şekil 5.43'de grafiklendirilmiştir. Buna göre kapalı devre ürünü 2 ve 7. günlerde açık devre ürününe göre daha iyi dayanım verirken, 28. günde bu açık kapanmakta ve hemen hemen aynı değere ulaşmaktadır. Dolayısıyla dayanım grafiği Çizelge 5.15'deki sonuçlarla birlikte yorumlandığında, açık devre ürünü her ne kadar erken prizlense ve daha fazla yüzey içerse de, erken dayanımda kapalı devre ürününün dayanımına ulaşamadığı görülmektedir. Bu anlamda daha yüksek Blaine yüzey alanına sahip olan bir örneğin daha iyi dayanım vereceği beklentisi yanlıştır. Öte yandan aynı dayanımı, daha düşük yüzey alanına sahip, dolayısıyla daha iri bir malzemede, tane boyu dağılım eğimini değiştirmek suretiyle elde etmek mümkündür.

Tane boyu dağılımındaki ince ve iri taneleri içeren uçların basınç dayanımı üzerindeki etkilerini ayrı ayrı inceleyebilmek için -30 µm ve +5 µm dağılımları hazırlanmıştır. PÇ 42.5 R çimentosunda en iyi dayanımın -30+2 µm için elde edilmesi üzerine benzer sonucun PÇ 42.5 N çimentosu için de tekrar edip etmeyeceğinin belirlenmesi amacıyla -30+5 µm örneği hazırlanmış, servis özellikleri incelenmiştir.

Çizelge 5.16'daki sonuçlara göre, kapalı devre -30 µm ve +5 µm dağılımlarının priz süresi, yüzey alanı, su ihtiyacı gibi özelliklerinde, açık devre dağılımlarına oranla farklılıkların görülmesi tane boyu dağılımının daha dik dağılımda olması ile açıklanabilir. Ancak benzer farklılıklar aynı tane boyu dağılımına sahip kapalı ve açık devre -30+5 µm dağılımlarında da görülmektedir. Bu sonucun kapalı devre öğütme sisteminin doğasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kapalı ve açık devre ürünlerinin -30 µm, -30+5 µm ve +5 µm dağılımlarında yapılan 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım test sonuçlarına göre (Şekil 5.47, 5.48 ve 5.49), kapalı devre örnekleri açık devre örneklerine göre daha fazla dayanım değeri vermektedir. En yüksek 2 günlük erken dayanım değeri tüm örnekler içinde ince tane oranı en fazla olan -30 µm dağılımlarında kaydedilmiştir. +5 µm örneğinin en düşük erken dayanım değerini vermesi örnek içindeki -5 µm miktarının sadece % 5 kadar olmasının bir sonucudur. Ancak, +5 µm kapalı devre örneği % 5' den daha fazla ince tane içermemesine rağmen, 28. gün dayanımı, orjinal kapalı devre örneğinin 28 günlük dayanımıyla aynı değeri vermektedir. Kapalı devre öğütme sisteminin etkisi, aynı tane boyu dağılımındaki -30+5 µm örneklerinde de gözükmekte, kapalı devre örneği tüm yaşlarda açık devre örneğinden daha fazla dayanıma sahip olmaktadır.

Kapalı ve açık devre ürünlerinin oluşturulan farklı dağılımlarında özellikle dayanım açısından farklılıklar görülmektedir. En iyi sonuçlar bir önceki deneysel çalışmada olduğu gibi -30+5 µm ürünlerinde elde edilmiştir. Kapalı devre -30+5 µm dağılımı tüm örneklerden daha yüksek dayanım değerleri vermiş, TS EN 197-1 standardında tanımlanan PÇ 42.5 N için en yüksek 28 günlük dayanım limitine ulaşmıştır. Çizelge 6.2'de tüm dağılım örneklerinin, kendi orjinal örneklerine göre 28 günlük basınç dayanımı için değişim yüzdeleri görülmektedir.

Çizelge 6.2. Örneklerin kapalı ve açık devre ürünlerine göre 28 günlük basınç dayanımı değişim yüzdeleri

	Basınç dayanımı (28 günlük) MPa	Kapalı devre ürününe göre değişim (%)	Açık devre ürününe göre değişim (%)
Kapalı Devre	49.8		
Açık Devre	49.4		
Kapalı Devre -30 µm	56.9	+ 14.3	
Açık Devre -30 µm	54.9		+ 11.1
Kapalı Devre -30+5 µm	61.9	+ 24.3	
Açık Devre -30+5 µm	59.7		+ 20.8
Kapalı Devre +5 µm	49.2	- 1.2	
Açık Devre +5 µm	45.4		- 8.8

PÇ 42.5 N tipindeki bir çimentoda -30 µm miktarı yaklaşık %70-80 arasında değişmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre standartta belirtilen en yüksek dayanım değeri iri ve ince tane miktarının azaltıldığı -30+5 µm örneklerinde görülmüştür. Bilindiği gibi 32.5 ile 42.5 dayanım sınıfları arasında % 30'luk bir dayanım farkı bulunmaktadır. 32.5 dayanım sınıfındaki bir çimentonun satış fiyatı yaklaşık 85 YTL/ton olurken, 42.5 için bu fiyat 95 YTL/ton'a çıkmaktadır. Aynı şekilde deneysel çalışmada kullanılan 42.5 tipindeki çimento ile -30+5 µm tane boyu aralığındaki çimento arasında % 38'lik bir dayanım farkı elde edilmiş, bir üst dayanım sınıfı değerlerine çıkmıştır. Öte yandan bazı endüstriyel çimento tesislerinde,  $d_{50}= 3-5 \mu\text{m}$  ve  $d_{97} \sim 15 \mu\text{m}$  olan filtre altı ürününün depolama sorunlarından dolayı yaklaşık % 5 oranında son ürüne karıştırıldığı bilinmektedir. Bu filtre altı malzemesinin son ürün olan PÇ 42.5 R'ye karıştırıldığı ve karıştırılmadığı durumda örnekler alınarak dayanım değerleri incelenmiştir. Böyle incelikte bir malzemenin son ürüne karıştırılmadığı durumdaki dayanımı, karıştırılan örneğin dayanımından ~% 3 kadar fazladır. Yapılan araştırma ve görüşmeler sonucunda (Sherrill, 2005, yazılı görüşme)

böyle tane boyu dağılımı ve kimyasal özelliklere sahip çimentonun; nükleer atıkların depolanmasında, petrol kuyularının sızdırmazlığının sağlanmasında, toprak kaymalarının önlenmesi amacıyla toprak stabilizasyonunda ve tünellerde zayıf bölgelere enjeksiyon edilerek sızdırmazlıkta kullanıldığı bilgisine ulaşılmıştır. Böyle bir ürünün satış fiyatı dünya genelinde yaklaşık 1000 \$/ton civarındadır (Kumar et.al, 2000). Dolayısıyla dayanım değerlerinde azalma olmadan ve filtre kapasitesi zorlanmadan, çimentodan ince malzemenin uzaklaştırılması ile yeni bir ürün pazarlama imkanı doğabilir.

## 7. SONUÇLAR

YBMD ve bilyalı değirmen öğütme mekanizmalarındaki farklılığın, dar tane boyu ve dağılım örneklerinde fiziksel, kimyasal, mineralojik ve morfolojik anlamda incelenerek servis özellikleri üzerinde etkisinin belirlendiği çalışmalar ile farklı çimento tipi ve öğütme devre tasarımlarında fiziksel parametrelerin servis özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmaların sonuçları aşağıda özetlenmektedir.

- Dar tane boyu fraksiyonlarının kimyasal bileşimleri aynı olmasına rağmen, mineralojik bileşimleri inceliğe bağlı olarak farklılık göstermektedir.
- BET yüzey alanı değerleri YBMD fraksiyonlarında çatlaklı yapıdan dolayı daha fazla olurken, Blaine yüzey alanı değerleri bilyalı değirmen örneklerinde daha fazladır. Morfolojik analizde elde edilen SEM fotoğrafları; YBMD örneklerinin daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğunu, bilyalı değirmen örneklerinin ise daha düzgün yüzeylerden oluştuğunu göstermektedir.
- Özellikle alit minerali açısından YBMD öğütme mekanizmasında tane boyu incelidikçe daha iyi serbestleşme sağlanmaktadır. Yüksek basınç altında kırılmanın, en zayıf bölge olan mineral sınırları boyunca gerçekleştiği ve bunun sonucunda aralarında sertlik farkı bulunan alit ve belit minerallerinin faz sınırları boyunca serbestleştiği düşünülmektedir. Aynı şekilde, alit içindeki belit düğümlerine tane boyuna bağlı olarak YBMD ürünlerinde daha az rastlanmaktadır. Alit ve belitin ortalama kristal büyüklükleri öğütme mekanizmasına bağlı olarak herhangi bir değişim göstermemektedir.
- YBMD örneklerinin daha çatlaklı bir yapıda olması su ihtiyacı değerlerinde artışa neden olmaktadır. Bilyalı değirmen örneklerinin basınç dayanımı değerleri, YBMD örneklerine göre az da olsa daha yüksektir. Çalışılan örnekler için serbestleşmenin dayanım üzerinde bir etkisinin olmadığı bulunmuştur.
- Çalışmanın dağılım örneklerinin incelendiği kısmında; su ihtiyacı hem tane boyu hem de öğütme mekanizma farklılığına göre değişmekte, YBMD örneklerinde daha fazla su tüketilmektedir. Aynı kimyasal bileşim ve tane boyu

dağılımına sahip bilyalı değirmen ve YBMD ürünlerinin dayanım değerlerinde önemli farklar görülmüş; bilyalı değirmen ürünleri daha yüksek dayanım değerleri vermiştir.

- -30+2  $\mu\text{m}$  aralığındaki malzemenin PÇ 42.5 R içindeki oranının % 6 kadar arttırılmasıyla 28 günlük standart dayanımlar PÇ 42.5 R'ye göre % 13 artmaktadır.
- -20+5  $\mu\text{m}$  boyut aralığındaki malzemenin PÇ 42.5 R'ye katılmasıyla elde edilen erken dayanım değerleri, tane boyu dağılımındaki homojenlik artışına bağlı olarak artmaktadır. -20+5  $\mu\text{m}$  katkı oranı arttıkça tane boyu dağılımı daha dikleşirken, Blaine yüzey alanı değeri düşmektedir. Fakat dayanım değerleri % 10, 20, 30 ve 40 katkı oranlarında değişmezken, PÇ 42.5 R'ye göre yaklaşık % 5 kadar artmaktadır. Dolayısıyla; tane boyu dağılım eğiminin dikleştirildiği ve daha az özgül yüzey alanına sahip bir örnekle de benzer dayanım değerlerine ulaşmak mümkündür.
- İncelik erken dayanımda etkin olurken, geç dayanıma katkısı daha azdır. Hatta 10-15  $\mu\text{m}$  inceliğine kadar dayanım artmakta, ancak incelik, bu değerden daha fazla olduğunda dayanım olumsuz yönde gelişmektedir. Çünkü ince taneler ortam reolojisini ve tane boyu dağılımındaki homojenliği bozmaktadır.
- Çimento içindeki yaklaşık 30  $\mu\text{m}$ ' dan daha iri taneler dayanımı azaltmaktadır. Dolayısıyla 28 günlük en yüksek çimento dayanımı, -30+5  $\mu\text{m}$  örneğinde olduğu gibi dağılımın iri ve ince uçlarının giderildiği ve daha dik bir dağılımın olduğu koşullarda elde edilebilir.



## 8. ÖNERİLER

Farklı mekanizmalarla öğütülen çimento örneklerinin fiziksel ve morfolojik özelliklerinde farklılıkların olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların, hidrasyon tepkimelerine nasıl yansıtacağını görebilmek için hidrasyon ısısını belirleme testi uygulanabilir. Böylece farklı öğütme mekanizmalarıyla üretilen ürünlerin dayanım gelişmesi hakkında ön fikir elde edilebilir.

Çalışmada, PÇ 42.5 ve PÇ 42.5 R ürünleri için yaklaşık 5-30 µm fraksiyonunun dayanım üzerinde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, günümüzde ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı katkı çimento üretimi yaygınlaşmaktadır. Dolayısıyla, katkı çimentolarda bu aralıktaki çimento fraksiyonunun davranımının incelenmesi uygun olabilir.

Çalışma sonunda varılan diğer bir sonuç ise; ince tanelerin ortam reolojisini ve tane boyu homojenliğini bozduğu, dayanımın bu durumdan olumsuz etkilendiğidir. İnce tanelerin ürün kalitesine etkisini daha iyi açıklayabilmek için, çimento harcının 28 günlük dayanım sonundaki kırılma yüzeylerinde oluşan hidrasyon ürünlerinin homojenliği SEM yöntemiyle incelenebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahmed, W.U., 1991, Advances in sample preparation for clinker and concrete microscopy, World Cement, August, 8-12.
- Aiqin, W., Chengzhi, Z. and Ningsheng, Z., 1999, The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement, Cement and Concrete Research, 29, 1721-1726.
- Allen, T., 1981, Particle Size Measurement, Powder Technology Series, Chapman and Hall, London, 674p.
- Altun, A. and Ölmez, N., 2001, Comparative investigations of microstructure and grindability of cement clinker, The Journal of Ore Dressing, Issue 6, 2-8.
- Altun, A., 2000, Çimento klinkerindeki fazların oluşumu ve mikroyapıların incelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2 (1), 29-40.
- Altun, A., 1998, Klinker kalite kontrolünde mikroskopik kriterler, Çimento ve Beton Dünyası, Sayı 16, 22-32.
- Anwander, A., Neyran, B., Haase, J. and Baskurt, A., 1998, New methods for clinker phase recognition using automatic image analysis, World Cement Research and Development, April, 77-84.
- Apling, A. and Bwalya, M., 1997, Evaluating high pressure milling for liberation enhancement and energy saving, Minerals Engineering, Vol. 10, No. 9, 1013-1022.
- Battersby, M.J.G., Kellerwessel, H. and Oberhauser, G., 1993, High pressure particle bed comminution of ores and minerals, World Cement, November, 19-23.
- Battersby, M.J.G., Kellerwessel, H. and Oberhauser, G., 1992, Important advances in the development of high pressure rolls comminution for the minerals industry, Proceedings of Extractive Metallurgy of Gold and Base Metals, Australia, 2-8.
- Beaudoin, J.J. and Ramachandran, V.S., 1992, A new perspective on the hydration characteristics of cement phases, Cement and Concrete Research, Vol. 22, 689-694.

- Bentz, D.P. and Stutzman, P.E., 1994, SEM analysis and computer modelling of hydration of portland cement particles, *Petrography of Cementitious Materials*, ASTM STP 1215, Sharon M. Dehayes and David Stark (eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 60-73.
- Bonen, D. and Diamond, S., 1991, Application of image analysis to a comparison of ball mill and high pressure roller mill ground cement, *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy*, Florida, 101-119.
- Brown, A. W. and Bye, G. C., 1989, Portland Çimentosunun Yapısı ve Kimyası, Çimento Teknolojisi Teknik Eğitim, Çimhol A. Ş. Yayınları, No. 2, 13-35.
- Brüggemann, H. and Bentrup, L., 1990, Relationship between cement strength and the chemico-mineralogical parameters of the clinker, *ZKG*, No. 1, 30-33.
- Bye, G.C., 1999, *Portland Cement composition, production and properties*, Thomas Telford 2<sup>nd</sup> Edition, London, 225s.
- Campbell, D.H., 1999, *Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker*, Portland Cement Association, Second Edition, USA, 201p.
- Chermant, J., Chermant, L., Coster, M., Dequiedt, A. and Redon, C., 2001, Some fields of applications of automatic image analysis in civil engineering, *Cement and Concrete Composites*, 23, 157-169.
- Clemex User Guide, 2001, Clemex Technologies inc., Canada, 322p.
- Çelik, İ.B. and Öner, M., 2006, The influence of grinding mechanism on the liberation characteristics of clinker minerals, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 422-427.
- Detwiler, R.J., 1995, High efficiency separators, Part 1: Effect on cement, *ZKG International*, No.7, 384-395.
- Diamond, S. and Olek, J., 1990, Cement particle characterization by SEM-chemical image analysis systems, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy*, Canada, 356-369.
- Diamond, S. and Leemann, M.E., 1995, Pore size distributions in hardened cement paste by SEM image analysis, *Material Research Society Symposium Proceedings*, 370, 217-226.

- DPT, 2001, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Çimento Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu, 62s.
- Duda, W. H., 1985, Cement-Data-Book International Process Engineering in the Cement Industry, Volume 1, 302p.
- Dunne, R., Goulsbra, A. and Dunlop, I., 1996, High pressure grinding rolls and the effect on liberation: comparative test results, Randol Gold Forum, Conference Proceedings, California, 49-54.
- Ehrentraut, G. and Rao, T.R.R., 2001, Experience with a roller press in the Pellet Plant of Kudremukh Iron Ore Company Ltd., Aufbereitungs-Technik/Mineral Processing, No.10/October, 469-476.
- Ekmekçi, Z., Can, M., Ergün, Ş.L., Gülsoy, Ö.Y., Benzer, H. and Çelik, İ.B., 2005, Performance evaluation of ÇBİ flotation plant using mineralogical analysis, The 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, İzmir, 233-240.
- Ellerbrock, H.G., 1994, High pressure grinding rolls, ZKG, No.4, E104-110.
- Ellerbrock, H.G., Sprung, S. and Kuhlmann, K., 1990, Particle size distribution and properties of cement, Part III: Influence of the grinding process, ZKG, No. 3, 55-63.
- Erdoğan, T. Y., 1995, Çimentolar, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, 121s.
- Ergin, H., 1998, Hammadde kimyasal kompozisyonunun çimento üretimine ve özelliklerine etkileri, Çimento ve Beton Dünyası, Sayı: 14, 11-16.
- Falutsu, M., 1994, Measurement of the degree of liberation of a mineral, Minerals Engineering, Vol. 7, No. 4, 491-493.
- Fandrich, R.G., Bearman, R.A., Boland, J. and Lim, W., 1997, Mineral liberation by particle bed breakage, Minerals Engineering, Vol. 10, No. 2, 175-187.
- Felekoğlu, B., Tosun, K. ve Altun, İ.A., 2005, Optik mikroskop ve görüntü işleme teknikleri kullanarak klinker karakterizasyonu, Bölüm I-Porozite ve kristal boyutu dağılımı, Çimento ve Beton Dünyası, Sayı 57, 54-67.
- Feret, B. and Feret, C.F., 1999, C<sup>em</sup>QUANT® software mathematical modeling in quantitative phase analysis of Portland cement, Cement and Concrete Cement, Vol. 29, 1627-1633.

- Frigione, G. , Zenone, F. and Esposito, M.V., 1983, The effect of chemical composition on portland cement clinker grindability, *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, 483-492.
- Frigione, G. and Marra, S., 1976, Relationship between particle size distribution and compressive strength in portland cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, 113-128.
- Glasser, F.P., 1998, *The Burning of Portland Cement*, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Peter C. Hewlett (ed.) Fourth Edition, John Wiley&Sons, New York, pp 195-236.
- Glasser, F.P., 2005, Yazılı görüşme, University of Aberdeen, Engineering & Physical Sciences School, Chemistry, UK, f.glasser@abdn.ac.uk.
- Guirado, F., Gali, S. and Chinchon, S., 2000, Quantitative Rietveld analysis of aluminous cement clinker phases, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 1023-1029.
- Hills, L.M., 1995, The effect of clinker microstructure on grindability: Literature review database, Portland Cement Association Report, 90p.
- Halbleib, A., 2005, Development in Polysius grinding technology and Polytrack proven reliability, TCMA VIII. Technical Seminar, November, Ankara, 11-16.
- Hargave, R.V., Venkateswaran, D., Deshmukh, V.V. and Chatterjee, A.K., 1985, Quantification of varying effects of a set of clinker microstructural parameters on cement strength at various ages, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy*, USA, 407-418.
- Holderbank Cement Seminar, 1998, *Process Technology I-Tube mills* Chapter 7, 315-392.
- Hong, H., Fu, Z. and Min, X., 2001, Effect of cooling performance on the mineralogical character of Portland cement clinker, *Cement and Concrete Research*, 31, 287-290.
- Hoşten, Ç. and Özbay, C., 1998, A comparison of particle bed breakage and rod mill grinding with regard to mineral liberation and particle shape effects, *Minerals Engineering*, Vol.11, No.9, 871-874.

- Jiang, S.P., Mutin, J.C. and Nonat, A., 1995, Studies on mechanism and physico-chemical parameters at the origin of the cement setting, I. The fundamental processes involved during the cement setting, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, 779-789.
- Jorgensen, S.W., 2005, Cement grinding-a comparison between vertical roller mill and ball mill, *Cement International*, No.2, 55-63.
- Jourlin, M., Roux, B. and Faure, R., 2001, Recognition of clinker phases by automatic image analysis, *Cement and Concrete Composition*, 23, 207-214.
- Kellerwessel, H.A.M., 1996, High pressure particle bed cominution, *Engineering and Mining Journal*, February, 45-52.
- Kosmatka, S.H., Panarese, W.C., Gissing, K.D. and MacLeod, N.F., 1995, Design and Control of Concrete Mixtures, Canadian Portland Cement Association, 221p.
- Kuhlmann, K., Ellerbrock, H.G. and Sprung, S., 1985, Particle size distribution and properties of cement, Part I: Strength of portland cement, *ZKG*, No. 6, 136-145.
- Kumar, S., Singh, C. J., Singh, R. P. and Kachari, J., 2000, Microfine cement: Special superfine portland cement,  
<http://www.ongcindia.com/techpaper1.asp?fold=techpaper&file=techpaper1.txt>
- Kurdowski, W., 1991, Cement Manufacture, *Cement and Concrete Science and Technology Volume I Part I*, S. N. Ghosh (ed.), ABI Books Private Limited, India, 57-98.
- Lindqvist, J.E. and Åkesson, U., 2001, Image analysis applied to engineering geology, a literature review, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60, 117-122.
- Locher, D. and Odler, I., 1989, Interaction phenomena in the combined hydration of clinker minerals, *Il Cemento*, 1, 25-35.
- Lundgaard, N. and Jøns, E.S., 2003, Quantitative Rietveld XRD analysis, *World Cement*, Vol. 34, 59-63.
- Maki, I., Ito, S., Tanioka, T., Ohno, Y. and Fukuda, K., 1993, Clinker grindability and textures of alite and belite, *Cement and Concrete Research*, 23, 1078-1084.

- Moir, G.K., 1997, Cement Production: state of art, British Ceramic Transactions, Vol.96, No. 5, 204-212.
- Mörsky, P., Klemetti, M. and Knuutinen, T., 1995, A comparison of high pressure roller mill and conventional grinding, Proceedings of the XIX IMPC, Chapter 8, SME, 55-58.
- Müller-Pfeiffer, M. and Clemens, P., 2004, Comparison of grinding systems for cement production and examination of the charge grading in downstream ball mills, Cement International, Vol. 2, 59-67.
- Nielsen, H.J. and Tsuchiya, S., 2001, Improved operating results of vertical roller mills due to modified classifier, ZKG International, No. 1, 32-37.
- Odler, I., 1998, Hardening, Hydration and Setting of Cement, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Peter C. Hewlett (ed.) Fourth Edition, John Wiley&Sons, New York, pp 241-289.
- Odler, I. and Chen, Y., 1995, Influence of the method of comminution on the properties of cement, ZKG International, No. 9, 496-500.
- Odler, I. and Chen, Y., 1990, Influence of grinding in high-pressure grinding rolls on the properties of the portland cement, ZKG, No. 6, 145-147.
- Öney, N., 1998, Çimentonun Kimyası, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Eğitim ve Değerlendirme Müdürlüğü, Ders Notları Serisi, Ankara, 1-29.
- Patton, W.J., 1986, Cements and Concretes, Materials in Industry, Third Edition, 408p.
- Powers, T.C., 1939, The Bleeding of Portland Cement, Paste, Mortar and Concrete, Portland Cement Association, Chicago, 156p.
- Qingyun, D., 2005, The effect and analyzing method of particle characteristic to cement performance,  
[http://www.bettersize.com/english/E\\_technology/E\\_technology3.htm](http://www.bettersize.com/english/E_technology/E_technology3.htm)
- Rößler, M. and Odler, I., 1985, Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 15, 320-330.

- Sas, L., Opoczky, L. and Gavel, V., 2000, Knowing clinker microstructure-A possibility to influence grindability through technology, Proceedings of the 22<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy, Montreal, 215-223.
- Schnatz, R., Ellerbrock, H.G. and Sprung, S., 1995, Influencing the workability characteristics of cement during finish grinding with high-pressure grinding rolls, ZKG International, No. 5, 264-273.
- Sherrill, F.A., 2005, Yazılı görüşme, Surecrete Inc., 155 N.E. 100th St., Suite 300, Seattle, WA 98125, fred@surecrete.com.
- Škvára, F., Kolár, K., Novotný, J. and Zadák, Z., 1981, The effect of cement particle size distribution upon properties of pastes and mortars with low water-to-cement ratio, Cement and Concrete Research, Vol.11, 247-255.
- Sprung, S., Kuhlmann, K. and Ellerbrock, H.G., 1985, Particle size distribution and properties of cement, Part II: Water demand of portland cement, ZKG, No. 9, 275-281.
- Stutzman, P. and Leigh, S., 2002, Phase composition analysis of the NIST reference clinkers by optical microscopy and X-ray powder diffraction, NIST Technical Note 1441, 44p.
- Taylor, H.F.W, 1997, Cement Chemistry, Thomas Telford Second Edition, 459p.
- Taylor, H.F.W, 1964, The Formation and Phase Composition of Portland Cement Clinker, The Chemistry of Cements, Volume 1, Academic Press, 460p.
- Theisen, K., 1997, Quantitative determination of clinker phases and pore structure using image analysis, Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy, Ohio, 30-44.
- TS EN 196-1, 2002, Türk Standartları Enstitüsü, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini.
- TS EN 196-3, 2002, Türk Standartları Enstitüsü, Çimento Deney Metotları-Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini.
- TS EN 197-1, 2002, Türk Standartları Enstitüsü, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- TS EN 196-6, 2000, Türk Standartları Enstitüsü, Çimento Deney Metotları-İncelik tayini.



- Tsivilis, S. and Parissakis, G., 1995, A mathematical model for the prediction of cement strength, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, 9-14.
- Tsivilis, S., Tsimas, S., Benetatou, A. and Haniotakis, E., 1990, Study on the contribution of the fineness on cement strength, *ZKG*, No. 1, 26-29.
- Tsivilis, S., Tsimas, S. and Parissakis, G., 1987, T.T.P. ®- A new concept for the selective grinding of materials, *World Cement*, October, 336-339.
- Yardi, J., 2005, Separator technology, *World Cement*, October, 87-104.
- Yeğınobalı, A., 2005, Çimento “yeni bir çağın malzemesi”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, 3. baskı, 50s.
- Wills, B.A. and Atkinson, K., 1993, Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies, *Minerals Engineering*, Vol. 6, No. 7, 697-706.
- Zhang, Y.M. and Napier-Munn, T.J., 1995, Effects of particle size distribution, surface area and chemical composition on portland cement strength, *Powder Technology*, 83, 245-252.

# EK 1

**Clemex Vision(TM) - Professional Edition (Evaluation)**

File Edit Display Run Options Twain Setup Viewers Help

Design Run Analyze User Explorer Results Data Bitplane Image Viewers Toolbox Routine

Image - 1(20x).jpg [1024x768]

Routine - bolu-03.ipp

File Edit Execute Options

001 Load Image '46'  
 002 Clear => All  
 003 Color Smooth x3  
 004 Delineation x1  
 005 Color Threshold -> BPL1  
 006 Invert BPL1 -> BPL1  
 007 Closing CIRC x2 => BPL1 Extend  
 008 Invert BPL1 -> BPL1  
 009 Trap BPL1 -> None 15x15  
 010 Copy BPL1 -> BPL4  
 011 Dilate CIRC x1 => BPL4  
 012 (BPL4 DIFF BPL1) -> BPL4  
 013 Pause Edit Draw BPL7  
 014 Dilate CIRC x1 => BPL7  
 015 (BPL1 DIFF BPL7) -> BPL1  
 016 Clear => BPL4, BPL7  
 017  
 018 Pause Edit Lasso BPL2  
 019 (BPL1 AND BPL2) -> BPL8  
 020 (BPL2 DIFF BPL8) -> BPL2  
 021  
 022 Clear => BPL8  
 023 Copy BPL2 -> BPL8  
 024 Dilate CIRC x1 => BPL8  
 025 (BPL8 DIFF BPL2) -> BPL8

512x282 1.000000000000  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  microns import x1/2 (1008, 328) If

Bitplane Viewer

<input type="checkbox"/> Allt	<input type="checkbox"/> Alum Inat+ ferrit	<input type="checkbox"/> All	<input type="checkbox"/> Allt+ Belt	<input type="checkbox"/> Belt+ F Binary	<input type="checkbox"/> Bel In Allt	<input type="checkbox"/> All ON
<input type="checkbox"/> Belt	<input type="checkbox"/> Liberated Allt	<input type="checkbox"/> Liberated Belt	<input type="checkbox"/> Liberated A+ F	<input type="checkbox"/> Allt+ F Binary	<input type="checkbox"/> Ternaries	<input type="checkbox"/> All OFF

Toolbox - Object Measure

Area  
 Filled Area  
 Perimeter  
 Convex Perimeter  
 Length  
 Width  
 Breadth  
 Feret Average  
 Ferets >>  
 String Length  
 String Width  
 Inner Diameter  
 Outer Diameter  
 Circular Diameter  
 Spherical Diameter

Source Precision

<input type="checkbox"/> BP1	<input type="checkbox"/> BP7	<input checked="" type="radio"/> 8 ferets
<input type="checkbox"/> BP2	<input type="checkbox"/> BP8	<input type="radio"/> 16 ferets
<input type="checkbox"/> BP3	<input type="checkbox"/> BP9	<input type="radio"/> 32 ferets
<input type="checkbox"/> BP4	<input type="checkbox"/> BP10	<input type="radio"/> 64 ferets
<input type="checkbox"/> BP5	<input type="checkbox"/> BP11	<input type="checkbox"/> Map Data
<input type="checkbox"/> BP6	<input type="checkbox"/> BP12	

Insert Modify Undo

Results

File Edit Chart

OBJM5 Count - FeretAvg

Chart

FeretAvg ( $\mu\text{m}$ )	Count
15	20
25	10
35	8
45	10
55	10
65	8
75	8
85	5
95	4
105	2
115	1
125	1
135	1
145	1
155	1
165	1
175	1
185	1
195	1
205	1
215	1
225	1
235	1
245	1

start

Clemex Vision(TM) - P... TR 14:12

## ALGORİTMA ÖRNEĞİ

```
001 Load Image '46'  
    File: 46.jpg  
    Path: C:\ilkay\CEMENT\BOLU-2003\BM63+53  
002 Clear => All  
003 Color Smooth x3  
004 Delineation x1  
005 Color Threshold -> BPL1, Hue: start = 180°, delta = 106°, Saturation: 0%..100%, Intensity: 37..246  
006 Invert BPL1 -> BPL1  
007 Closing CIRC x2 => BPL1 Extend  
008 Invert BPL1 -> BPL1  
009 Trap BPL1 -> None 15x15  
010 Copy BPL1 -> BPL4  
011 Dilate CIRC x1 => BPL4  
012 (BPL4 DIFF BPL1) -> BPL4  
013 Pause Edit Draw BPL7  
014 Dilate CIRC x1 => BPL7  
015 (BPL1 DIFF BPL7) -> BPL1  
016 Clear => BPL4, BPL7  
017 '  
018 Pause Edit Lasso BPL2  
019 (BPL1 AND BPL2) -> BPL8  
020 (BPL2 DIFF BPL8) -> BPL2  
021 '  
022 Clear => BPL8  
023 Copy BPL2 -> BPL8  
024 Dilate CIRC x1 => BPL8  
025 (BPL8 DIFF BPL2) -> BPL8  
026 Pause Edit Draw BPL7  
027 Dilate CIRC x1 => BPL7  
028 (BPL2 DIFF BPL7) -> BPL2  
029 Clear => BPL7, BPL8  
030 '  
031 Gray Threshold, BPL3 range 234..255  
032 Closing CIRC x2 => BPL3 Extend  
033 Dilate CIRC x1 => BPL3  
034 '  
035 ' Checking overlaps  
036 '  
037 (BPL1 AND BPL3) -> BPL8  
038 (BPL3 DIFF BPL8) -> BPL3  
039 Clear => BPL8  
040 (BPL2 AND BPL3) -> BPL8  
041 (BPL2 DIFF BPL8) -> BPL2  
042 Clear => BPL8  
043 (BPL1 AND BPL2) -> BPL8  
044 (BPL2 DIFF BPL8) -> BPL2  
045 Clear => BPL8  
046 '  
047 ' Length measurements of Alite&Belite  
048 Object Measures (BPL1, 2) -> OBJM5 Length, Feret Average, Sphericity, Aspect Ratio  
049 '  
050 ' Particles summing at Bitplane 5  
051 (BPL1 OR BPL2) -> BPL5  
052 (BPL3 OR BPL5) -> BPL5
```

053 '  
 054 ' Percentage area of Alite, Belite and A+F in particles  
 055 Relative Measures -> RELM6  
     Area Percent BPL1, BPL2, BPL3  
     Relative to BPL5  
 056 Closing CIRC x2 => BPL5 Extend  
 057 Copy BPL5 -> BPL8  
 058 Dilate CIRC x1 => BPL8  
 059 (BPL8 DIFF BPL5) -> BPL8  
 060 Pause Edit Draw BPL7  
 061 Dilate CIRC x1 => BPL7  
 062 (BPL5 DIFF BPL7) -> BPL5  
 063 Clear => BPL7, BPL8  
 064 '  
 065 Object Transfer BPL5 -> None  
     Area less than 100µm<sup>2</sup>  
 066 Copy BPL5 -> BPL11  
 067 ' Sorting liberation types  
 068 Object Transfer BPL5 -> BPL4  
     Child Area Percent.BPL1 greater than 95%  
 069 Object Transfer BPL5 -> BPL6  
     Child Area Percent.BPL2 greater than 95%  
 070 Object Transfer BPL5 -> BPL8  
     Child Area Percent.BPL3 greater than 95%  
 071 Object Transfer BPL5 -> BPL9  
     Child Area Percent.BPL1 less than 5%  
 072 Object Transfer BPL5 -> BPL10  
     Child Area Percent.BPL2 less than 5%  
 073 Object Transfer BPL5 -> BPL7  
     Child Area Percent.BPL3 less than 5%  
 074 Copy BPL5 -> BPL12  
 075 Relative Measures -> RELM9  
     Area Percent BPL4, BPL6, BPL7, BPL8, BPL9, BPL10, BPL12, Relative to BPL11  
 076 Clear => BPL5  
 077 '  
 078 ' Measuring of child areas of all in all sorts  
 079 Object Measures (BPL4, 6, 7, 8, 9, 10, 12) -> OBJM1  
     Area  
     Child Area Percent.BPL1  
     Child Area Percent.BPL2  
     Child Area Percent.BPL3  
 080 '  
 081 ' Check if all sorts are correct!!!  
 082 '  
 083 ' Amount of belite in alite  
 084 (BPL1 OR BPL2) -> BPL5  
 085 Clear => BPL11  
 086 Object Transfer BPL5 -> BPL11  
     Child Area Percent.BPL2 greater than 85%  
 087 Clear => BPL4, BPL6, BPL7, BPL8, BPL9, BPL10  
 088 Copy BPL11 -> BPL6  
 089 Clear => BPL11  
 090 Object Transfer BPL5 -> BPL11  
     Child Area Percent.BPL2 greater than 1%  
 091 Object Measures (BPL11) -> OBJM2  
     Area

Child Area Percent.BPL1  
Child Area Percent.BPL2  
092 '  
093 Clear => BPL5, BPL6  
094 '  
095 ' Particles summing at Bitplane 5  
096 (BPL1 OR BPL2) -> BPL5  
097 (BPL3 OR BPL5) -> BPL5  
098 Closing CIRC x2 => BPL5  
099 Copy BPL5 -> BPL8  
100 Dilate CIRC x1 => BPL8  
101 (BPL8 DIFF BPL5) -> BPL8  
102 Pause Edit Draw BPL7  
103 Dilate CIRC x1 => BPL7  
104 (BPL5 DIFF BPL7) -> BPL5  
105 Clear => BPL7, BPL8  
106 Object Measures (BPL5) -> OBJM7, Area, Perimeter  
107 Field Measures (BPL5) -> FLDM8, Area, Perimeter

# **EK 2**

YBMD ve bilyalı değirmen ürünlerinin -90 µm dağılımları (Şekil 5.1)

Tane Boyu (µm)	BD	YBMD
	-90 µm	-90 µm
174	100.00	100.00
146	100.00	99.89
122	99.48	99.49
102	98.04	98.08
86	94.80	94.88
72	88.91	89.25
60	80.87	81.60
50	72.04	73.01
42	63.81	64.68
36	57.08	57.59
30	49.88	49.73
25	43.52	42.55
21	38.11	36.29
18	33.81	31.24
15	29.22	25.83
12	24.28	20.16
10	20.81	16.36
8.6	18.34	13.77
7.4	16.19	11.66
6.2	14.03	9.68
5.2	12.19	8.14
4.4	10.65	6.95
3.6	9.00	5.76
3	7.65	4.85
2.6	6.68	4.20
2.2	5.62	3.52
1.8	4.47	2.79

YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının Blaine özgül yüzey alanı ölçümleri (Şekil 5.4)

Blaine özgül yüzey alanı, cm <sup>2</sup> /g		
µm	YBMD	Bilyalı D.
-75+38	395	414
-63+53	443	508
-53+45	558	592
-45+38	651	695
-32+20	960	1070
-38	1930	2090



YBMD ve bilyalı değirmen (BD) ürünleri dar tane boyu ve -38 µm dağılımları (Şekil 5.2 ve 5.3)

Tane Boyu (µm)	-75+63 µm		-63+53 µm		-53+45 µm		-45+38 µm		Tane Boyu (µm)	-32+20 µm		-38 µm	
	YBMD	BD	YBMD	BD	YBMD	BD	YBMD	BD		YBMD	BD	YBMD	BD
<b>350</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>87.50</b>	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>294</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>73.50</b>	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>246</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>61.50</b>	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>206</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>51.50</b>	100.00	100.00	99.83	98.68
<b>174</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>43.50</b>	91.22	93.86	97.95	95.62
<b>146</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>36.50</b>	68.26	70.63	92.99	90.16
<b>122</b>	97.35	98.28	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>30.50</b>	41.55	42.54	83.52	81.33
<b>102</b>	86.49	84.27	96.45	97.24	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>25.50</b>	21.54	21.52	71.55	70.63
<b>86</b>	64.43	55.98	84.19	84.97	97.70	98.02	100.00	100.00	<b>21.50</b>	11.06	10.66	60.44	60.95
<b>72</b>	40.49	28.72	58.94	56.94	88.77	89.17	97.82	97.80	<b>18.00</b>	6.58	6.26	50.35	52.37
<b>60</b>	23.67	13.29	33.59	29.09	65.40	63.32	89.44	88.51	<b>15.00</b>	4.99	4.88	41.65	45.06
<b>50</b>	15.81	8.44	17.84	13.08	38.69	33.91	67.00	62.99	<b>12.50</b>	4.35	4.45	33.99	38.44
<b>42</b>	12.65	7.25	11.50	7.89	20.84	15.76	41.15	34.86	<b>10.50</b>	3.99	4.23	27.47	32.48
<b>36</b>	11.10	6.79	9.18	6.56	13.17	9.29	23.77	17.75	<b>9.00</b>	3.73	4.07	22.51	27.75
<b>30</b>	9.75	6.37	7.78	5.99	9.64	7.15	13.78	9.97	<b>7.50</b>	3.47	3.90	17.78	23.08
<b>25</b>	8.56	5.95	6.77	5.62	8.02	6.47	10.10	7.99	<b>6.25</b>	3.26	3.75	14.23	19.42
<b>21</b>	7.50	5.56	5.96	5.30	7.00	6.09	8.51	7.38	<b>5.25</b>	3.07	3.60	11.71	16.65
<b>18</b>	6.65	5.26	5.35	5.05	6.26	5.80	7.55	7.03	<b>4.50</b>	2.92	3.46	9.98	14.60
<b>15</b>	5.78	4.94	4.75	4.79	5.50	5.49	6.61	6.64	<b>3.75</b>	2.73	3.28	8.34	12.51
<b>12</b>	4.91	4.61	4.18	4.52	4.78	5.15	5.70	6.20	<b>3.00</b>	2.48	3.01	6.81	10.44
<b>10</b>	4.33	4.34	3.81	4.32	4.32	4.91	5.12	5.87	<b>2.50</b>	2.27	2.78	5.85	9.05
<b>8.6</b>	3.93	4.11	3.55	4.15	4.00	4.71	4.72	5.59	<b>2.15</b>	2.08	2.56	5.19	8.03
<b>7.4</b>	3.57	3.88	3.31	3.97	3.72	4.50	4.36	5.30	<b>1.85</b>	1.89	2.32	4.58	7.08
<b>6.2</b>	3.20	3.59	3.04	3.73	3.39	4.22	3.95	4.92	<b>1.55</b>	1.65	2.02	3.91	5.99
<b>5.2</b>	2.86	3.29	2.78	3.47	3.07	3.91	3.55	4.51	<b>1.30</b>	1.41	1.72	3.27	4.95
<b>4.4</b>	2.56	3.02	2.54	3.21	2.76	3.59	3.17	4.09	<b>1.10</b>	1.19	1.45	2.70	4.02
<b>3.6</b>	2.22	2.67	2.25	2.89	2.40	3.18	2.72	3.57	<b>0.90</b>	0.94	1.14	2.09	3.04
<b>3.0</b>	1.93	2.36	1.99	2.58	2.08	2.81	2.33	3.10	<b>0.75</b>	0.74	0.90	1.61	2.28
<b>2.6</b>	1.72	2.12	1.79	2.33	1.84	2.52	2.04	2.75	<b>0.65</b>	0.60	0.73	1.28	1.77
<b>2.2</b>	1.48	1.84	1.56	2.04	1.57	2.19	1.73	2.35	<b>0.55</b>	0.46	0.56	0.96	1.28
<b>1.8</b>	1.21	1.52	1.30	1.70	1.28	1.81	1.39	1.92	<b>0.45</b>	0.32	0.38	0.64	0.82

YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının BET yüzey alanı ölçümleri (Şekil 5.5)

BET, m <sup>2</sup> /g		
µm	YBMD	Bilyalı D.
-63+53	0.28	0.26
-45+38	0.35	0.30
-32+20	0.37	0.30

YBMD ve bilyalı değirmen -63+53 µm fraksiyonları için serbestleşme sınıflarındaki mineral dağılımları

Serbestleşme sınıfları	YBMD, %			
	Alit	Belit	Ara faz	Toplam
Serbest Alit	98.50	0.22	1.26	99.98
Serbest Ara faz	0.26	0.00	99.69	99.95
Serbest Belit	0.00	100.00	0.00	100.00
Belit-Ara faz İkilisi	0.18	77.73	21.05	98.96
Alit- Ara faz İkilisi	75.89	0.24	23.67	99.80
Alit-Belit İkilisi	47.03	49.43	3.15	99.61
Üçlü Bağlılar	49.21	24.64	25.74	99.59
Serbestleşme sınıfları	Bilyalı Değirmen, %			
	Alit	Belit	Ara faz	Toplam
Serbest Alit	98.66	0.09	1.24	99.99
Serbest Ara faz	0.00	0.00	99.96	99.96
Serbest Belit	0.00	100.00	0.00	100.00
Belit-Ara faz İkilisi	1.76	78.66	18.66	99.07
Alit- Ara faz İkilisi	75.64	0.44	23.76	99.85
Alit-Belit İkilisi	82.32	15.62	1.99	99.93
Üçlü Bağlılar	46.36	27.88	25.41	99.64

YBMD ve bilyalı değirmen -45+38 µm fraksiyonları için serbestleşme sınıflarındaki mineral dağılımları

<b>Serbestleşme sınıfları</b>	<b>YBMD, %</b>			
	<b>Alit</b>	<b>Belit</b>	<b>Ara faz</b>	<b>Toplam</b>
Serbest Alit	99.13	0.10	0.74	99.96
Serbest Ara faz	0.00	0.00	99.98	99.98
Serbest Belit	0.00	97.40	2.60	100.00
Belit-Ara faz İkilisi	0.38	82.79	16.41	99.57
Alit- Ara faz İkilisi	80.71	0.37	18.84	99.92
Alit-Belit İkilisi	81.59	16.56	1.70	99.85
Üçlü Bağlılar	42.60	35.04	22.15	99.79
<b>Serbestleşme sınıfları</b>	<b>Bilyalı Değirmen, %</b>			
	<b>Alit</b>	<b>Belit</b>	<b>Ara faz</b>	<b>Toplam</b>
Serbest Alit	99.01	0.09	0.87	99.97
Serbest Ara faz	0.00	0.00	99.97	99.97
Serbest Belit	0.00	100.00	0.00	100.00
Belit-Ara faz İkilisi	0.27	70.62	28.68	99.57
Alit- Ara faz İkilisi	78.54	0.45	20.94	99.93
Alit-Belit İkilisi	87.31	11.40	1.25	99.96
Üçlü Bağlılar	64.64	9.90	25.38	99.93

YBMD ve bilyalı değirmen -32+20 µm fraksiyonları için serbestleşme sınıflarındaki mineral dağılımları

<b>Serbestleşme sınıfları</b>	<b>YBMD, %</b>			
	<b>Alit</b>	<b>Belit</b>	<b>Ara faz</b>	<b>Toplam</b>
Serbest Alit	99.44	0.10	0.44	99.98
Serbest Ara faz	0.00	0.00	99.99	99.99
Serbest Belit	0.00	99.28	0.00	99.28
Belit-Ara faz İkilisi	0.15	77.82	21.37	99.35
Alit- Ara faz İkilisi	83.10	0.45	16.38	99.94
Alit-Belit İkilisi	80.03	18.67	1.24	99.93
Üçlü Bağlılar	52.17	26.48	21.17	99.82
<b>Serbestleşme sınıfları</b>	<b>Bilyalı Değirmen, %</b>			
	<b>Alit</b>	<b>Belit</b>	<b>Ara faz</b>	<b>Toplam</b>
Serbest Alit	99.44	0.10	0.44	99.98
Serbest Ara faz	0.00	0.03	99.95	99.98
Serbest Belit	0.00	99.75	0.00	99.75
Belit-Ara faz İkilisi	0.00	82.18	17.48	99.66
Alit- Ara faz İkilisi	79.89	0.33	19.73	99.94
Alit-Belit İkilisi	78.88	20.68	0.32	99.88
Üçlü Bağlılar	46.27	24.77	28.76	99.80

YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının su ihtiyacı (Şekil 5.22)

$\mu\text{m}$	Bilyalı D., %	YBMD, %
-75+63	36.0	40.0
-63+53	35.0	39.0
-53+45	36.7	38.8
-45+38	36.4	38.5
-32+20	33.0	35.0
-38	31.0	33.5

YBMD ve bilyalı değirmen dar tane boyu fraksiyonlarının 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları (Şekil 5.23, 5.24 ve 5.25)

$\mu\text{m}$	2 gün, MPa		7 gün, MPa		28 gün, MPa	
	YBMD	BD	YBMD	BD	YBMD	BD
-63+53	0.39	0.37	0.74	0.68	1.94	1.34
-53+45	0.67	0.76	1.03	1.36	2.36	2.68
-45+38	1.53	1.71	2.61	2.79	4.67	4.59
-32+20	3.85	4.2	8.5	8.7	18.4	21.6
-38	10.99	13.88	24.52	28.73	43.11	48.44

YBMD ve bilyalı değirmen (BD) ürünlerinin tane boyu dağılımları (Şekil 5.26 ve 5.27)

Tane Boyu ( $\mu\text{m}$ )	-75 $\mu\text{m}$		-63 $\mu\text{m}$		-53 $\mu\text{m}$		-45 $\mu\text{m}$		-38 $\mu\text{m}$		-20 $\mu\text{m}$	
	YBMD	BD	YBMD	BD	YBMD	BD	YBMD	BD	YBMD	BD	YBMD	BD
<b>87.50</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>73.50</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>61.50</b>	96.80	97.97	97.32	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>51.50</b>	90.82	93.46	91.95	96.14	96.73	100.00	98.40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>43.50</b>	83.68	86.30	85.24	88.59	90.72	95.68	94.19	96.66	98.27	98.29	100.00	100.00
<b>36.50</b>	75.71	77.05	77.53	78.64	82.53	87.13	86.76	89.30	93.56	93.03	100.00	100.00
<b>30.50</b>	67.64	67.79	69.51	68.85	73.53	76.93	77.59	79.65	85.75	84.42	99.69	99.98
<b>25.50</b>	59.93	59.60	61.68	60.42	64.81	67.43	68.46	70.12	76.60	74.89	99.08	99.80
<b>21.50</b>	53.00	52.64	54.58	53.44	57.02	59.49	60.38	61.94	67.98	66.31	98.01	99.13
<b>18.00</b>	46.32	46.10	47.74	46.91	49.59	52.18	52.77	54.35	59.70	58.21	95.72	97.43
<b>15.00</b>	40.03	40.03	41.34	40.81	42.65	45.43	45.66	47.33	51.96	50.68	90.97	93.57
<b>12.50</b>	34.27	34.59	35.45	35.28	36.32	39.30	39.10	40.95	44.86	43.82	83.15	86.79
<b>10.50</b>	29.30	29.95	30.36	30.55	30.92	34.01	33.38	35.43	38.70	37.89	73.54	78.06
<b>9.00</b>	25.44	26.31	26.37	26.84	26.74	29.84	28.91	31.07	33.84	33.20	64.48	69.48
<b>7.50</b>	21.50	22.55	22.29	23.00	22.51	25.52	24.36	26.56	28.79	28.33	54.25	59.39
<b>6.25</b>	18.20	19.35	18.87	19.73	18.98	21.84	20.56	22.72	24.47	24.21	45.32	50.23
<b>5.25</b>	15.59	16.76	16.16	17.07	16.20	18.86	17.57	19.62	21.00	20.87	38.09	42.57
<b>4.50</b>	13.63	14.76	14.13	15.03	14.13	16.58	15.35	17.26	18.37	18.33	32.63	36.64
<b>3.75</b>	11.65	12.70	12.09	12.94	12.04	14.26	13.11	14.85	15.71	15.74	27.08	30.48
<b>3.00</b>	9.67	10.61	10.07	10.81	9.96	11.93	10.88	12.42	13.08	13.13	21.47	24.16
<b>2.50</b>	8.35	9.17	8.73	9.36	8.58	10.34	9.39	10.77	11.33	11.36	17.72	19.90
<b>2.15</b>	7.40	8.09	7.76	8.28	7.58	9.16	8.32	9.54	10.08	10.06	15.10	16.85
<b>1.85</b>	6.53	7.07	6.87	7.25	6.67	8.04	7.34	8.38	8.94	8.82	12.84	14.18
<b>1.55</b>	5.56	5.92	5.86	6.08	5.67	6.75	6.26	7.05	7.67	7.41	10.56	11.40
<b>1.30</b>	4.66	4.83	4.91	4.97	4.73	5.53	5.25	5.79	6.47	6.09	8.63	9.01
<b>1.10</b>	3.86	3.89	4.06	4.00	3.91	4.46	4.36	4.69	5.41	4.93	7.04	7.07
<b>0.90</b>	3.00	2.90	3.14	2.99	3.03	3.34	3.40	3.52	4.25	3.71	5.43	5.14
<b>0.75</b>	2.32	2.16	2.42	2.22	2.34	2.48	2.64	2.64	3.33	2.77	4.20	3.73
<b>0.65</b>	1.86	1.66	1.93	1.71	1.87	1.92	2.12	2.05	2.69	2.16	3.38	2.84
<b>0.55</b>	1.40	1.19	1.44	1.22	1.40	1.38	1.60	1.48	2.04	1.56	2.55	2.00
<b>0.45</b>	0.94	0.75	0.96	0.77	0.93	0.87	1.08	0.94	1.39	1.00	1.73	1.24

YBMD ve bilyalı değirmen dağılım fraksiyonlarının Blaine özgül yüzey alanı ve BET yüzey alanı değerleri (Şekil 5.29 ve 5.30)

$\mu\text{m}$	Blaine, $\text{cm}^2/\text{g}$		BET, $\text{m}^2/\text{g}$	
	YBMD	Bilyalı D.	YBMD	Bilyalı D.
-75	2130	2153	0.469	0.504
-63	2161	2244	0.508	0.524
-53	2323	2487	0.567	0.602
-45	2432	2548	0.633	0.640
-38	2525	2678	0.648	0.659
-20	4012	4326	1.320	1.410

YBMD ve bilyalı değirmen ürün dağılımlarının 2, 7 ve 28 günlük standart basınç dayanımı (Şekil 5.31 ve 5.32)

$\mu\text{m}$	2 gün		7 gün		28 gün	
	YBMD	Bilyalı D.	YBMD	Bilyalı D.	YBMD	Bilyalı D.
-75	8.9	13.1	21.1	24.0	32.8	38.9
-63	10.1	14.5	21.8	28.3	36.1	43.2
-53	13.2	21.0	26.4	30.4	39.8	48.9
-45	15.7	23.2	29.9	36.6	46.4	49.7
-38	19.7	24.1	35.8	40.4	47.8	53.8
-20	36.3	28.3	40.7	36.0	53.6	40.3

PÇ 42.5 R ve PÇ 42.5 R'den oluşturulan dağılımlar (Şekil 5.33)

<i>Tane boyu, <math>\mu\text{m}</math></i>	-10 $\mu\text{m}$	-20 $\mu\text{m}$	-30 $\mu\text{m}$	-45 $\mu\text{m}$	<i>Tane boyu, <math>\mu\text{m}</math></i>	PÇ 42.5
87.5	100.00	100.00	100.00	100.00	350	100.00
73.5	100.00	100.00	100.00	100.00	294	100.00
61.5	100.00	100.00	100.00	100.00	246	100.00
51.5	100.00	100.00	100.00	100.00	206	100.00
43.5	100.00	100.00	100.00	98.41	174	100.00
36.5	100.00	100.00	99.98	93.77	146	100.00
30.5	100.00	99.99	99.03	86.48	122	99.91
25.5	100.00	99.84	96.59	78.61	102	99.48
21.5	100.00	99.37	92.52	71.48	86	98.65
18	100.00	98.17	86.46	64.50	72	97.04
15	100.00	95.54	78.84	57.67	60	94.30
12.5	99.95	90.76	70.56	51.13	50	90.27
10.5	99.58	84.17	62.73	45.28	42	85.29
9	98.59	77.26	56.24	40.52	36	80.19
7.5	95.93	68.59	49.22	35.42	30	73.66
6.25	91.17	60.25	42.97	30.91	25	67.05
5.25	84.45	52.90	37.66	27.11	21	60.90
4.5	76.94	46.91	33.38	24.08	18	55.66
3.75	66.78	40.30	28.71	20.77	15	49.73
3	54.30	32.93	23.54	17.12	12	43.00
2.5	45.00	27.65	19.84	14.50	10	38.10
2.15	38.03	23.79	17.13	12.57	8.6	34.48
1.85	31.72	20.40	14.73	10.86	7.4	31.23
1.55	25.10	16.92	12.25	9.07	6.2	27.78
1.3	19.39	13.96	10.13	7.52	5.2	24.66
1.1	14.78	11.53	8.38	6.24	4.4	21.92
0.9	10.29	9.02	6.56	4.90	3.6	18.83
0.75	7.11	7.09	5.15	3.86	3	16.20
0.65	5.16	5.77	4.19	3.15	2.6	14.23
0.55	3.42	4.41	3.21	2.41	2.2	12.06
0.45	1.97	3.03	2.20	1.66	1.8	9.65

PÇ 42.5 R örneğinden hazırlanan -30+2 µm ve -20+5 µm dağılımları ile farklı yüzdelerde -30+2 µm katılan PÇ 42.5 R dağılımları

<i>Tane boyu, µm</i>	-30+2 µm	<i>Tane boyu, µm</i>	-20+5 µm	% 5 -30+2 µm Katkılı PÇ 42.5	% 10 -30+2 µm Katkılı PÇ 42.5	% 15 -30+2 µm Katkılı PÇ 42.5	% 20 -30+2 µm Katkılı PÇ 42.5
87.5	100.00	350	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
73.5	100.00	294	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
61.5	100.00	246	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
51.5	100.00	206	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
43.5	100.00	174	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
36.5	99.96	146	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
30.5	98.98	122	100.00	99.96	99.97	100.00	99.96
25.5	95.36	102	100.00	99.59	99.65	100.00	99.66
21.5	89.29	86	100.00	98.80	98.92	99.29	99.02
18	81.37	72	100.00	97.26	97.48	97.94	97.76
15	72.68	60	100.00	94.68	95.03	95.71	95.62
12.5	64.05	50	100.00	90.90	91.45	92.42	92.48
10.5	56.26	42	100.00	86.18	86.98	88.23	88.56
9	49.88	36	99.98	81.30	82.34	83.79	84.40
7.5	42.91	30	99.89	74.95	76.23	77.86	78.76
6.25	36.49	25	99.70	68.42	69.80	71.52	72.56
5.25	30.80	21	99.10	62.23	63.56	65.23	66.28
4.5	26.11	18	97.51	56.89	58.08	59.64	60.62
3.75	21.00	15	92.56	50.80	51.76	53.13	53.96
3	15.71	12	79.01	43.86	44.53	45.64	46.29
2.5	12.35	10	62.82	38.79	39.26	40.15	40.66
2.15	10.22	8.6	48.37	35.04	35.35	36.06	36.47
1.85	8.61	7.4	34.92	31.65	31.83	32.39	32.68
1.55	7.21	6.2	21.57	28.03	28.08	28.53	28.67
1.3	6.16	5.2	12.09	24.76	24.72	25.08	25.07
1.1	5.34	4.4	6.28	21.89	21.77	22.08	21.96
0.9	4.48	3.6	2.40	18.68	18.51	18.76	18.54
0.75	3.76	3	0.76	15.97	15.79	15.99	15.72
0.65	3.21	2.6	0.26	13.98	13.79	13.97	13.67
0.55	2.58	2.2	0.09	11.80	11.62	11.75	11.46
0.45	1.86	1.8	0.01	9.42	9.25	9.31	9.09



Farklı yüzdelerde -20+5 µm katılan PÇ 42.5 R dağılımları

<i>Tane boyu, µm</i>	PÇ 42.5	% 10 -20+5 µm Katkılı PÇ 42.5	% 20 -20+5 µm Katkılı PÇ 42.5	% 30 -20+5 µm Katkılı PÇ 42.5	% 40 -20+5 µm Katkılı PÇ 42.5
350	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
294	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
246	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
206	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
174	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
146	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
122	99.91	99.97	99.95	99.95	99.95
102	99.48	99.64	99.69	99.73	99.77
86	98.65	98.94	99.03	99.17	99.31
72	97.04	97.55	97.75	98.02	98.36
60	94.30	95.13	95.58	96.08	96.78
50	90.27	91.50	92.43	93.25	94.49
42	85.29	87.01	88.55	89.73	91.67
36	80.19	82.38	84.57	86.14	88.80
30	73.66	76.42	79.48	81.58	85.18
25	67.05	70.35	74.33	76.97	81.51
21	60.90	64.61	69.40	72.50	77.83
18	55.66	59.56	64.87	68.25	74.08
15	49.73	53.50	58.92	62.33	68.28
12	43.00	45.89	50.45	53.29	58.36
10	38.10	39.84	43.02	45.01	48.64
8.6	34.48	35.14	37.03	38.23	40.47
7.4	31.23	30.85	31.54	32.04	32.92
6.2	27.78	26.39	25.93	25.72	25.25
5.2	24.66	22.55	21.28	20.56	19.08
4.4	21.92	19.38	17.64	16.61	14.52
3.6	18.83	16.08	14.10	12.90	10.45
3	16.20	13.47	11.49	10.27	7.77
2.6	14.23	11.64	9.75	8.58	6.17
2.2	12.06	9.71	7.99	6.92	4.69
1.8	9.65	7.66	6.20	5.27	3.35

PÇ 42.5 R dağılım örnekleri, -30+2 µm ve -20+5 µm örnekleri ile -30+2 µm ve -20+5 µm katkıli örneklerin BET ve Blaine yüzey alanı değerleri (Şekil 5.37 ve 5.38)

Örnekler, µm	BET, m <sup>2</sup> /g	Örnekler	Blaine, cm <sup>2</sup> /g	Örnekler	Blaine, cm <sup>2</sup> /g
-10	3.11	% 5 -30+2 µm katkıli PÇ 42.5	3060	% 10 -20+5 µm katkıli PÇ 42.5	3263
-20	1.92	% 10 -30+2 µm katkıli PÇ 42.5	3202	% 20 -20+5 µm katkıli PÇ 42.5	2959
-30	1.46	% 15 -30+2 µm katkıli PÇ 42.5	3195	% 30 -20+5 µm katkıli PÇ 42.5	2921
-45	0.94	% 20 -30+2 µm katkıli PÇ 42.5	3083	% 40 -20+5 µm katkıli PÇ 42.5	2834
-30+2	1.34	-30+2 µm	3215	-20+5 µm	3151
-20+5	0.96	PÇ 42.5	3104		

PÇ42.5 R ile -10 µm, -20 µm, -30 µm ve -45 µm örneklerinin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları (Şekil 5.39)

MPa	-10 µm	-20 µm	-30 µm	-45 µm	PÇ 42.5
2 gün	29.60	41.20	41.85	27.45	21.90
7 gün	34.10	43.00	50.35	42.15	36.00
28 gün	36.20	53.20	59.10	51.50	45.20

PÇ 42.5 R, -30+2 µm ve -30+2 µm katkıli örneklerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları (Şekil 5.40)

MPa	% 5 -30+2 µm katkıli PÇ 42.5	% 10 -30+2 µm katkıli PÇ 42.5	% 15 -30+2 µm katkıli PÇ 42.5	% 20 -30+2 µm katkıli PÇ 42.5	-30+2 µm
2 gün	21.5	23.6	23.8	24.7	32.2
7 gün	34.7	40.0	40.0	40.7	52.3
28 gün	42.4	49.8	48.1	51.0	62.4

PÇ 42.5 R, -20+5 µm ve -20+5 µm katkıli örneklerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları (Şekil 5.41)

MPa	% 10 -20+5 µm katkıli PÇ 42.5	% 20 -20+5 µm katkıli PÇ 42.5	% 30 -20+5 µm katkıli PÇ 42.5	% 40 -20+5 µm katkıli PÇ 42.5	-20+5 µm
2 gün	22.1	24.3	25.6	26.0	41.1
7 gün	37.3	38.3	39.9	39.8	51.3
28 gün	48.1	46.6	47.3	47.4	60.6

Açık ve kapalı devre ürünlerinin tane boyu dağılımı (Şekil 5.42)

Tane boyu, µm	Açık Devre	Kapalı Devre
350	100.00	100.00
294	100.00	100.00
246	100.00	100.00
206	100.00	100.00
174	100.00	100.00
146	99.92	99.99
122	99.63	99.89
102	99.04	99.68
86	98.11	99.27
72	96.63	98.48
60	94.40	96.91
50	91.29	94.14
42	87.41	90.11
36	83.31	85.45
30	77.81	78.91
25	71.98	71.94
21	66.35	65.29
18	61.43	59.63
15	55.78	53.31
12	49.31	46.26
10	44.58	41.18
8.6	41.05	37.43
7.4	37.84	34.04
6.2	34.33	30.43
5.2	31.03	27.13
4.4	28.01	24.20
3.6	24.47	20.86
3	21.31	17.98
2.6	18.89	15.82
2.2	16.14	13.42
1.8	13.01	10.73

Açık ve kapalı devre ürünlerinin -30 µm, + 5 µm ve -30+5 µm dağılımları (Şekil 5.44, 5.45 ve 5.46)

<i>Tane boyu, µm</i>	Açık Devre -30 µm	Kapalı Devre -30 µm	Açık Devre +5 µm	Kapalı Devre + 5 µm	Açık Devre -30+5 µm	Kapalı Devre -30+5 µm
350	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
294	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
246	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
206	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
174	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
146	100.00	100.00	99.84	100.00	100.00	100.00
122	100.00	100.00	99.40	99.99	100.00	100.00
102	100.00	100.00	98.60	99.84	100.00	100.00
86	100.00	100.00	97.35	99.43	100.00	100.00
72	100.00	100.00	95.33	98.42	100.00	100.00
60	100.00	100.00	92.20	96.33	100.00	100.00
50	100.00	100.00	87.73	92.57	100.00	100.00
42	99.91	99.88	82.08	87.00	99.94	99.95
36	99.65	99.48	76.06	80.53	99.78	99.78
30	98.57	98.00	68.02	71.50	99.22	99.13
25	95.85	94.60	59.52	61.90	97.60	97.12
21	91.26	89.26	51.30	52.78	93.59	92.36
18	85.80	83.20	44.14	45.01	86.51	84.47
15	78.30	75.22	35.91	36.30	72.84	70.28
12	68.93	65.64	26.52	26.60	51.50	49.55
10	61.82	58.57	19.86	19.83	34.95	33.95
8.6	56.42	53.25	15.19	15.11	23.38	23.20
7.4	51.44	48.37	11.36	11.27	14.72	15.19
6.2	45.99	43.05	7.93	7.82	8.86	9.79
5.2	40.93	38.11	5.53	5.39	6.21	7.29
4.4	36.36	33.69	3.95	3.79	4.90	6.03
3.6	31.17	28.68	2.70	2.50	3.91	5.07
3	26.71	24.43	1.94	1.74	3.25	4.40
2.6	23.39	21.31	1.52	1.31	2.81	3.93
2.2	19.74	17.90	1.14	0.94	2.35	3.42
1.8	15.72	14.20	0.80	0.62	1.88	2.84

Açık ve kapalı devre ürünlerinin basınç dayanım değerleri (Şekil 5.43, 5.47, 5.48 ve 5.49)

Örnekler	Basınç dayanımı, MPa		
	2 gün	7 gün	28 gün
Kapalı Devre	29.2	42.3	49.8
Açık Devre	24.7	39.3	49.4
Kapalı Devre -30 $\mu\text{m}$	42.0	53.0	56.9
Açık Devre -30 $\mu\text{m}$	40.4	51.7	54.9
Kapalı Devre +5 $\mu\text{m}$	18.1	33.2	49.2
Açık Devre +5 $\mu\text{m}$	15.6	31.0	45.4
Kapalı Devre -30+5 $\mu\text{m}$	34.2	52.2	61.9
Açık Devre -30+5 $\mu\text{m}$	29.2	51.2	59.7

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İlkay Bengü ÇELİK

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Yılı : 1975

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1986-1993 Ankara Atatürk Anadolu Lisesi

Lisans 1993-1997 Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1997-2000 Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil: İngilizce

İş Tecrübesi:

1997-... Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi.