

**FARKLI ÖĞÜTME MEKANİZMALARININ BİLEŞEN
DAVRANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT
GRINDING MECHANISMS ON COMPONENT BEHAVIOR**

OKAN ŞAHİN

DOÇ. DR. OKAY ALTUN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ Olarak Hazırlanmıştır.

Nisan 2021

ÖZET

FARKLI ÖĞÜTME MEKANİZMALARININ BİLEŞEN DAVRANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Okan ŞAHİN

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Okay ALTUN

Nisan 2021, 132 sayfa

Son yıllarda, karıştırmalı değirmenlerin kullanımı, performansı, model yapılarının geliştirilmesi ve cevheri oluşturan mineral davranımının tesis boyunca izlenmesi üzerine yapılan çalışmaların hız kazanması, karıştırmalı değirmende gerçekleştirilecek öğütme işleminin, ürüne ait boyut bazlı mineral dağılımındaki etkisinin araştırılmasını ve farklı öğütme mekanizmalarını kullanan diğer öğütme sistemleri ile karşılaştırılmasını gerekli kılmaktadır. Özgün yapısı ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesini amaçlayan bu çalışmada; kuru olarak çalıştırılan karıştırmalı değirmende klinker ile kalsit ve manyetit minerallerinin farklı oranlardaki bileşimlerinde ve bakır cevheri üzerinde öğütme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ardından ürünlerin boyut bazlı mineral dağılımları belirlenmiş ve öğütme üzerindeki mineral etkileri tartışılmıştır. Nihayetinde elde edilen sonuçlar bilyalı değirmende benzer şekilde yapılmış olan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez kapsamında, değirmenlerin farklı öğütme mekanizmalarına ve bileşen özelliklerine bağlı olarak, ürünlere ait boyut bazlı mineral dağılımında farklı davranımlar sergilendiği ortaya çıkarılmıştır. Kalsit ile karışımlarında, kalsite kıyasla daha sert olan klinker ve manyetit malzemelerinin iri elek aralıklarında, diğerlerine

kıyasla yüksek öğütülebilirliğe sahip kalsitin ise daha alt elek aralıklarında yoğunlaştığı ve karışımdaki kalsitin, tekli kalsit öğütmesine oranla daha iyi öğütülmüş olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bileşenlerin indirgeme oranları da hesaplanarak; tüm öğütme sürelerinde kalsite ait indirgeme oranlarının, diğer bileşenlerin indirgeme oranlarına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak Mohs ölçeği bazında nispeten sert olan manyetit ve klinker bileşenlerinin karışımları ile yapılan öğütmelerde, kalsitin öğütülmesine katkı sağladığı saptanmıştır.

Karıştırmalı ve bilyalı değirmende, bakır numunesinin öğütülmesiyle elde edilen ürünler üzerinde gerçekleştirilen MLA çalışmasına ait değerlendirmelerde bakır cevheri içerisindeki minerallerin fraksiyonel dağılımları incelenmiş; pirit dağılımının öğütme süresine bağlı değişkenliği, kalkopirit, sfalerit ve galenit minerallerinin ise, her iki değirmende de kendi içerisinde benzer dağılım değerleri gösterdiği görülmüştür. Ayrıca karıştırmalı değirmen teknolojisinin, bilyalı değirmene kıyasla mineral fark etmeksizin daha yüksek serbest mineral değerleri sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karıştırmalı değirmen, Bilyalı değirmen, Çoklu bileşenli öğütme, Öğütme mekanizmaları, Kuru öğütme işlemi, İnce öğütme

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT GRINDING MECHANISMS ON COMPONENT BEHAVIOR

Okan ŞAHİN

Master of Science, Mining Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Okay ALTUN

April 2021, 132 pages

In recent years, the studies on the use of stirred mills, their performance and the development of model structures of stirred mills has been increasing as well as the studies on the monitoring of mineral behavior throughout the enrichment facilities. Thus, this makes it necessary to investigate the effect of the grinding process to be carried out in the stirred mill on the size-based mineral distribution of the product and its comparison with other grinding systems that using different grinding mechanisms. In this study, which aims to eliminate this deficiency in the literature with its original structure; grinding studies were carried out on different proportions of clinker and calcite, magnetite minerals and copper ore in a dry-operated stirred mill. After that the size-based mineral distribution of the products was determined, then the mineral effects were discussed and the results were compared with the results in the ball mill which the same studies are conducted.

It has been revealed that the different grinding mechanisms of the mills and different grindability properties of the components exhibit different behaviors in the size-based mineral distribution of the products. Clinker and magnetite materials, which are harder than calcite, concentrated in the coarser fractions in their mixtures with

calcite while calcite with high grindability compared to the others is concentrated in finer fractions. And also, it has been determined that the calcite is ground better in the mixture compared to the pure calcite grinding. In addition, by calculating the breakage rates of the components; it was determined that the breakage rates of calcite were higher than the breakage rates of others at all grinding times. Also, it was determined that grinding with mixtures of magnetite and clinker components, which are relatively hard on the Mohs scale contributed to the grinding of calcite.

The fractional distributions of copper ores were investigated in the evaluations of the MLA studies carried out on the products obtained by grinding copper samples in a stirred and ball mill. It is seen that the pyrite distribution varied depending on the grinding time in both mills, while chalcopyrite, sphalerite and galena minerals were found to show similar distribution values in itself. In addition, it was determined that the stirred mill technology produced higher liberated mineral values compared to the ball mill, regardless of the mineral type.

Keywords: Stirred mill, Ball mill, Multicomponent grinding, Grinding mechanism, Dry-milling process, Fine grinding,

TEŞEKKÜR

Tezimi 119M850 kodlu proje kapsamında maddi olarak destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve Türkiye Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü'ne,

Çalışmalarım süresince bölüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı görevinde bulunan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ahmet Hakan BENZER ve Prof. Dr. Zafir EKMEKÇİ'ye,

Lisans ve Yüksek Lisans çalışmalarım boyunca bilgi birikimi ve fikirleri ile gösterdiği sonsuz destek, sabır ve özveri için tez danışmanın Sayın Doç. Dr. Okay ALTUN'a,

Deneyisel çalışmalarımda desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Sayın Dr. Nurettin Alper TOPRAK ve Dr. Deniz ALTUN'a,

Çalışmalarım sırasında gösterdiği özen ve yardımlarından dolayı çalışma arkadaşım Maden Mühendisi Cumhur Erdem KARAHAN'a,

Her konuda maddi ve manevi desteklerini bir an olsun eksik etmeyen annem Güler ŞAHİN ve babam İmam ŞAHİN'e,

En içten duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Öğütme Kuramları ve Mekanizmalar	4
2.1.1. Tane Üzerindeki Yük Mekanizması	6
2.1.2. Tanelerin Kırılma Mekanizması	8
2.2. Bilyalı Değirmenler	10
2.2.1. Bilyalı Değirmenlerin Tasarım Parametreleri	11
2.2.2. Bilyalı Değirmenlerin İşletme Parametreleri.....	12
2.3. Karıştırmalı Değirmenler.....	18
2.3.1. Karıştırmalı Değirmenlerin Tasarım Parametreleri	22
2.3.2. Karıştırmalı Değirmenlerin İşletme Parametreleri	23
2.4. Bileşen davranımı.....	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Kullanılan Malzemeler	33
3.2. Kullanılan Ekipmanlar	35
3.2.1. Karıştırmalı Bilyalı Değirmen	35
3.2.2. Bond Bilyalı değirmen	36
3.2.3. Mineral Serbestleşme Analizörü	37
3.3. Yöntem	37
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
4.1. Tek Bileşenli Öğütme Çalışmaları	40
4.1.1. Karıştırmalı Değirmen Testleri	40
4.1.2. Bilyalı Değirmen Testleri	44
4.1.3. Teknolojik Farklılıkların Tartışılması	47

4.2. Karışımlar ile Yapılan Öğütme Çalışmaları	52
4.2.1. Karıştırmalı Değirmen Testleri	52
4.2.2. Bilyalı Değirmen Testleri	59
4.2.3. Teknolojik Farklılıkların Tartışılması	67
4.3. Bakır Cevheri Öğütmeleri	75
4.3.1. Birinci Öğütme Sürelerinde Bakır Cevheri Öğütmeleri	79
4.3.2. İkinci Öğütme Sürelerinde Bakır Cevheri Öğütmeleri	81
4.3.3. Üçüncü Öğütme Sürelerinde Bakır Cevheri Öğütmeleri	83
4.3.4. Bakır Cevheri İçindeki Bileşenlerin Öğütme Davranışları	85
5. SONUÇLAR	89
6. ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	94
EKLER	101
Ek 1. Bond değirmende gerçekleştirilen öğütme işlemleri sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları	101
Ek 2. Karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütme işlemleri sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları	107
Ek 3. Bond değirmende öğütülen karışımlara ait kalsit analizi sonuçları	113
Ek 4. Karıştırmalı değirmende öğütülen karışımlara ait kalsit analiz sonuçları	114
Ek 5. Bakır cevheri içerisindeki minerallerin serbestleşme dereceleri	115
Ek 6. Bakır cevheri içerisindeki serbestleşen mineral dağılımları	117
Ek 7. Bakır cevheri içerisindeki minerallerin karıştırmalı değirmendeki enerji kullanımına bağlı kümülatif dağılımları	119

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Öğütme ortamındaki kırılma mekanizmaları.	8
Çizelge 2.2. Çeşitli bilyalı değirmen karakteristiği.....	11
Çizelge 2.3. Uygun bilya boyu için ortaya çıkarılmış çeşitli yaklaşımlar.	14
Çizelge 3.1. Bakır cevherine ait ilgili mineralojik dağılım.	33
Çizelge 3.2. Klinkere ait kimyasal kompozisyon.	33
Çizelge 3.3. Kalsite ait mineralojik bileşim.....	33
Çizelge 3.4. Besleme şarj ağırlıkları.	34
Çizelge 3.5. Malzemelere ait yoğunluk değerleri.	35
Çizelge 3.6. Karıştırmalı değirmenin teknik özellikleri.	36
Çizelge 3.7. Karıştırmalı değirmende farklı bilya boylarına bağlı bilya şarjı.....	36
Çizelge 3.8. Bilyalı değirmene ait teknik özellikler.	37
Çizelge 3.9. Bilyalı değirmende farklı doluluklara bağlı bilya şarjı.	37
Çizelge 3.10. Denemeler için belirlenmiş çalışma planı.	38
Çizelge 3.11. Bond ve karıştırmalı değirmene ait öğütme koşulları.....	38
Çizelge 4.1. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenin birinci kalsit-manyetit öğütmelerindeki bileşen dağılımları	68
Çizelge 4.2. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenin ikinci kalsit-manyetit öğütmelerindeki bileşen dağılımları.	69
Çizelge 4.3. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenin üçüncü kalsit-manyetit öğütmelerindeki bileşen dağılımları.	69
Çizelge 4.4. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenin birinci kalsit-klinker öğütmelerindeki bileşen dağılımları	72
Çizelge 4.5. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenin ikinci kalsit-klinker öğütmelerindeki bileşen dağılımları	72
Çizelge 4.6. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenin üçüncü kalsit-klinker öğütmelerindeki bileşen dağılımları	73
Çizelge 4.7. Bakır cevheri beslemesine ait ilgili mineral dağılımı.	76

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Belirli bir boyuttaki tanenin alt boyutlara kırılması ve dağılımı	5
Şekil 2.2. Öğütme ortamında yük mekanizmaları.....	7
Şekil 2.3. İki medya arasındaki darbe işlem modeli.....	7
Şekil 2.4. İki kamaralı bir değirmene ait genel görünüm.....	10
Şekil 2.5. Değirmenin dönüş hızının değişimi ile içerisindeki bilya davranışı. ..	12
Şekil 2.6. Değirmen hızının öğütme süresine etkisi.....	13
Şekil 2.7. Doluluk oranı ve öğütme süresi ilişkisi.....	15
Şekil 2.8. -300+250 mikron boyundaki kömürün yaş öğütülmesi.....	16
Şekil 2.9. Sınıflandırıcı ve kaldırıcı değirmen astar tipleri.....	17
Şekil 2.10. Astar optimizasyonunun öğütme maliyeti üzerindeki kıyaslaması. .	17
Şekil 2.11. Pin tipi karıştırmalı değirmenin şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.12. Farklı değirmenlere ait spesifik enerji değerleri.	19
Şekil 2.13. Karıştırmalı değirmende öğütücü hareketler.....	20
Şekil 2.14. Karıştırmalı ve bilyalı değirmende tane boyutu ve enerji tüketimi arasındaki ilişki.	21
Şekil 2.15. Farklı karıştırıcı ve öğütme odası geometrileri.....	22
Şekil 2.16. Değirmen geometrisinin tork ve ürün inceliğine etkisi.....	23
Şekil 2.17. Karıştırıcı hızının farklı bilya şarjları ile öğütme üzerindeki etkisi....	24
Şekil 2.18. Farklı karıştırıcı hızlarının ürün üzerindeki etkisi.....	24
Şekil 2.19. Farklı bilya boylarının öğütme üzerindeki etkisi.	25
Şekil 2.20. Farklı bilya doluluğunun öğütme üzerindeki etkisi.	27
Şekil 2.21. Malzeme doluluğunun öğütme üzerindeki etkisi.	28
Şekil 2.22. Öğütme yardımcılarının öğütme üzerindeki etkisi.....	29
Şekil 3.1. Beslemelere ait tane boyu dağılımları.....	33
Şekil 3.2. Rotap elek cihazı ve havalı alpine cihazı.....	34
Şekil 3.3. Trifaze elektrik sayacı.....	35
Şekil 3.4. Dik hazneli pinli karıştırmalı değirmen.....	35
Şekil 3.5. Bond Bilyalı değirmen.....	36
Şekil 3.6. Mineral serbestleşme analizörü ve örnek bir görüntü analizi.	37
Şekil 4.1. Karıştırmalı değirmenin 1,5 mm bilya ile tekli öğütmeler.....	41
Şekil 4.2. Karıştırmalı değirmenin 2,5 mm bilya ile tekli öğütmeler.....	41
Şekil 4.3. Karıştırmalı değirmenin 4,0 mm bilya ile tekli öğütmeler.....	42

Şekil 4.4. Karıştırmalı değirmenin tekli öğütmelerindeki indirgeme oranları.	43
Şekil 4.5. Bilyalı değirmende %20 dolulukta gerçekleştirilen tekli öğütmeler....	44
Şekil 4.6. Bilyalı değirmende %25 dolulukta gerçekleştirilen tekli öğütmeler....	45
Şekil 4.7. Bilyalı değirmende %30 dolulukta gerçekleştirilen tekli öğütmeler....	45
Şekil 4.8. Bilyalı değirmenin tekli öğütmelerindeki indirgeme oranları.	46
Şekil 4.9. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki tekli kalsit öğütmeleri.	47
Şekil 4.10. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki tekli manyetit öğütmeleri.	49
Şekil 4.11. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki tekli klinker öğütmeleri.	50
Şekil 4.12. Karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütmelerin ürün boyuna bağlı özgül enerji değerleri.	51
Şekil 4.13. Karıştırmalı değirmende 1,5 mm bilya ile kalsit-manyetit öğütmesi.	52
Şekil 4.14. Karıştırmalı değirmende 2,5 mm bilya ile kalsit-manyetit öğütmesi.	53
Şekil 4.15. Karıştırmalı değirmende 4,0 mm bilya ile kalsit-manyetit öğütmesi.	53
Şekil 4.16. Karıştırmalı değirmende kalsit-manyetit öğütmesindeki indirgeme oranları.	55
Şekil 4.17. Ağırlık düşürme test düzeneği, hazırlanan malzeme yatağı ve test test sonucu elde edilmiş olan tane boyu dağılımları.	56
Şekil 4.18. Karıştırmalı değirmende 1,5 mm bilya ile kalsit-klinker öğütmesi. ..	57
Şekil 4.19. Karıştırmalı değirmende 2,5 mm bilya ile kalsit-klinker öğütmesi. ..	57
Şekil 4.20. Karıştırmalı değirmende 4,0 mm bilya ile kalsit-klinker öğütmesi. ..	58
Şekil 4.21. Bilyalı değirmende %20 dolulukta kalsit-manyetit öğütmeleri.	59
Şekil 4.22. Bilyalı değirmende %25 dolulukta kalsit-manyetit öğütmeleri.	60
Şekil 4.23. Bilyalı değirmende %30 dolulukta kalsit-manyetit öğütmeleri.	60
Şekil 4.24. Bilyalı değirmende kalsit-manyetit öğütmesindeki indirgeme oranları.	62
Şekil 4.25. Kalsit-manyetit karışımındaki bilyalar ile kalsit ve manyetit tanelerinin çarpışması.	63
Şekil 4.26. Bilyalı değirmende %20 dolulukta kalsit-klinker öğütmeleri.	64
Şekil 4.27. Bilyalı değirmende %25 dolulukta kalsit-klinker öğütmeleri.	64
Şekil 4.28. Bilyalı değirmende %30 dolulukta kalsit-klinker öğütmeleri.	65
Şekil 4.29. Bilyalı değirmenin kalsit-klinker öğütmesindeki indirgeme oranları.	66
Şekil 4.30. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki kalsit-manyetit öğütmeleri.	68
Şekil 4.31. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki kalsit-klinker öğütmeleri.	71
Şekil 4.32. Karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen güç tüketim denemeleri...	75

Şekil 4.33. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki bakır cevheri öğütmeleri.....	76
Şekil 4.34. Galenit mineralinin karıştırmalı değirmen ile 82 kWh/t'da öğütme sonrası MLA görüntüleri.	77
Şekil 4.35. Sfalerit mineralinin bond değirmeni ile 120 dakika öğütme sonrası MLA görüntüleri.	77
Şekil 4.36. Kalkopirit mineralinin bond değirmeni ile 15 dakika öğütme sonrası MLA görüntüleri.	78
Şekil 4.37. Pirit mineralinin karıştırmalı değirmen ile 82 kWh/t'da öğütme sonrası MLA görüntüleri.	78
Şekil 4.38. Birinci bakır ürünleri bakır içeriklerinin fraksiyonel dağılımları.	79
Şekil 4.39. Birinci bakır ürünleri serbest ve kenetli tane dağılımları.....	81
Şekil 4.40. İkinci bakır ürünleri bakır içeriklerinin fraksiyonel dağılımları.	82
Şekil 4.41. İkinci bakır ürünleri serbest ve kenetli tane dağılımları.	83
Şekil 4.42. Üçüncü bakır ürünleri bakır içeriklerinin fraksiyonel dağılımları.	84
Şekil 4.43. Üçüncü bakır ürünleri serbest ve kenetli tane dağılımları.	85
Şekil 4.44. Ürün boyutuna göre ortalama serbestleşme derecesinin değişimi. 86	
Şekil 4.45. Serbest mineral üretim hızının mineral bazında karşılaştırılması. ..	87
Şekil 4.46. Değirmenlerin serbestleştirilmiş mineral bazında karşılaştırılması..	87
Şekil 4.47. Minerallerin birikimli dağılımının enerji kullanımına bağlı değişimi..	88

1. GİRİŞ

Cevher hazırlama alt süreçleri içerisinde enerji tüketiminin en yoğun olduğu birim işlem öğütmedir. Konu üzerinde bugüne kadar yapılmış enerji tüketimi araştırmaları göstermiştir ki; öğütme işlemi dünya genelindeki enerji tüketiminde %2 ila 4'lük bir paya sahiptir [1,2]. Cevher hazırlama süreçleri incelendiğinde ise kırma, öğütme ve sınıflama işlemlerinin, toplam süreçte harcanan enerjinin yaklaşık %60'ını oluşturduğu saptanmıştır [3]. Enerji harcamalarının bu derece yüksek olması, Dünya ve ülkemizde giderek artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte enerji tüketiminin düşürülmesine yönelik araştırmaların önemini arttırmaktadır. Bu bağlamda, var olan sistemlerin akım şeması ya da çalışma koşulları göz önünde bulundurularak, enerjinin daha verimli kullanılabilmesi ya da yeni teknolojilerin geliştirilip geleneksel sistemlerin yerini alması enerji tüketimini azaltacak alternatifler arasında gösterilmektedir. Öte yandan akım şemasının iyileştirilmesi ya da yeni teknolojilerin kullanılmasının tek başına enerji tasarrufu için yeterli olmadığı, aynı zamanda üretilen ürün kalitesinin artırılmasına yönelik araştırmaların da buna paralel olarak yürütülmesi gerektiği tespitinde bulunulmuştur [4]. Bu bağlamda yapılan bir çalışmada, yapılacak iyileştirmeler için; öğütme makineleri tasarımı ile %3-6, sınıflandırıcıların tasarımı ile %9-13, proses kontrolü ile %9, öğütme katkı maddesi kullanımı ile %3-6, diğer makine tasarımı ile %3 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceği belirlenmiştir [5]. Bu çalışma kapsamında da ince öğütme alanında kullanılan farklı öğütme teknolojilerinin ürünleri üzerinde boyut aralığı bazında karşılaştırılma yapılması, ürün dağılımlarının belirlenmesi ve nihayetinde ürün özelliklerinin fraksiyon bazında incelenmesi hedeflenmektedir.

Çoklu bileşenli model yapıları üzerine, Kapur ve Verma [6] kuvars ve kalker minerallerinin farklı oranlarıyla çok bileşenli beslemeler kullanılarak sınıflandırıcı ile kapalı sistem çalışan bilyalı değirmende, öğütme testlerinin döngüsel simülasyonu için matematiksel bir algoritma oluşturmayı hedeflemiş ve başta düzensiz sınıflandırıcı performansı olmak üzere değişen besleme özellikleri, değişken kalma süresi ve devre içerisinde malzemenin yığılması gibi birçok rastgele ve döngüsel bozukluk gözlemlemiş ve tanelerin kırılma davranımının mineral içeriğiyle ilişkili olduğunu saptamıştır. Bueno vd. [7] yarı-otojen değirmende kuvars ve çoğunlukla hematit ikincil olarak manyetit, götit ve limonit içeriğine sahip düşük dereceli demir cevheri ile çok bileşenli öğütme gerçekleştirerek değirmen öğütülebilirliğinin (üretim

hacmi olarak) değirmen içindeki sert/yumuşak malzemenin oranından etkilendiği ve sert-yumuşak cevher oranıyla doğrusal olmayan bir şekilde ilişkili olduğu göstermiştir. Difen vd. [8] bilyalı değirmen kullanarak klinker, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile iki veya çok bileşenli beslemelerin öğütme özellikleri incelemiş ve farklı öğütülebilirliklere sahip iki malzemenin bir arada öğütülmesinin birbirleri arasındaki öğütülmeye yardımcı olabileceğini veya engel olabileceğini ortaya koyarak bunun seçici bir öğütme meydana getirdiğini ve bu işlemin üründeki malzemelere ait tane boyu dağılımını genişleteceği fakat homojenliği azaltacağını belirlemiştir. Hoşten ve Avşar [9] çimento klinkeri ve tras kullanarak bilyalı değirmende kinetik testler yürütmüş ve trasın kırılma hızının bileşim içerisindeki klinker miktarıyla olan ilişkisini belirlemiştir. Tsivilis vd. [10] ise sert ve yumuşak malzemelerin kırılma davranımı üzerinde çalışmıştır. Sert bileşen olarak çimento klinkeri ve yumuşak bileşen olarak da kireçtaşının değerlendirildiği çalışmada, bu iki bileşenin karıştırılması durumunda sert olan malzemenin daha iri elek aralığında yoğunlaştığı ve yumuşak olanın da alt elek aralıklarında daha fazla oranda bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kireçtaşı ve klinker malzemelerinin farklı oranlarında gerçekleştirilen çalışmalarda, %30'u geçen kireçtaşı bileşeninin öğütme performansı üzerine negatif bir etki yarattığı belirlenmiştir. Yumuşak malzemenin öğütme işlemi üzerindeki sönümleyici etkisi Tavares ve Kallembach [11] tarafından da incelenmiş ve Tsivilis vd. [10] ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çoklu bileşenler üzerinde yürütülen öğütme çalışmaları sadece bilyalı değirmenler ile sınırlandırılmamış, yüksek basınçlı merdaneli preslerde de benzer çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, Abouzeid ve Fuerstenau [12] tarafından yapılan, sert ve yumuşak malzemeleri içeren öğütme testlerinde, bilyalı değirmen çalışmalarına benzer şekilde, farklı mineral bileşimlerinin farklı sonuçlar ürettiği anlaşılmıştır. Dündar ve Benzer [13] tarafından yapılan çalışmada da endüstriyel ölçekteki bilyalı değirmen için model yapısı geliştirilmiş ve öğütülme özelliklerine bağlı olarak bileşen davranımının da farklılaştığı anlaşılmıştır. Literatür çalışmalarından da anlaşılacağı üzere, çoklu bileşenli mineral davranımı incelemesi bilyalı değirmen, otojen değirmenler ve yüksek basınçlı merdaneli presler üzerinde yapılmış olup ince tane boyu üretiminde kullanılan karıştırmalı değirmenlerde bu tür çalışmalara rastlanmamıştır.

Bu çalışma kapsamında, farklı öğütme mekanizmalarına sahip olan bilyalı ve karıştırmalı değirmenlerde, karıştırma hızı, bilya boyu, bilya doluluğu, malzeme

doluluğu gibi farklı işletme koşullarındaki denemeler ile, aynı ürün boyunda yapılan öğütme işlemlerinin boyut bazlı mineral davranımında farklılık yaratacağı hipotezi test edilmiştir. Bu bağlamda, bond bilyalı değirmende ve dik hazneli karıştırmalı değirmende; klinker ile kalsit ve manyetit minerallerinin tekli olarak ve karışım içerisinde öğütmeleri gerçekleştirilerek, değirmen performansları ve malzemelerin ürün içerisindeki fraksiyonel dağılımındaki farklılıklar değerlendirilmiştir. Tekli ve karışımlar ile yapılan öğütmeler dışında, içerisinde kalkopirit, pirit, galenit ve sfalerit minerallerini barındıran bakır cevheri de aynı öğütme işlemlerine tabi tutulmuş ve cevher içerisindeki minerallerin, elek aralıkları bazında çeşitleri, boyutları ve oranları belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Öğütme Kuramları ve Mekanizmalar

Hammaddelerin ara veya nihai ürüne dönüştürüldüğü birçok süreçte önemli bir adım olan öğütme, katı malzeme boyutunun küçültülmesi için bilinen en eski mekanik işlemdir. Birçok kompleks yapı içeren bu işlemlerde temel amaç istenilen tane boyuna ve dağılımına sahip malzemenin üretilmesidir [14]. Bu da katı malzeme üzerine uygulanması gereken enerji ile mümkündür. Bu bağlamda gerçekleştirilen çalışmalar ile bir malzemeyi öğütmek için uygulanması gereken enerji (E) üzerine üç farklı yaklaşım oluşturulmuştur [4];

- Kick hipotezinde; gereken enerji, öğütülmemiş malzeme çapının, öğütülmüş malzeme çapına oranından elde edilir (Eşitlik 2.1).

$$E = k_k \ln \frac{D_1}{D_2} \quad (2.1)$$

D_1 = Öğütülmemiş malzeme çapı,

D_2 = Öğütülmüş malzeme çapı,

k_k = Kick sabiti,

- Rittenger hipotezinde; gereken enerji, malzeme yüzey alanındaki artış ile orantılıdır (Eşitlik 2.2).

$$E = k_r \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (2.2)$$

k_r = Rittinger sabiti,

- Bond hipotezinde; gereken enerji, besleme ve ürün boyunun kareköklerinin farkı ile ters orantılıdır. Bond, çalışmasında belli ağırlıktaki ve sonsuz büyüklükteki malzemenin %80'inin 100 mikron altına öğütülmesi için gereken enerjii tanımlayan çalışma indisi (W_i) ifadesine de yer vermiştir (Eşitlik 2.3)

$$W = W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (2.3)$$

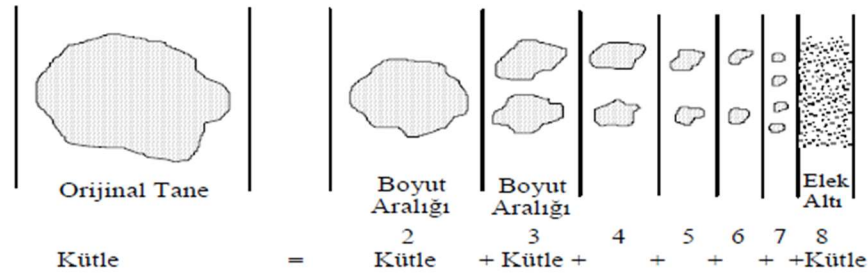
W = Ton başına tüketilen enerji (kW.saat/ton),

W_i = Çalışma indisi, İş indeksi (kW.saat/ton).

P_{80} = Öğütülmüş cevherin %80'inin geçtiği eleğin elek açıklığı (mikron)

F_{80} = Beslenecek cevherin %80'inin geçtiği eleğin elek açıklığı (mikron)

Öğütme işlemi adına gerçekleştirilen enerji uygulamaları ile; katı malzemeye ait tanelerin, ilk boyutuna kıyasla daha alt boyutlarında fraksiyonel bir dağılımı oluşturulur. (Şekil 2.1). Bu dağılım, temel anlamda enerji uygulamaları üzerindeki etkileriyle; kullanılan malzemenin nitel ve nicel özelliklerine, öğütme ekipmanının tasarımı ve operasyonel farklılığına göre değişmektedir [15].



Şekil 2.1. Belirli bir boyuttaki tanenin alt boyutlara kırılması ve dağılımı [14]

Öğütme prosesleri çeşitli sektörlerin bünyesinde; ilaç, boya, çimento, pigment gibi malzemelerin ürün özelliklerinin iyileştirilmesi ve sonraki prosese uygun malzemenin üretilmesi için gerçekleştirilmektedir. Cevher hazırlama endüstrisinde ise, cevherdeki değerli minerallerin zenginleştirme proseslerinden önce, cevher içerisindeki istenmeyen minerallerden ayrılabilmesi adına belirlenmiş serbestleşme boyutuna ulaşılması için kullanılmaktadır. Öğütme prosesleri, kimyasal zenginleştirme yöntemlerinde değerli minerallere ait spesifik yüzey alanının artırılmasını, özgül ağırlık farkı ile zenginleştirme yapan yöntemlerde ise değerli minerallerin gerekli boyut ve şekil dağılımını sağlamaktadır [15].

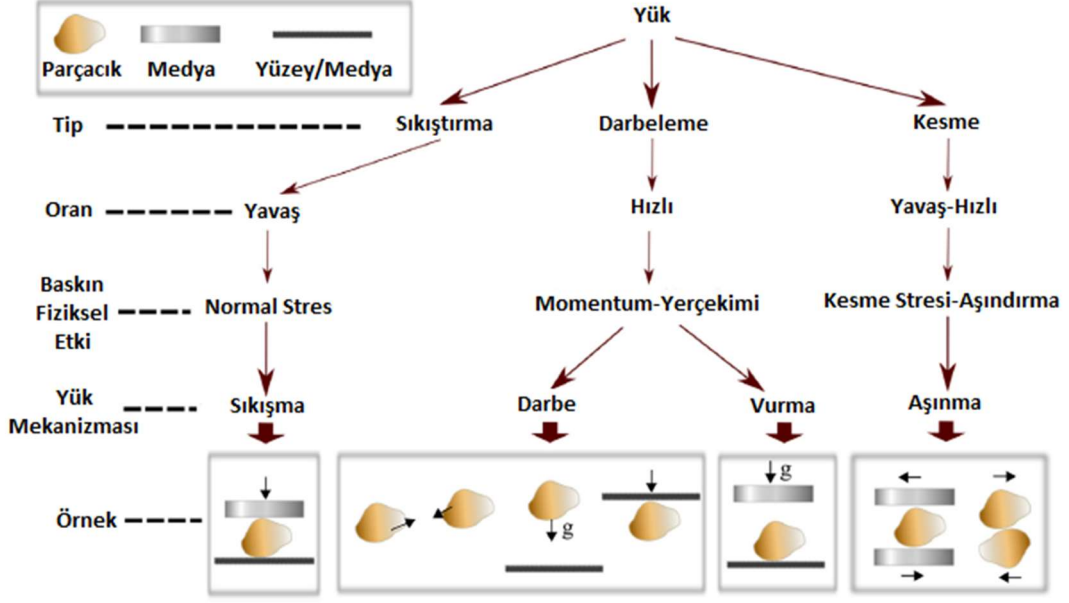
Öğütme işlemi değirmenler vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Öğütme işleminde kullanılan değirmenleri döner değirmenler, basınçlı değirmenler ve karıştırmalı değirmenler olarak sınıflandırmak mümkündür. Döner değirmenler tipik olarak iri öğütmede (40-300 μm), karıştırmalı değirmenler ise ince (10-40 μm) ve çok ince (<10 μm) öğütme uygulamasında kullanılır [16].

Geçmişten bugüne, yüksek tenöre sahip ve iri tane boyunda serbestleşen cevher yapısının giderek azalması, düşük tenörlü cevherlerin işlenmesine ait yöntemlerin geliştirilmesine veya yenilenmesine ait gereklilik oluşturmuştur [17]. Böylelikle yüksek tonajda işlenen bu tür cevherlerin zenginleştirilmesi için gerekli yüksek serbestleşme oranları, cevherin daha ince boyutlara öğütülmesini zorunlu kılmıştır. Bu durum hali hazırda yoğun enerji tüketimine gereksinim duyan değirmen teknolojileri için daha da yoğun bir enerji tüketimine yol açmaktadır. Bu tür yoğun bir enerji tüketiminden kaçınmak için birçok seçenekten bahsetmek mümkün olabilir. Bunlardan en önemlisi kullanılan enerjinin değirmene ait ısı, hareket, titreşim gibi etmenlerinden çok, mümkün olan en büyük oranda cevherin öğütülmesinde kullanılması yani spesifik enerji tüketiminin düşürülmesidir. Bu durum, doğru değirmen seçiminin önemini ortaya çıkartmaktadır. Değirmen seçimi genel olarak besleme malzemesi karakterizasyonuna [18], nihai ürün spesifikasyonuna [19], mevcut işletim sistemine ve makinelerin enerji verimliliğine [20] dayanmaktadır.

Tüm bunlar düşünüldüğünde değirmenlerin sahip olduğu dinamikler dikkatle incelenmelidir. King [21], mikro süreçler ile partikül sistemi arasındaki bağlantının tanınmasının öğütme sürecini anlamak için kritik olduğuna dikkat çekmiş, öğütme makinelerinin tasarımında veya mevcut olanlarının geliştirilmesinde yük ve kırılma mekanizmalarına ait temel anlayışın kullanılmasının gelişmiş endüstriyel öğütme işlemleri için gerekliliği savunulmuştur.

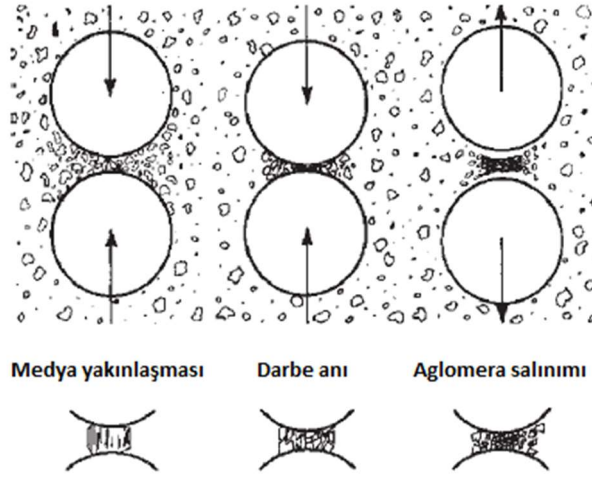
2.1.1. Tane Üzerindeki Yük Mekanizması

Yük mekanizması, mekanik stres oluşturmak için bir parçacığa veya birden fazla parçacığın oluşturduğu yatak oluşumuna uygulanan kuvvet veya momentum gibi fiziksel büyüklüklerin etkisi olarak tanımlanır. Bu fiziksel büyüklüklerin parçacık hareketine kıyasla göreceli bir yönü ve hızı vardır [22]. Uygulanan her kuvvet için bir dizi yön ve oran kullanılarak, yükleme mekanizmasının tanımlaması yapılabilir. Yükleme mekanizmasının tanımları Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Literatürde yükleme mekanizması için kullanılan terimler; genelde yük yönü dikkate alınarak parçacık yüzeyine dik ise darbe, eğik ise kesme, paralel ise de aşındırma olarak üçe ayrılmaktadır [23].



Şekil 2.2. Öğütme ortamında yük mekanizmaları [23]

Günümüzde kullanılan döner veya karıştırmalı değirmenlerin tümü, kuru veya yaş öğütme fark etmeksizin tipik darbe mekanizmasından yararlanmaktadır (Şekil 2.3). Fakat değirmen türleri içerisinde; birim hacim içerisindeki parçacık sayısı, kullanılan öğütücü medya büyüklüğü gibi parametrelerin yanı sıra, yoğun şekilde kullandığı diğer yük mekanizmaları ile birbirlerinden ayrılmakta ve farklı öğütme performanslarını sergilemektedir [24].



Şekil 2.3. İki medya arasındaki darbe işlem modeli [24]

Öğütmelerde kullanılan en etkin yük mekanizması, döner değirmenlerde darbe mekanizması iken, karıştırmalı değirmenlerde ise darbe, kesme ve sıkıştırma mekanizmalarıdır [25]. Bir parçacığa etki eden yük, parçacığın kırılma mekanizmasını dolayısıyla ortaya çıkan tane boyu dağılımını etkiler. Bu nedenle

karıştırmalı değirmenler geleneksel bilyalı değirmenlere kıyasla; operasyonel özellikleri ve kullandığı kırılma mekanizmaları ile ince-çok ince öğütme uygulamaları için yüksek potansiyele sahiptir.

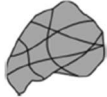
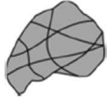










2.1.2. Tanelerin Kırılma Mekanizması

Kırılma mekanizması, değirmenin yük mekanizmasına bağlı olarak oluşturduğu enerjinin, malzemeye aktarılmasının sonucunu tanımlamaktadır [23]. Bu nedenle kırılma mekanizmalarının tanınması, yük altındaki parçacık davranışını anlamakta yardımcı olacaktır. Kelly ve Spottiswood [26], bu mekanizmaların karmaşık yapısı ve değişkenliğine bağlı olarak, geçmiş çalışmalarda kırılma mekanizması tanımlarının çok az tutarlık gösterdiğini vurgulamıştır.

Kırılma mekanizması için kabul edilmiş en yaygın tanımı yapan Epstein [27], kırılma işlevini tanımlamak için öğütme sistemleri bazında seçim temelli çıkarımlarda bulunmuştur. Araştırmacıya göre değirmen içerisindeki seçim işlevi, bir parçacığın öğütme için seçilme olasılığını, kırılma işlevi ise, kırılan parçacıkların boyut dağılımı tanımlamaktadır.

Kırılma mekanizmaları; parçacık kırılma modeli, ürüne ait parçacık boyut dağılımı veya partikül şekilleri temel alınarak türlere ayrılır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Öğütme ortamındaki kırılma mekanizmaları [27]

Parçacık	Kırılma Düzlemleri	Ürün Parçacıkları	Kırılma Mekanizmaları
			Parçalanma
			Dilinim
			Ufalanma
			Aşınma

2.1.2.1. Parçalanma

Parçalanma, yük kuvvetinin parçacık yüzeyine dik olarak uygulandığı ve enerji taşıyıcının parçacığın kırılması için gerekli olan enerjinin belirli bir katı olacak derecede büyük bir enerjiye sahip olduğu durumlarda meydana gelir. Bu durumda

parçacık tek bir kırılma için gerekli olan enerjinin çok fazlasına maruz kalır ve parçalanır [26]. King [21], tüm enerji tükenene kadar devam edecek bu süreci; parçacıkların ardışık bir kırılma sürecine girdiği bir dizi aşama içerdiğini ifade etmektedir.

2.1.2.2. Dilinim

Dilinim, parçacığa ait kristal yapı özelliklerine bağlı olarak gerçekleşen kırılma türüdür. Mineralojik olarak parçacığın atom ve iyon yapısına bağlı olarak var olan zayıf yüzeyler kırılmaya eğilimlidir. Yük enerjisi özellikle parçacık üzerindeki bu deformasyonların bulunduğu noktalardan, parçacığın kristal düzlemleri boyunca ilerleyerek kırılma gerçekleştirir [23].

2.1.2.3. Ufalanma

Topografik olarak yapılarında açısız yüzeyler bulunduran parçacıklar ufalanma mekanizmasından etkilenmektedir [28]. Bir parçacık üzerine uygulanacak bu tür bir yük ile parçacık üzerindeki olası köşe niteliğindeki bölümler, kırılma için uygulanan enerjinin büyük bir kısmını kullanarak deforme olacaktır. Bunun arkasında, aynı hacimdeki küresel ve küp şeklinde iki parçacıkta; küresel olan için parçalayıcı bir etkiye sahip olacak enerjinin, küp olan için sadece köşelerini yıpratıcı bir etkiye sahip olacağı düşüncesi yatmaktadır. Fuerstenau ve Han'a [29] göre parçacıklara uygulanacak kuvvet, yönünden bağımsız olacak şekilde ilk önce parçacık üzerindeki keskin kenar ve köşeleri kırarak şekilde etki gösterir. Bunu destekler nitelikteki çalışmada Kelly ve Spottiswood [26] ise, ufalanmanın parçacık üzerindeki kenar ve köşe yapılarından etkilendiğini ifade etmektedir.

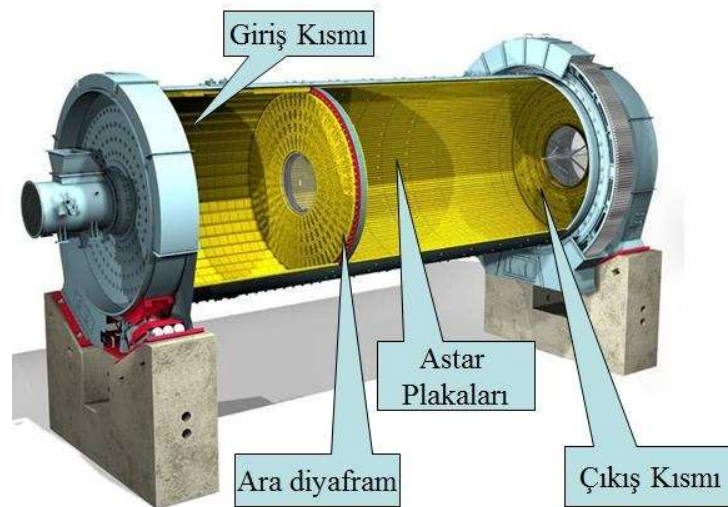
2.1.2.4. Aşınma

Aşınma, genel olarak yükün parçacık yüzeyine teğet uygulandığı kesme mekanizmasının, parçacığı kırmak için yeterli enerjiye sahip olmamasının bir sonucudur. Bu düşünce Hogg [30] tarafından yeni bir kırılma mekanizması çalışmasında, Little [28] tarafından ise kırılma sonrası parçacık şekillerini incelendiği çalışmasında başlangıç noktası niteliğindedir. Aşınmaya ait bu tanım diğer birçok araştırmada bir parçacığın kırılması veya fırcalanması anlamına gelecek şekilde de kendine yere bulmuştur [31]. Kelly ve Spottiswood [26] bu yaklaşımları desteklemiş, Palaniandy [32] ise çok ince tanelerin oluşabilmesi için aşınma mekanizmasının gerekli olduğunu savunmuştur.

2.2. Bilyalı Değirmenler

Yüz yılı aşkın bir süredir öğütme işlemlerinde kullanılan bilyalı değirmenler, çok çeşitli koşulda ve geometride çalışabilmektedir. Bu yönü ve yüksek kapasiteleri nedeniyle en yaygın kullanılan döner değirmen türü olmuştur. Bilyalı değirmenler, ürünün çıkış yöntemine göre; taşmalı, hava süpürmeli veya ortadan çevresel ve çevresel çıkışlı, öğütme işlemine göre; her biri açık veya kapalı devre olabilecek yaş ve kuru, öğütme kamaralarının sayısına göre; tek ve çok kamaralı olarak sınıflandırılabilir [33]. Geçmişte, işletme ve bakım kolaylığı, yatırım, kurulum ve işletme maliyeti, ürün kalitesi gibi birçok sebepten dolayı tercih edilmiştir [34]. 1950 ve 1960 tarihleri arasında en yaygın birincil öğütme ekipmanı olarak kullanılan bilyalı değirmenler, günümüzde birincil, ikinci, üçüncül veya yeniden öğütme prosesleri için kullanılabilir. Her ne kadar alternatifleri olan, otojen, yarı otojen ve karıştırmalı değirmenler gibi sistemler mevcut olsa da hala daha ikincil ve yeniden öğütme proseslerinde yoğun şekilde kullanılmaktadır [35].

Bilyalı değirmen, içerisinde öğütücü ortam olarak seramik, çelik bilyaların veya çakıl taşlarının bulunduğu, yatay yerleştirilmiş, iç kısımlarında farklı tipte astarları barındıran silindirik bir çelik gövdeden oluşmaktadır (Şekil 2.4). Değirmen içerisindeki malzeme, öğütücü medyalar arasındaki boşluklara dolarak, değirmen gövdesinin rotatif hareketi ile yerçekimi, sürtünme ve santrifüj kuvvetlerinin bir bileşkesi olarak belirli bir noktaya kadar yükselen öğütücü medyanın, sahip olduğu potansiyel enerjisini darbe kuvveti ile kinetik enerjiye dönüştüğü serbest düşüşü (kaskat hareketi) ile öğütülür [36].



Şekil 2.4. İki kamaralı bir değirmene ait genel görünüm [37]

Öğütme, genel anlamda enerji gereksinimi yüksek bir işlem olmasına rağmen, bilyalı değirmenler yapılan iş ile harcanan enerji karşılaştırıldığında oldukça verimsizdir. Bir tesis içerisinde kullanılan enerjinin %60'dan fazlası öğütme ekipmanları tarafından kullanılırken, bu enerjinin ancak %2'si kadar verimlilik sağlamaktadır [3,38]. Enerjinin geri kalan kısmı sürtünmenin sonucu olarak ısı, ses ve titreşim gibi oluşumlar ile harcanmaktadır [39].

Bilyalı değirmen performansını etkileyen pek çok tasarım ve işletme parametreleri bulunmaktadır. Bunlar; değirmenin boyu, çapı, kritik hızı, motor gücü, astar tasarımı; öğütücü medyanın çapı, dağılımı, miktarı; besleme malzemesinin tane boyu, öğütülebilirliği; bunlara ek olarak, kamaralı değirmenlerde ara bölme ızgara tipi; yaş proseslerde ise viskozite ve pulp yoğunluğu olarak belirtilebilir [40].

2.2.1. Bilyalı Değirmenlerin Tasarım Parametreleri

Bilyalı değirmenler, boy-çap oranı, besleme ve çıkış sistemi gibi temel tasarım parametrelerine sahiptir. Bunların arasındaki en önemli parametre olan uzunluk-çap oranı için yoğun çalışmalar gerçekleştirilmiştir [41,42,43,44]. Bu çalışmalardan hareketle, boy-çap oranı; değirmen tipine, istenilen ürün inceliğine ve malzemenin öğütülebilirliğine göre değişmektedir. Hammadde öğütülmesinde kullanılan tek kamaralı değirmenler için bu oran 1-1,5 arasında iken [41], çimento değirmenleri gibi 2 kamaralı değirmenlerde bu oran 3,0-3,5 [42], üç kamaralı değirmenler için 4,0-4,5, açık devre çalışanlar değirmenler için ise 5-6 arasındadır [43]. Bir çalışmada 40 farklı tesise ait farklı bilyalı değirmenler incelenmiş, bilyalı değirmenlere ait, maksimum uzunluk ve çap değerlerinin sırasıyla 8,84 ve 5,34 metre, boy küçültme oranının ise 20:1-200:1 arasında olduğu belirlenmiştir [44,45]. Bu değirmenlerden bazıları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Çeşitli bilyalı değirmen karakteristiği [41]

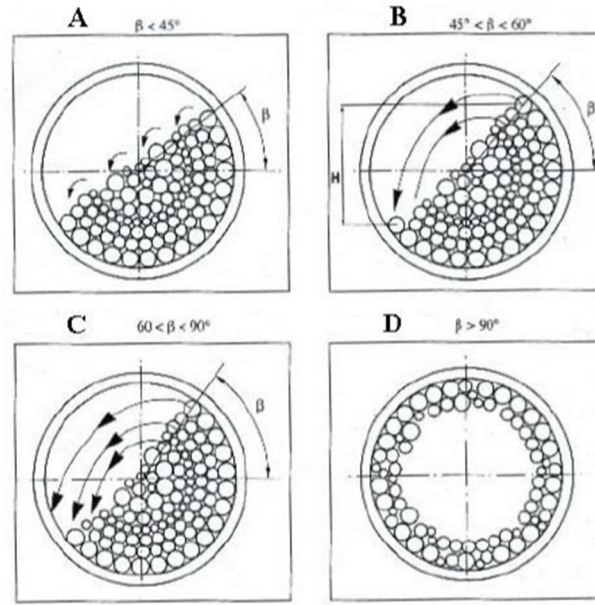
Öğütme Ortamı	F ₈₀	En üst bilya boyu		Boy-Çap Oranı
	µm	mm	inch	
Yaş	5000 – 10000	60 – 90	2.5 – 3.5	1:1 – 1.25:1
Yaş	900 – 4000	40 – 50	1.8 – 2.0	1.25:1 – 1.75:1
Yaş veya Kuru	İnce besleme - regrind	20 – 30	0.75 – 1.25	1.5:1 – 2.5:1
Yaş veya Kuru	İnce besleme - regrind	20 – 50	0.75 – 2.0	2.0:1 – 3.0:1
Kuru	5000 – 10000	60 – 90	2.5 – 3.5	1.3:1 – 2.0:1
Kuru	900 – 4000	40 – 50	1.8 – 2.0	1.5:1 – 2.0:1

2.2.2. Bilyalı Değirmenlerin İşletme Parametreleri

Bilyalı değirmenlerin performansını etkileyen değişkenlerden bazıları ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır.

2.2.2.1. Dönüş Hızı

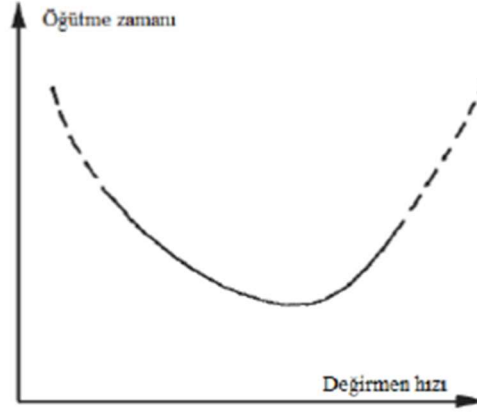
Değirmenin kendi etrafındaki dönüş hızı ile ürün inceliği doğru orantılıdır. Fakat kritik hız değerinin üstüne çıkıldığında değirmen içerisindeki kaskat hareketi, dolayısıyla da öğütme sonlanmaktadır. Değirmen hızının artışı ile değişen şarj açısı ve bilya davranışı Şekil 2.5'te verilmiştir. En iyi öğütme koşulu, şarjın normal ile yaptığı 45 ve 60 derecelik açı değerleri arasında sağlanmaktadır [14].



Şekil 2.5. Değirmenin dönüş hızının değişimi ile içerisindeki bilya davranışı [14]

Bilyalar, değirmenin düşük bir çevresel hız değerindeki dönüşünde, bir birbirini üzerinden kayma eğilimi gösterir (A). Bu aşamada sadece bilyanın ağırlığı ile oluşan kuvvet etkisi söz konusu olduğundan ve bilyalar enerjisinin çoğunu sürtünme işleminde harcadıklarından dolayı öğütme en düşük orandadır. Değirmene ait çevresel hızın artışı ile bilyalara etki eden merkezkaç kuvveti, bilyaların değirmen içerisinde belli bir noktaya kadar yükselmesini, ardından da bilyanın malzeme üzerine yapacağı serbest düşüşü sağlayacaktır (B). Kritik hızın aşılması ile ise, bilyalar, belli bir süre serbest düşüşünü astar yüzeyinde sonlandırarak astar yapısına zarar verecek (C), son aşamada ise santrifüj etkisi ile tamamen değirmen iç duvarına yapışarak hareketsiz kalacak, böylece de değirmenin çektiği güç azalacak ve öğütme sonlanacaktır (D) [14]. Değirmen hızının öğütme süresine bağlı

etkisi Şekil 2.6'da verilmektedir. Bu nedenlerden dolayı değirmelerin çektiği optimum güce karşılık gelecek hız kritiktir ve değirmenler bu kritik hızın altındaki değerlerde çalışmalıdır [16]. Genel olarak tipik bir bilyalı değirmende kritik hız %68-75 arasında, doluluk oranı ise %30-45 arasında değişmektedir. Bu değer laboratuvar ölçekli bir bond değirmeninde %85'e karşılık gelen 70 rpm olarak kabul görmüştür [46].



Şekil 2.6. Değirmen hızının öğütme süresine etkisi [14]

2.2.2.2. Bilya Boyu, Yoğunluğu ve Doluluğu

Öğütücü ortam, öğütme mekanizmalarını kullanarak, değirmenlerde harcanan enerjiyi malzemeye ileten birimdir. Bu nedenle bilyanın, malzeme ve öğütücü ortamın oluşturduğu yatak içerisindeki dağılımı, miktarı ve geometrisi değirmen performansını etkileyen en önemli parametreler arasındadır.

Bilyalı değirmende kullanılan bilya çapı, öğütme kinetiği üzerindeki birincil etkiye sahip olması sebebiyle uzun yıllar boyunca pek çok araştırmaya konu olmuştur [26]. Fakat tüm bu araştırmalar sadece kendi deneysel koşulları için geçerli olacak ampirik sonuçlar ortaya çıkarmış olduklarından ötürü, hala değirmenlerin değişken tasarım ve işletme koşullarına uygun maksimum bilya boyu seçimi için kabul edilebilecek genel bir yaklaşım bulunmamaktadır (Çizelge 2.3). Örneğin; bilyalı değirmende kullanılacak maksimum bilya boyu, Rothfuchs [47] tarafından yapılan çalışmada beslemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı değeri karekökünün 24 katına, Ferrari [48] tarafından yapılan çalışmada ise maksimum besleme tane boyunun 90 katına denk gelmektedir. Fakat her iki çalışmada da malzemeye ait öğütülebilirlik ve değirmen geometrisi gibi değişkenler dikkate alınmamıştır.

Çizelge 2.3. Uygun bilya boyu için ortaya çıkarılmış çeşitli yaklaşımlar [34]

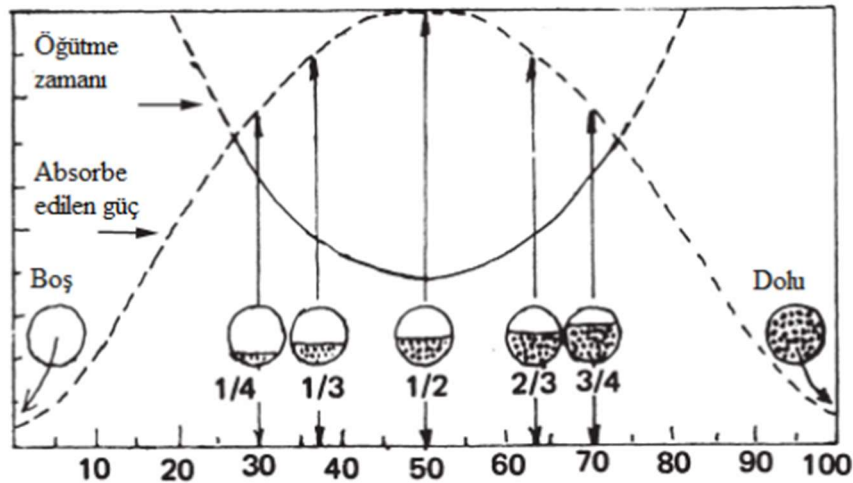
	Tane Boyu, d	Öğütülebilirlik, W_i	Değirmen Dönüş Hızı, N	Değirmen Çapı, D	Diğer Değişkenler
Davis, 1919	-	-	önemli	-	-
Fahrenwald ve Lee, 1931	$d^{0.5}$	-	-	-	-
Coghill ve DeVaney, 1938	$d^{0.5}$	$W_i^{0.2}$	bağımsız	-	-
Gow vd., 1934	$d^{0.5}$	önemli	önemli	-	-
Bond, 1958	$d^{0.5}$	$(W_i \cdot S_g)^{0.34}$	$(1/N)^{0.34}$	$(1/D)^{0.17}$	Yaş-kuru, boşaltım sist.
Herdan, 1960	$d^{0.5}$	-	-	-	-
Azzaroni, 1981	$d^{0.28}$	$W_i^{0.4}$	$(1/N)^{0.26}$	$(1/D)^{0.26}$	Devreden yük
Herbst vd., 1986	bağımlı	bağımlı	bağımsız	bağımsız	-
Austin vd., 1984	$d^{0.5}$	-	-	$(1/d)^{0.1-0.2}$	-
Lianxiang vd., 1988	25.8+20.4 Ind	-	-	-	-

Bilyalı değirmenlerde maksimum bilya boyutu seçimi üzerine yapılan tüm çalışmalar iki temel yaklaşıma sahiptir; birincisi, ince öğütmede gerekli yüksek tane kırılma sayısını karşılayan ince bilyalar, iri öğütmede ise malzemeye yeterli enerji aktarımını sağlayabilecek iri bilyalar kullanılmalıdır [45]. Bundan hareketle, bilya boyutu düştükçe; bilyalara ait yüzey alanı artacağından bilya-tane karşılaşma olasılığı dolayısıyla bilya ile malzeme arasındaki çarpışma sayısı artar, fakat bilyanın malzemeye uyguladığı çarpışma kuvveti azalır. Bu yaklaşım, Erdem ve Ergün [49] tarafından indirgeme oranlarının bilya boyuna bağlı değişimini inceleyen çalışmada da aynı şekilde geçerlilik taşımaktadır. Bir diğer çalışmada ise Jain [50], sert malzemelerin kullanıldığı öğütmelerde verimlilik için; büyük çaplı bilya kullanımının gerekliliğini ortaya koymuş, olması gerekenden daha küçük bilyaların kullanıldığı değirmenlerdeki verimlilik için ise, değirmen dönüş hızının belli bir oranda artırılmasını önermiştir.

Optimum bilya boyu üzerine yapılan tüm ampirik çalışmalar, maksimum değirmen verimliliği için tek bir bilya boyu belirlemektedir. Halbuki içerisinde farklı boylarda fraksiyonları barındıran malzemeyi öğütmek için, uygun darbe kuvvetini sağlayacak farklı boylarda bilyaların oluşturacağı şarjın kullanılması öğütme performansını arttıracaktır [45]. Farklı boyutlardaki bilyaların oluşturduğu şarj ile bilyalar arası boşluk azaltılarak değirmenlerde harcanan enerjinin maksimum oranda kullanılması

sağlanılabılır. Günümüzde maksimum bilya boyunu ve bilya dağılımını belirlemek için kullanılan en yaygın ampirik yaklaşım F.C. Bond tarafından geliştirilmiştir [51].

Bilya doluluk oranı, bilya hacminin değirmen iç hacmine oranı olarak ifade edilmektedir. Bu oran değirmenin çektiği gücü doğrudan etkiliyor olmasından dolayı, yüksek doluluk oranında yüksek enerji tüketimi söz konusu olacaktır. Bu nedenle ilk bakışta verimliliği yüksek öğütme için düşük doluluk oranının fayda sağlayabileceği varsayılabilir. Fakat düşük bilya doluluk oranlarında meydana gelecek yüksek aşınma değerleri de dikkate alınır, doluluk oranı ve değirmenin çektiği güç arasında optimum oranda bir denge kurulması gerekecektir. Öğütme performansının değirmen doluluğuna bağlı etkisi Şekil 2.7’de verilmektedir. Öte yandan, malzemenin bilyalar arası boşluğu hangi oranda dolduracağını belirlenmesi de çok önemlidir. Bu oranın gerektiğinden fazla seçilmesi yastıklanma etkisine bağlı olarak bilyaların malzemeye aktaracakları enerjide kayba sebep olacak ve öğütme performansını olumsuz yönde etkileyecektir. Bu nedenle malzeme doluluğunun, malzemenin sertliği, öğütülebilirliği ve nem oranı gibi birçok parametreye bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Genel olarak bilyalı değirmenler için; bilya doluluğu değirmen geometrisine bağlı olarak %30-45 arasında değişmekte, bilyalar arası boşluk ise %90-110 seviyesinde doldurulmaktadır [45,52].

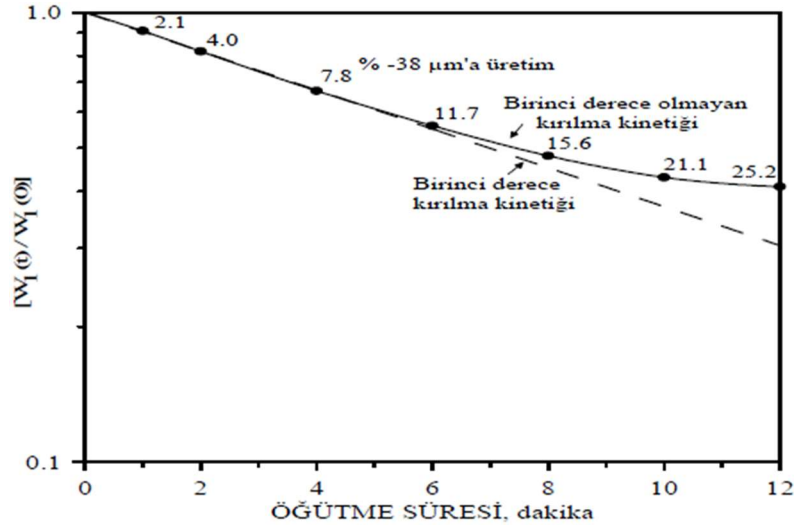


Şekil 2.7. Doluluk oranı ve öğütme süresi ilişkisi [52]

2.2.2.3. Öğütme süresi

Öğütme süresindeki artış ile birlikte değirmen içerisinde ince malzeme artacaktır. Buna bağlı olarak, kuru proseslerde yastıklama etkisi ve topaklanmalar, yaş proseslerde ise vizkozite artışına bağlı pulp reolojisinde bozulmalar

gerçekleşecektir. Bu durum öğütme performansını olumsuz yönde etkileyecek, birinci derecede (lineer) olmayan bir öğütme kinetiğine sebep olarak, yavaşlama etkisini ortaya çıkaracaktır. Klimpel [53] tarafından kömür üzerinde gerçekleştirilmiş yaş öğütme çalışmasında bu etkiyi gözlemlemek mümkündür (Şekil 2.8).



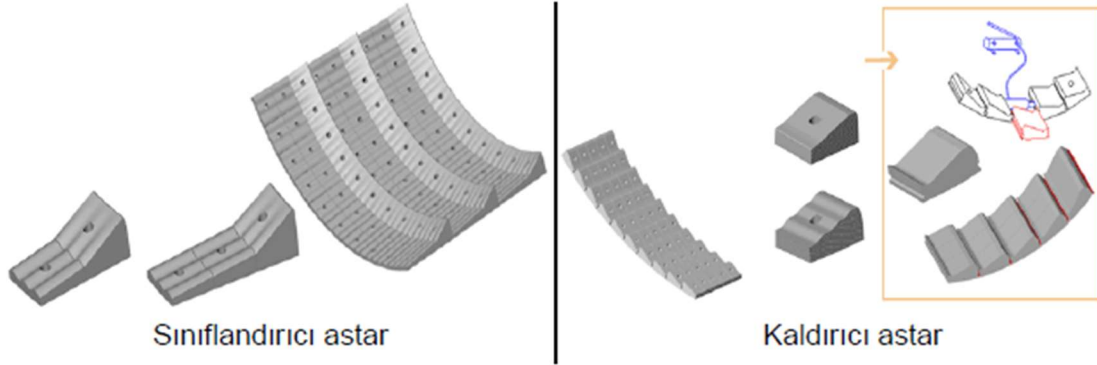
Şekil 2.8. -300+250 mikron boyundaki kömürün yaş öğütülmesi [53]

Kuru proseslerde de yavaşlama etkisinin gözlemlenebileceği pek çok durum söz konusu olabilir; ince taneler öğütücü medya yüzeyini kaplayarak öğütücü medyanın malzemeye uygulayacağı darbe etkisini azaltabilir, özellikle yumuşak malzemelerin uzun süreli öğütülmelerinin sonucu olarak ince taneler topaklanabilir veya akışkan bir yatak özelliği gösterebilir. Kuru çalıştırılan bilyalı değirmenlerde yaşanabilecek bu tür sonuçların önüne geçmek adına kullanılan kimyasal öğütme katkıları ile tanelerin çekim ve yüzey özelliklerine müdahale edilerek öğütmedeki yavaşlama etkisini azaltmak veya ortadan kaldırmak mümkündür [54].

2.2.2.4. Astar Yapısı

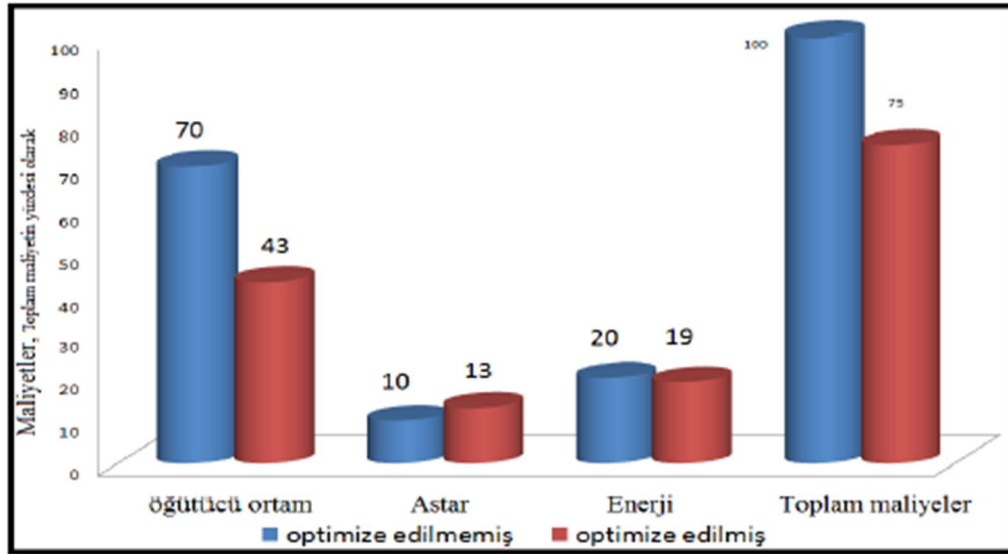
Temel işlevi, değirmenin iç yüzeyini kaplayarak, değirmen çeperini değirmen içerisindeki aşındırıcı ortamdan korumak olan astar plakaları, değirmenin dönüşü ile oluşan enerjiyi öğütücü medyaya aktaran birimdir. Öte yandan sahip oldukları özel tasarımlarla öğütme prosesine önemli katkılar sağlamaktadır. Kaldırma plakaları bilyaların kaskat hareketine destek olması için, sınıflandırma plakaları ise kamara girişinden çıkışına doğru incelen malzeme boyuna uygun, bilya boyu dağılımını sağlamak için geliştirilmiştir (Şekil 2.9) [41]. Tipik bir kamaralı değirmen için birinci ve ikinci kamarasında sırasıyla, kaldırıcı astar tipleri ile 90-50 mm boyut aralığında

bilya, sınıflandırıcı astar tipleri ile 50-15 mm boyut aralığında bilya kullanılmaktadır [35].



Şekil 2.9. Sınıflandırıcı ve kaldırıcı değirmen astar tipleri [41]

Astar tasarımında veya seçiminde yapılacak hata, astar ve değirmen ömrünü kısaltacağı gibi öğütme performansını da olumsuz yönde etkileyecektir. Bu da öğütme verimliliğini ve güç tüketimini etkileyerek işletme için yüksek maliyete yol açacaktır. Bu konuda yapılan varsayımsal bir çalışmaya dair sonuç Şekil 2.10'da verilmektedir.

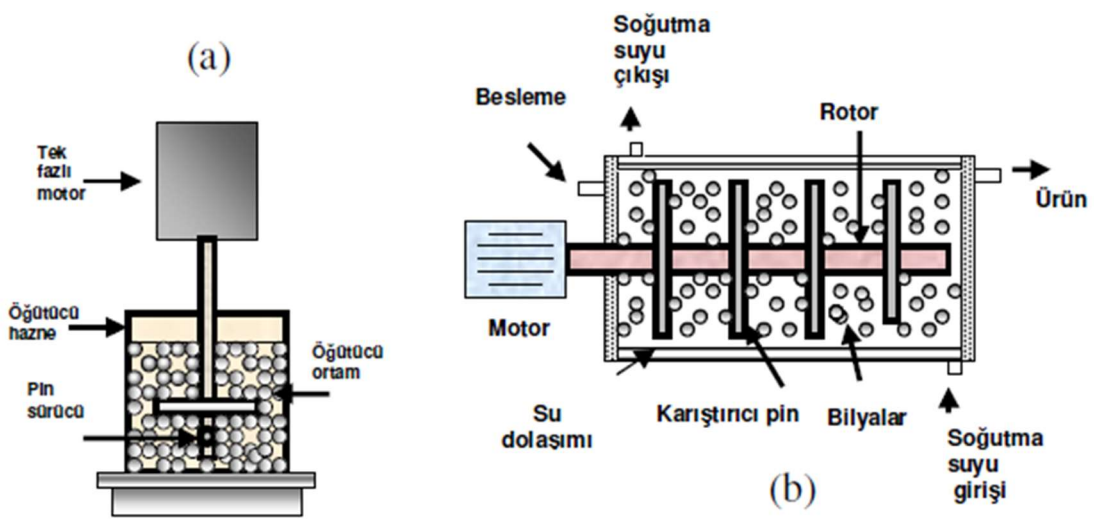


Şekil 2.10. Astar optimizasyonunun öğütme maliyeti üzerindeki kıyaslaması [41]

2.3. Karıştırılmalı değirmenler

Temel tasarımı ve modellemesi 1928 yılına dayanan karıştırılmalı bilyalı değirmenler, ince öğütme proseslerinde gösterdiği yüksek verimlilikle dikkat çekerek, endüstriyel olarak ilk defa 1948 yılında boya ve cila endüstrisi için gerekli pigment öğütmelerinde kullanılmıştır [55]. Yıllar içerisinde değişen tasarımı ile öğütme dışında flotasyon prosesi öncesinde mineral yüzey kirliliğini ortadan kaldırmak gibi pek çok uygulamada kullanılan karıştırılmalı değirmenler [56], 1960'larda da kaolin öğütmesinde kullanılmıştır [57]. Günümüzde madencilik uygulamaları dışında seramik, kimya, boya, plastik, kâğıt, kozmetik gibi birçok endüstride de kendine yer etmiştir [58].

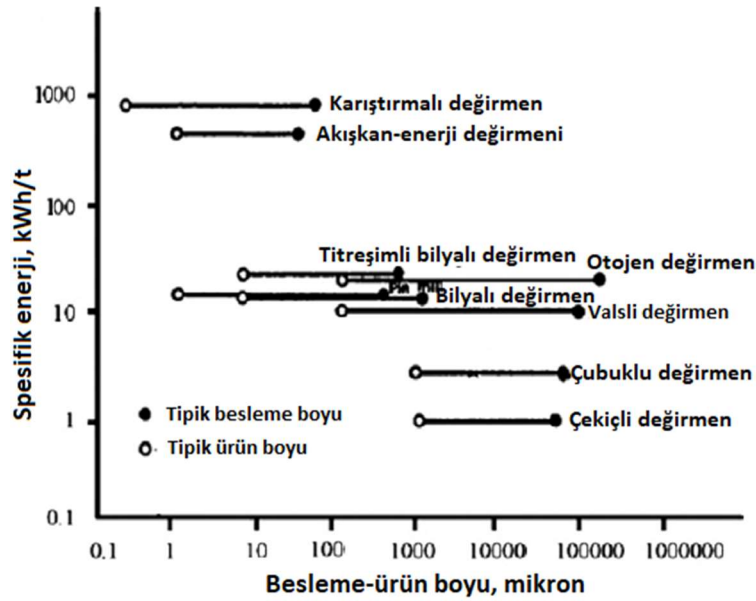
Karıştırılmalı değirmenler, sabit silindirik gövde içinde dönen şaft üzerinde, belirli aralıklarla konumlandırılmış disk, halkalı ve çubuk (pin) gibi çeşitli karıştırıcı yapılara sahiptir. Bu karıştırıcılar, gövde içerisinde yer alan öğütücü medyanın ve öğütülecek malzemenin oluşturduğu ortamın hareketini sağlayarak öğütme gerçekleştirilir [59]. Bu şekilde değirmende kullanılan enerji şaft aracılığıyla öğütücü ortama iletilmiş olur (Şekil 2.11). Farklı karıştırıcı çeşitlerinin kullanılmasının sebebi bu enerji iletimindeki farklılıklardır. Enerjinin transferi; disk ve halkalı karıştırıcılarda çekme (adhezyon) kuvvetleri ile, çubuklu karıştırıcılarda ise yer değiştirme kuvvetleri ile sağlanmaktadır. Bu nedenle kuru öğütme koşullarında genellikle pin tipi, yaş öğütme işlemlerinde ise disk tipi karıştırıcılar kullanılmaktadır [55].



Şekil 2.11. Pin tipi karıştırılmalı değirmenin şematik gösterimi; (a) dik, (b) yatay [59]

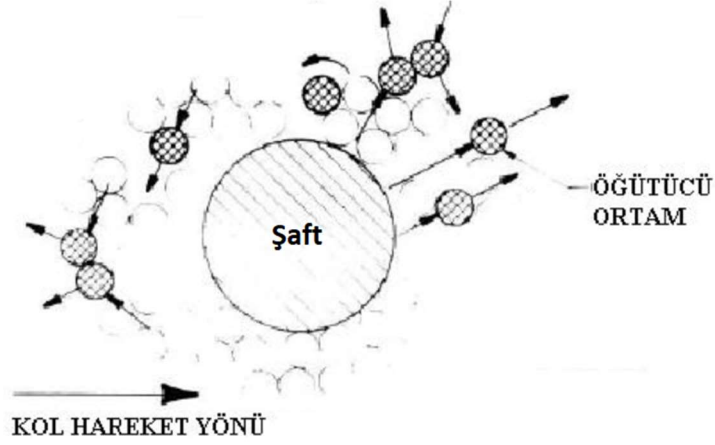
Yatay veya dikey tasarımlara sahip, yaş veya kuru öğütme gerçekleştirebilen karıştırmalı değirmenlerde, uygulama alanına ve malzemenin özelliklerine bağlı olarak %60-85 doluluklarda boyutları 0.2-8 mm arasında değişen çelik, seramik, zirkon, alümina, nitrür ve cüruf malzemeli bilyalar kullanılmaktadır [58].

Karıştırmalı değirmenlerde öğütme iki temel koşula bağlıdır. Bunlar stres enerjisi ve birim zamanda gerçekleşen çarpışma sayısıdır. Bilyalar tarafından malzemeye aktarılan stres enerjisi, karıştırma hızı, bilya boyutu ve bilya yoğunluğu ile, birim zamanda gerçekleşen çarpışma sayısı ise tanelerin yakalanma olasılığı, değirmen içerisindeki tane sayısı ve bilyaların temas sayısı ile doğru orantılı bir şekilde hareket etmektedir [60]. Karıştırmalı değirmen içerisindeki parçacığın öğütülebilmesi için parçacığı kırarak yeterliliğe sahip enerjinin, parçacık üzerine bilya ile değirmen duvarı ya da iki bilya arasında uygulanması gerekmektedir. Yapılan araştırmaların gösterdiği üzere; karıştırmalı değirmenlerde küçük boyutlarda bilyaların kullanılması, bilya ile malzeme arasındaki temas sayısını dolayısıyla stres yoğunluğunu artırmakta ve öğütme performansını olumlu yönde etkilemektedir [61]. Bununla birlikte spesifik enerjinin stres yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğu düşünüldüğünde, karıştırmalı değirmenlerin döner değirmenlere göre düşük özgül enerji tüketimi sağladığı söylenilebilir [62]. Farklı değirmenlerin spesifik enerji değerleri Şekil 2.12'de verilmektedir.



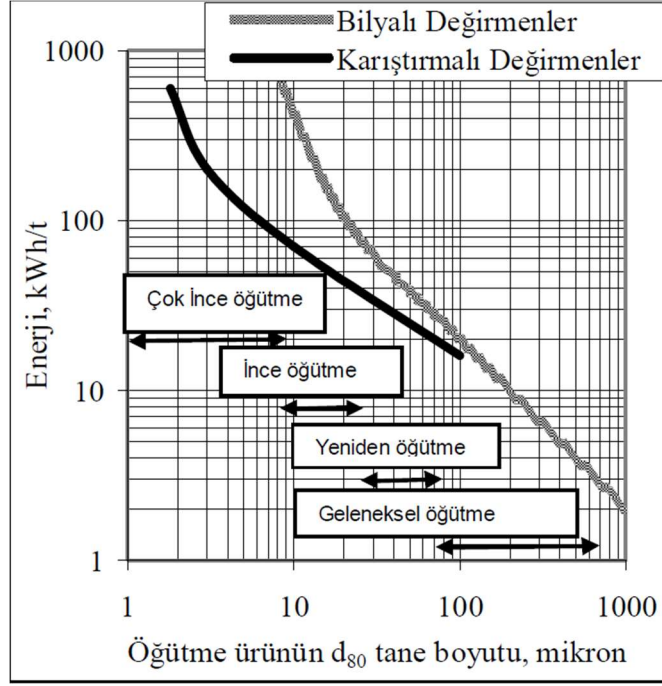
Şekil 2.12. Farklı değirmenlere ait spesifik enerji değerleri [62]

Karıştırmalı değirmenlerin içinde, bilyalı değirmenler içerisinde gerçekleşen kaskat hareketine benzer düzenli bir hareket gözlemlenmiyor oluşu; aşınma, kesme, darbe ve sıkıştırma mekanizmalarının tamamının aynı süreç içerisinde uygulanabileceği bir öğütücü ortam sağlamaktadır (Şekil 2.13) [63].



Şekil 2.13. Karıştırmalı değirmende öğütücü hareketler [63]

Karıştırmalı değirmen teknolojisi bilyalı değirmenlere kıyasla, üretim ve pazar talebi artan ince ve çok ince öğütme koşullarındaki verimliliği ile son 20 yılda kullanım anlamında yaygınlaşmıştır [64]. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde tane boyuna bağlı enerji tüketimi arasındaki ilişki Şekil 2.14'te verilmektedir. Bilyalı değirmenlerin özellikle 75 mikron ve altındaki öğütmelerinde gösterdiği yoğun enerji gereksinimi, bilyalı değirmenlerde gerçekleştirilecek ince öğütme işlemlerini ekonomik olmaktan uzaklaştırmıştır. Yapılan çalışmalarda hem yatay [65], hem de dikey [66] karıştırmalı değirmenlerin ince ve çok ince öğütmelerdeki verimliliği desteklenmektedir. Karıştırmalı değirmenler öğütme performansının yanı sıra, bilyalı değirmenlere kıyasla, düşük kurulum-bakım maliyeti, güvenli çalışma koşulları ve operasyonel esneklik sunmaktadır [67].

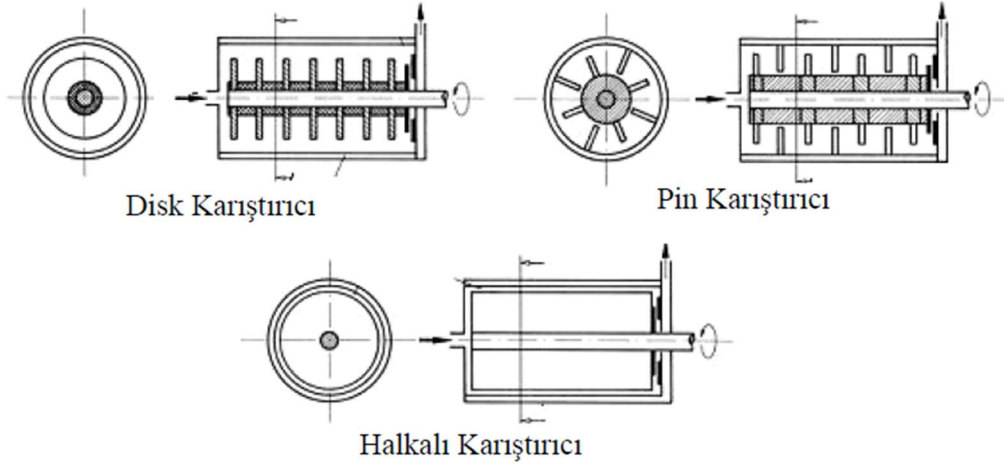


Şekil 2.14. Karıştırmalı ve bilyalı değirmende tane boyutu ve enerji tüketimi arasındaki ilişki [58]

Karıştırmalı değirmenlerin performansını etkileyen pek çok parametre vardır. Bilya; boyu, yoğunluğu, dağılımı ve doluluğu, karıştırma hızı, pulp yoğunluğu, vizkozite, malzeme özellikleri bu parametrelerin başında gelir [68,69]. Pek çok araştırmacı bu parametrelerin öğütme verimliliği üzerindeki etkisini araştırmış, değirmenlerin enerji sarfiyatını azaltmak ve ürün kalitesini arttırmak için çalışmalar gerçekleştirmiştir [58,64]. Stehr [55] bilya dağılımının homojen özellik gösterdiği öğütme ortamlarında öğütme verimliliğinin daha yüksek olacağını, Pilevneli ve Azizli [70], küçük bilya kullanımının öğütme verimliliğini %50 oranda arttıracığını ortaya çıkarmıştır. Celep [71], refrakter cevherlerden altın kazanımı için gerekli olan yüksek serbestleşme derecesine karıştırmalı değirmen ile ulaşmış, karıştırmalı değirmenlerin kavurma işlemine alternatif olabileceğini desteklemiş, Szegvari ve Yang [72] ise kuru çalıştırılan karıştırmalı değirmenlerdeki çok ince öğütmenin gösterdiği dezavantajları ortaya koyarak, çok ince öğütmeler için yaş öğütmenin gerekliliğini savunmuştur. Öte yandan, kuru karıştırmalı değirmenlerde yapılan araştırmalar ile; yüksek doluluk oranlarındaki öğütmelerde, yüksek karıştırma hızı ve küçük boyutta bilya seçimi ya da standart karıştırma hızı ve farklı bilya boylarının oluşturduğu uygun bilya konsantrasyonunun seçimi ile enerji verimliliğinin sağlandığı gözlemlenmiştir [65,73].

2.3.1. Karıştırmalı Değirmenlerin Tasarım Parametreleri

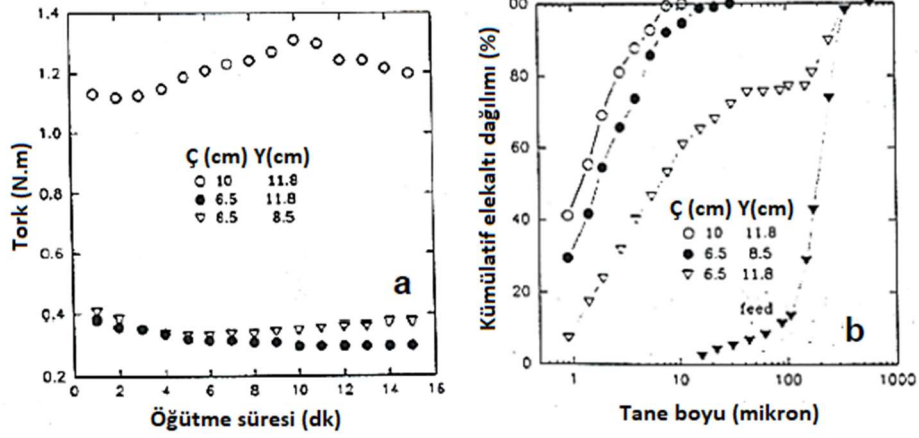
Karıştırmalı değirmenlerde öğütme performansını etkileyen, karıştırıcı tipi, konumlandırılması, sayısı ve boyutları ile değirmene ait uzunluk-çap oranı gibi tasarım değişkenleri bulunmaktadır [58]. Bu değişkenler ile değirmen içerisindeki malzemenin öğütülmesi için gerekli bilya hareketinin optimize edilmesi sağlanarak, mineral özelliklerine bağlı öğütmeler gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 2.15). Genel parametrelerin dışında bazı değirmen türleri sahip oldukları ek parçalar ile değirmen içerisindeki akış profilini düzenlemektedir; şaftın yanı sıra değirmen gövdesinin de döndüğü Maxmill değirmenlerinde malzeme akışını kontrol eden bir plaka [74], Draismill değirmenlerinde ise değirmen gövdesi üzerinde şaft yüzeyine dik sabit pinler bulunmaktadır [75].



Şekil 2.15. Farklı karıştırıcı ve öğütme odası geometrileri [71]

Altun [76] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, aynı karıştırıcı tipi, besleme oranı ve bilya doluluğuna sahip farklı çaplarda iki yatay kuru karıştırmalı değirmen kullanılmış, aynı doluluk yüzdesinde küçük çaptakine oranla daha fazla bilya miktarına sahip olan büyük çaplı değirmende ürünün daha ince olduğu ve düşük özgül enerji tüketimi sağlandığı ortaya çıkarılmıştır.

Strasser [77], farklı değirmen geometrileri ve bilya boyutları kullanarak yaptığı çalışmada, en düşük değirmen hacmi (0,73 litre) ve ince bilya (355 mikron) kombinasyonu ile diğerlerine oranla en ince ürünü elde ederken, Zheng [78] ise farklı karıştırıcı geometrilerinin, karıştırıcı torkuna ve ürün inceliğine etkisini kanıtlamış ve karıştırmalı değirmenlere ait uzunluk-çap oranının düşmesiyle ürünün irileştiğini ortaya koymuştur (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Değirmen geometrisinin (a) tork ve (b) ürün inceliğine etkisi [78]

2.3.2. Karıştırmalı Değirmenlerin İşletme Parametreleri

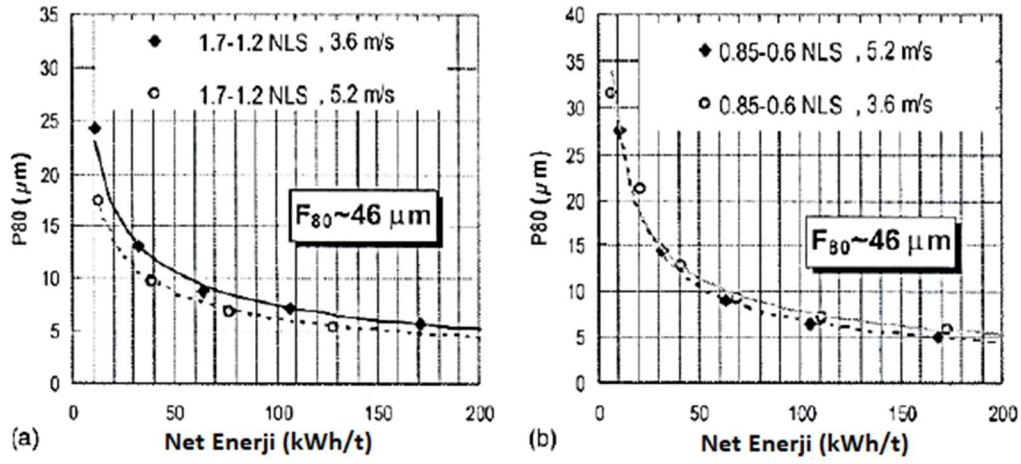
Molls ve Hornel [79], karıştırmalı değirmenlerde 44 farklı operasyonel değişkenin var olduğundan bahsetmiştir. Öte yandan çoğunluğu proses için küçük etkiler yaratmaktadır. Karıştırmalı değirmenlerde gerçekleştirilen öğütmeyi etkileyecek en önemli işletme parametreleri çoğunlukla öğütücü ortam özellikleri (boy, şekil, doluluk, yoğunluk) ve karıştırıcı hızıdır. Bu parametreler ürün özelliği, özgül enerji tüketimi ve dolayısıyla değirmen performansı üzerinde etkin rol oynamaktadır.

2.3.2.1. Karıştırıcı Hızı

Karıştırmalı değirmendeki en kritik parametrelerden biri olan karıştırma hızındaki artış, oluşturduğu yüksek enerji yoğunluklu öğütücü ortamda; ürün inceliğini azaltırken, aynı zamanda enerji verimliliğini de azaltacak, dolayısıyla da özgül enerji tüketiminde artışa sebep olacaktır. Çünkü yüksek karıştırıcı hızlarının sağladığı öğütme enerjisi, enerjinin ısıya dönüştürmeye başlayacağı noktaya kadar ince malzeme üretmektedir [65]. Yüksek karıştırma hızlarındaki düşük enerji verimliliğini pek çok çalışmada gözlemlenmiştir [65,80,81]. Öte yandan yüksek karıştırma hızlarının sağladığı kapasite artışı da göz önüne alındığında, istenilen ürün inceliği, kapasite ve özgül enerji tüketimi değerlerine uygun, optimum karıştırma hızının seçimi çok önemlidir [65,82].

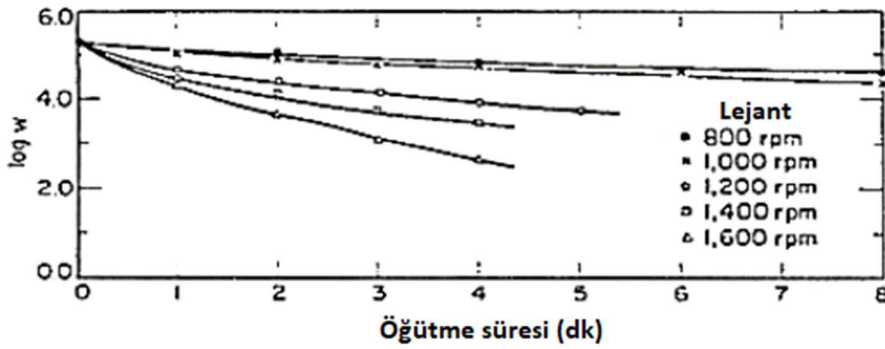
Yapılan bazı araştırmalar karıştırma hızı ile bilya boyutu arasındaki ilişkiyi incelemiş; düşük karıştırma hızlarında iri, yüksek karıştırma hızlarında ince bilyaların daha iyi öğütme sergilediklerini ortaya çıkarmıştır [83]. Verimli bir öğütme için gerekli olan

karıştırıcı hızı ve bilya boyutu arasındaki ters orantı, Jankovic [58] tarafından farklı bilya konsantrasyonu kullandığı çalışma ile Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Karıştırıcı hızının farklı bilya şarjları ile öğütme üzerindeki etkisi (a) 17-1.2 mm (b) 0.85-0.6 mm bilya [58]

Sadler [82] farklı karıştırma hızlarının malzemenin boyut dağılımı üzerindeki etkisini incelemiştir; karıştırma hızı ile -400+350 mikron fraksiyonundaki malzeme miktarının ters orantıdaki değişimini gözlemlemiştir (Şekil 2.18).

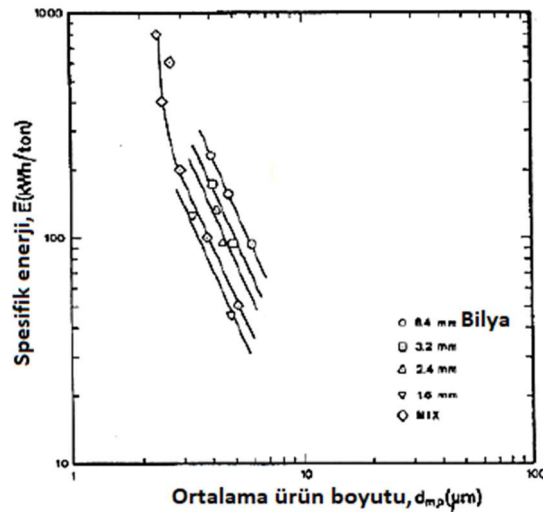


Şekil 2.18. Farklı karıştırıcı hızlarının ürün üzerindeki etkisi [82]

Karıştırıcı hızındaki artış ile ürün boyundaki incelme; Çayırılı [84] tarafından yapılan çalışmada P80, Fadhel ve Frances [85] tarafından yapılan çalışmada ise P50 değerindeki azalmalar ile görülmekte ve her iki araştırma da artan enerji tüketimini vurgulamaktadır. Fakat bu araştırmaların ve genel beklentinin dışında sonuçlar elde eden, Mankosa [80] kömür ile yaptığı çalışmada 1350 rpm hızda 7.8 mikron, 790 rpm hızda ise 7.3 mikron ortalama tane boyu ürün elde etmiş, bu durumu yüksek karıştırma hızında değirmen içerisindeki efektif öğütme hacmini, dolayısıyla değirmenin birim hacmi başına düşen enerjiyi azaltan bir girdabın oluşumuyla açıklamıştır.

2.3.2.2. Bilya Boyu, Yoğunluğu ve Doluluğu

Karıştırmalı değirmenlerde küçük bilya boyunun öğütme üzerinde 2 ana etkisi söz konusudur; ilk olarak şarjın akışkanlığını kolaylaştırma yoluyla enerji tüketiminin azaltılmasını sağlamak, ikinci olarak ise daha ince boyutlu ürün elde edilmesini mümkün kılmaktır [78]. Değirmende kullanılan enerjinin çoğu, malzemeden çok bilya şarjını hareket ettirmek için harcanmaktadır. Bu nedenle, optimize edilmesi gereken bilya doluluğu kadar, şarjı oluşturacak bilyaların boyutundaki seçim de öğütme verimliliğinde etkin rol oynamaktadır. Gerçekleştirilmesi gereken bu optimizasyonda, bilya boyu, bir taraftan olabilecek en ince boyda ürünün elde edilmesini sağlayacak kadar küçük, diğer taraftan ise beslemedeki en büyük taneyi kırmak için gerekli enerji yoğunluğunu oluşturabilecek kadar büyük seçilmelidir. Sadler [82] tarafından yapılan çalışmada, farklı bilya boylarının öğütme üzerindeki etkisi incelenmiş ve sabit koşullarda bilya boyutunun küçülmesiyle ürünün inceliğinin azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Farklı bilya boylarının öğütme üzerindeki etkisi [82]

Beslemeye ait tane dağılımı ve efektif bilya boyu arasındaki optimum oran pek çok çalışmaya konu olmuştur. Mankosa [61], yaptığı çalışmada indirgeme oranı üzerinden değerlendirmeler yaparak, bilya boyunun besleme boyuna oranının en çok 20:1 olduğu seviyede öğütme devamlılığının sağlandığını göstermiştir. Aynı oran Zheng [78] tarafından 12:1 seviyede, Conley [86] tarafından 7-20:1 aralığında, Yue ve Klein [83] tarafından ise 20-200:1 aralığında ortaya konulmuştur. Öte yandan Forssberg [87] ve Jankovic [58] optimum bilya boyu seçiminde, değerlendirilen tek kriterin sadece besleme tane boyutunun olmaması gerektiğini, değirmen tipi,

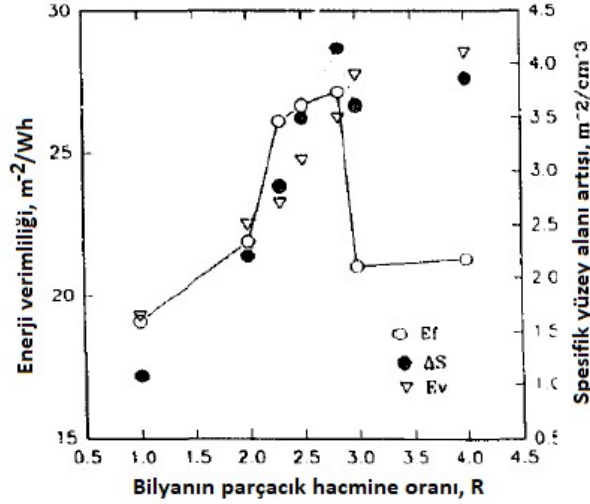
öğütme türü, karıştırma hızı, malzeme özellikleri ve bilya yoğunluğu gibi kriterlerin de dikkate alınması gerektiğini savunmuştur.

Karıştırmalı değirmenler ile gerçekleştirilen yaş öğütmelerde genelde seramik bilyalar kullanılırken, kuru öğütmelerde ise daha yoğun olan çelik bilyalar kullanılmaktadır. Kullanılan öğütücü medyanın yoğunluğu arttıkça, değirmenin enerji tüketimi de artar [81]. Bunu destekler nitelikteki çalışmalardan birini gerçekleştiren Zheng [78] çelik ve seramik bilyanın öğütmedeki performansını kıyaslamış, aynı koşullarda çelik bilyanın, seramik bilyaya kıyasla daha ince ürün elde ederek, daha iyi bir öğütme gerçekleştirdiğini, fakat çelik bilyanın seramik bilyanın harcadığı enerjinin neredeyse iki katına ihtiyaç duyduğunu ortaya çıkarmıştır.

Bilya doluluğu, karıştırmalı değirmenlerin çektiği enerjiyi belirleyen en etkin parametredir. Artışı ile değirmenin çektiği gücü artıracak fakat değirmen içerisindeki öğütücü ortam hacmini genişleterek, özgül enerji tüketimini azaltacaktır [88]. Bu nedenle, karıştırmalı değirmenler ile yapılacak öğütmelerde, yüksek bilya dolulukları önerilmekte, öte yanda değirmen içerisindeki bilya hareketliliğinin korunması ve yüksek aşınma değerlerinin önüne geçilmesi için de optimum bilya doluluğunun belirlenmesi gerekmektedir [89].

Yapılan çalışmalar ile, özellikle %85'i geçen bilya doluluklarında gözlemlenen sorunlar neticesinde, bu değerlerin üzerinde bilya dolulukları ekonomik olmaktan uzaklaşmaktadır. Bu sınıra uyacak şekilde, pek çok araştırmada bilya doluluğunun artışı ile daha ince ürün elde edildiği gözlemlenmiştir [61,78,82,90].

Zheng [78] yaş öğütme yapan bir karıştırmalı değirmen kullanarak gerçekleştirdiği çalışmada, farklı bilya doluluklarının sabit katı konsantrasyonu üzerindeki etkisini incelemiş, toplam ürün yüzey alanının bilya doluluğunun artışı ile arttığını ortaya çıkarmıştır. Buna bağlı olarak, bilya ve katı konsantrasyon arasındaki oranın 2.8'i aştığı noktada öğütme performansının düşmeye başladığını gözlemlemiştir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Farklı bilya doluluğunun öğütme üzerindeki etkisi [78]

Tüzün [75], aynı özgül enerji tüketimine sahip çeşitli doluluk oranlarında; ürün inceliğinin değişmediğini, fakat bilya doluluğu ile değirmen enerjisi arasındaki paralel artışı ortaya çıkartmıştır.

2.3.2.3. Öğütme Süresi

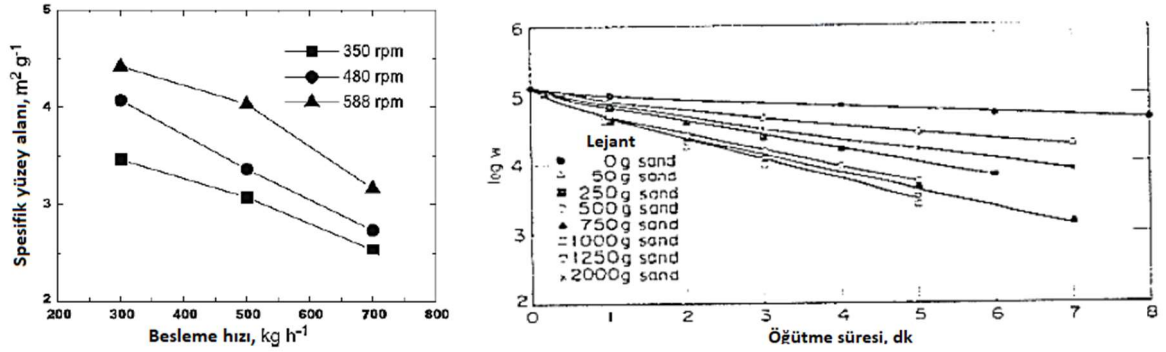
Ürün inceliğine doğrudan etki eden öğütme süresi, olması gerekenden daha uzun olursa; malzeme değirmen içerisinde gerektiğinden fazla kalacak ve aşırı öğütme denilen durum gerçekleşecektir. Bu da değirmen kapasitesinde düşüğe sebep olacak dolayısıyla öğütme performansını olumsuz etkileyecektir. Öğütme süresinin artışı ile azalan ürün inceliği ve artan ürün yüzey alanı pek çok araştırmada gözlemlenmiştir [71,75,82].

Konu üzerine yapılan araştırmaların da desteklediği üzere, tüm öğütmelerde doğrusal olmayan öğütme kinetiği gözlemlenmektedir. Bu davranım öğütme süresinin artmasına bağlı olarak yavaşlayan kırılma oranını ifade etmektedir [52,91].

2.3.2.4. Besleme Hızı

Besleme hızı, öğütme performansı üzerinde 2 ana etkiye sahiptir. Bunlar; ürün inceliği ve özgül enerji tüketimidir. Diğer tüm koşulları sabit ve sadece besleme hızının arttırıldığı varsayılan bir değirmen düşünülüğünde, değirmen içerisindeki öğütme ortamı genişleyecek fakat sabit değirmen enerjisine bağlı olarak, birim malzeme miktarı başına uygulanacak öğütme enerjisi azalacak ve ürün irileşecektir. Tersine, besleme hızının azaltıldığı bir varsayımda ise, ürün incelemek dolayısıyla toplam ürün yüzey alanı artacaktır. Besleme hızı ve ürün inceliği arasındaki ters orantı pek çok çalışma ile desteklenmiştir [65,73,84]. Bu durum Wang [73] ve Sadler

[82] tarafından sabit koşullarda besleme miktarının artırıldığı çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Şekil 2.21).

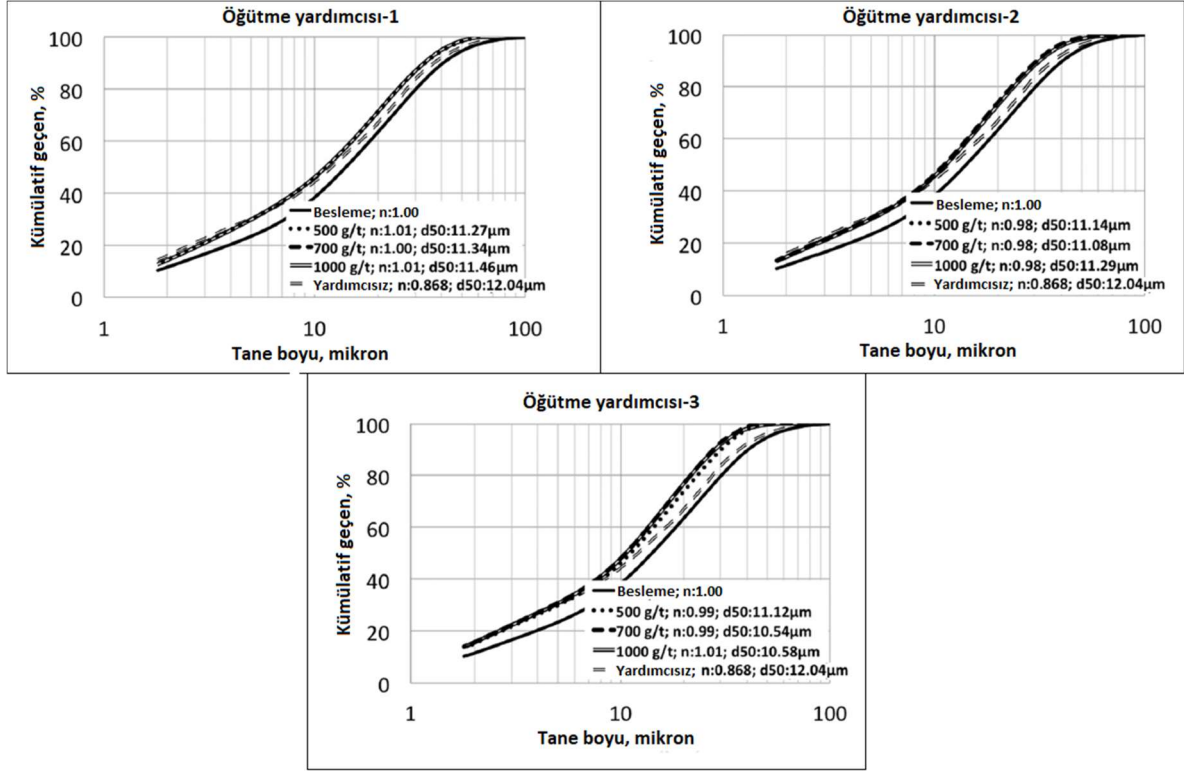


Şekil 2.21. Malzeme doluluğunun öğütme üzerindeki etkisi (a) [73] (b) [82]

2.3.2.5. Öğütme Yardımcıları

Değirmenlerde zamana bağlı birikim gösteren ince taneler, yaş öğütmede yüksek viskoziteye, kuru öğütmede ise topaklanmaya ve sıvanmaya sebep olarak öğütme performansını olumsuz etkilemekte ve değirmen kapasitesini düşürmektedir [92]. Bu tür problemlerin önüne geçmek için kullanılan öğütme yardımcısı kimyasallar, farklı üç etki mekanizmasına sahiptir. Bu etkiler, birincisinde, kimyasal reaktiflerin malzeme yüzeylerine soğurulup tane yüzey yüklerini nötrlemesine, ikincisinde, kimyasal reaktiflerin parçacık yüzey düzensizliklerine soğurularak malzeme sertliğinin değiştirilmesine, üçüncüsünde ise, öğütme anındaki dağıtıcı etkisiyle oluşturduğu tane hareketliliğine dayanmaktadır [93].

Altun [92] tarafından yapılan çalışmada, farklı öğütme yardımcısı dozajlarının öğütme performansına etkisini incelemiştir; sabit koşullarda farklı öğütme yardımcısı kullandığı her öğütmede, kullanmadığına kıyasla daha ince ürün elde edildiğini ortaya çıkartmıştır (Şekil 2.22). Buna benzer bazı diğer çalışmalarda ise, uygun öğütme yardımcısı kullanımı ile; ürün yüzey alanınının 2 katına çıkarılabileceği [94] ve %37'e kadar enerji tasarrufu sağlanabileceği sonucuna varılmış [95], viskozite düşüşü gözlemlenmiştir [96].



Şekil 2.22. Öğütme yardımcılarının öğütme üzerindeki etkisi [92]

2.4. Bileşen Davranımı

Literatürde, çoklu bileşenli model yapıları üzerine yapılmış çalışmalar ile; malzeme özelliklerinin ve çeşitli öğütme teknolojilerinin bileşen davranımı üzerindeki etkileri tartışılmış ve araştırma sonuçlarına bağlı olarak enerji optimizasyonu üzerine çıkarımlar gerçekleştirilmiştir.

Abouzeid ve Fuerstenau [12] tarafından yüksek basınçlı merdaneli değirmen ile gerçekleştirilen çalışmada, sırasıyla yumuşak ve sert bileşen olarak; kalsitin ve kuvarsın farklı oranlardaki birleşimlerinde öğütmeler yapılmıştır. Bileşen kompozisyonlarının; değirmen parametreleri ile işletim değişkenleri, bileşenlere ait ürün dağılımları ve özgül enerji tüketimleri üzerine değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir: Öyle ki, karışımdaki kalsit/kuvars oranı arttıkça, uygulanan yük, merdane aralığı ve verim artarken merdane hızı azalmaktadır. Öte yandan değirmene ait bu gibi parametre ve işletim değişkenlerinin tüm enerji seviyelerinde birbirini dengeler nitelikteki durumuna bağlı olarak, özgül enerji tüketiminin karışım kompozisyonundan bağımsız olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bunlara ek olarak, farklı kırılma davranışları sergileyen bileşenlerden yumuşak olan kalsit, tüm fraksiyonlarında öğütülebilirken, sert bileşen kuvars, daha çok iri tane boyunda kırılım gerçekleştirmekte, ince tane boylarında ise karışım oranından ve enerji seviyesinden yoğun şekilde etkilenmektedir. Yani, sert bileşenin yumuşak bileşene kıyasla, karışım kompozisyonuna ve enerji seviyesine daha duyarlı olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca her iki bileşenin ortalama tane boyutları, harcanan enerjinin artmasıyla azalmaktadır.

Bond bilyalı değirmende, klinker, tras ve bunların karışımları ile gerçekleştirilen çalışmada Hoşten ve Avşar [9], klinker-tras karışımına ait bond iş indeksinin, klinkere ve trasa ait iş indekslerinin ağırlıklı ortalamasına eşit olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte karışıma ait iş indeksinin, sert bileşen olan klinkere ait iş indeksinden daha büyük olduğunu gözlemleyerek, tekli öğütmeler kıyasla karışım öğütülmesindeki nispeten yüksek enerji ihtiyacını da ortaya çıkartmıştır. Öte yandan karışım içindeki daha sert ve baskın bileşen klinkere ait kırılma hız fonksiyonunun kısa öğütme süreleri için hem zamandan hem de karışım bileşiminden bağımsız olduğu, trasın kırılma hızının ise doğrudan karışım birleşimine bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Dünder ve Benzer [13], klinker, puzolan, yüksek fırın cürufu, kalsit ve alçıtaşı gibi hammaddelerin kapalı devre bir bilyalı değirmen etrafında, her bir birleşenin kütle dağılımına göre tane boyutlarını incelemiştir. Çalışmada, her akış kolundaki bileşen boyut dağılımının, bileşenlerin öğütülebilirliklerine bağlı olarak değiştiğini ve nihai ürünün farklı incelikte bileşenler içerdiğini gözlemlemiştir. Öyle ki; değirmen ürününde alçıtaşı ile kireçtaşına göre daha iri tane boyuna sahip klinker ile puzolanın bulunduğunu ve bileşenlerin indirgeme oranlarının hesaplanmasıyla; nispeten yumuşak bileşenlerin (alçıtaşı, kalsit) indirgeme oranlarının daha sert bileşenlerin (klinker, puzolan) indirgeme oranlarına kıyasla daha yüksek değerler aldığını ortaya çıkarılmıştır. Öte yandan, nihai ürünün seperatörde sınıflandırılmış ince tane boyuna sahip malzemelerden oluşuyor olmasından dolayı, bileşenlerin özgül ağırlık farklarının da bu süreç içerisinde etkisine dikkat çekilmiştir. Bu nedenle değişken bileşen öğütülebilirliklerinin ve özgül ağırlıklarının, bileşenlerin nihai ürün içerisindeki inceliklerinin kontrolünü zorlaştırdığı vurgulanmıştır.

Bueno vd. [7], yarı-otojen değirmende başta sertlik ile yoğunluk olmak üzere farklı fiziksel özelliklere sahip kuvars ve çoğunlukla hematit, ikincil olarak ise manyetit, götit, limonit içeriğine sahip düşük dereceli demir cevheri ile gerçekleştirdiği çalışmada; değirmen verimliliğinin, değirmen içerisindeki sert/yumuşak bileşen oranından etkilendiğini ve bu oran ile doğrusal olmayan bir şekilde ilişkili olduğunu gözlemlemiştir. Sonuçlara göre; değirmen verimi, taze besleme içerisindeki yumuşak malzeme miktarının %50'nin üzerinde olduğunda artış göstermektedir. Fakat değirmen beslemesindeki yumuşak malzeme miktarının artışı ile ürüne ait tane boyut dağılımı daha iri hale geleceğinden, nihai ürün boyutunda bir denge oluşacağı ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca öğütme işleminde sert bileşene ait kontrol etkisinin, karışımın 1:1 oranına kadar geçerli olduğu belirtilmiştir.

Difen vd. [8], bilyalı değirmende klinker, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile çok bileşenli besleme kullanarak gerçekleştirdiği çalışmada, malzemelerin öğütme özelliklerini; tane boyu dağılımı, Blaine inceliği ve ürün içerisindeki malzeme dağılımını incelemiştir. Çalışmada, klinkerin kalsit ile karışımında hem kalsit hem de klinker tekli öğütmelerine kıyasla daha iyi öğütülmüş ve karışım daha düşük bir Blaine değerine sahip olmuştur. Ayrıca kalsitin ince fraksiyonda, klinkerin ise daha iri fraksiyonlarda konsantre olduğu gözlemlenmiştir. Klinker-yüksek fırın cürufu karışımında ise, klinker cürufun öğütülmesini engellemiş ve cüruf kısmen iri

fraksiyonda birikmiştir. Sonuç olarak; farklı öğütülebilirliklere sahip malzemelerin oluşturduğu karışımın kullanıldığı beslemede, bir bileşen diğerinin öğütülmesine yardımcı veya engelleyici nitelikte davranarak, seçici bir öğütme meydana getirdiği ortaya çıkarılmıştır. Böylece bu durumun, öğütülmüş ürünlerdeki ince ve iri tane sayısını arttırarak tane boyutu dağılımını genişleteceği ve homojenliği azaltacağı belirlenmiştir.

Tsivilis vd. [10], bilyalı değirmende çimento ana bileşenleri olan, farklı öğütülebilirliklere sahip; klinker ve kalsit karışımı ile öğütmeler gerçekleştirmiştir. Öğütmeleri karışım içerisindeki kalsit oranını %10, %20, %30, %40 gibi değişken değerlerde seçerek kalsit varlığının karışım içerisindeki davranımını ve kalsit ile klinkerin fraksiyonlara bağlı tane boyu dağılımlarını belirlemiştir. Çalışmada, klinkere kıyasla daha yüksek öğütülebilirliğe sahip kalsit varlığının, karışımda daha geniş bir tane boyu dağılımına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ürünlerde; klinkerin iri fraksiyonlarda, kalsitin ise -8 µm fraksiyonda olmak üzere daha ince fraksiyonlarda konsantre edildiği ortaya çıkarılmıştır. Bunlara ek olarak, klinker ile karışımında %30'u geçen kalsit içeriğinin, yastıklama etkisine bağlı olarak hem klinkerin hem de kalsitin öğütülmesini zorlaştırdığı sonucuna varılmıştır.

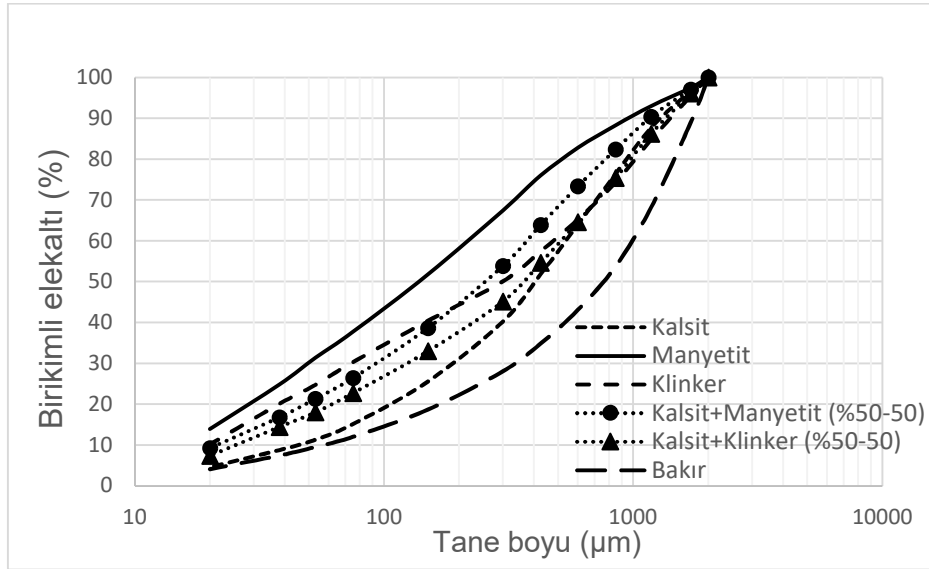
Literatür çalışmalarından anlaşılacağı üzere, çoklu bileşenli mineral davranımı incelemesi bilyalı değirmen, otojen değirmenler ve yüksek basınçlı merdaneli presler üzerinde yapılmış olup ince tane boyu üretiminde kullanılan karıştırmalı değirmenlerde bu tür çalışmalara rastlanmamış ve bilyalı değirmenlerden elde edilecek sonuçlarla da karşılaştırılmamıştır. Bu çalışma kapsamında, Bond bilyalı değirmende ve dik hazneli karıştırmalı değirmende; klinker ile kalsit ve manyetit minerallerinin tekli ve karışım içerisinde öğütmeleri gerçekleştirilerek, değirmen performansları ve malzemelerin ürün içerisindeki fraksiyonel dağılımındaki farklılıklar değerlendirilmiştir. Tekli ve karışımlar ile yapılan öğütmeler dışında, içerisinde kalkopirit, pirit, galenit ve sfalerit minerallerini barındıran bakır cevheri de aynı öğütme işlemlerine tabi tutulmuş ve cevher içerisindeki minerallerin, elek aralıkları bazında çeşitleri, boyutları ve oranları belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasına ait bu kısımda, malzeme özellikleri, kullanılan ekipmanlar ve yöntem aktarılmaktadır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen öğütmeler, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarı bünyesinde bulunan, dik hazneli karıştırırmalı ve bilyalı değirmende gerçekleştirilmiştir. Öğütmelerde kullanılan numuneler ise farklı bölgelerden gelmiş, tanımlanması için gerekli tane boyu dağılımları ve yığın yoğunluğu ölçümleri yapılmış; kalsit, manyetit, klinker ve bakır cevheri malzemelerinden elde edilmiştir. Malzemelere ait, boyut dağılımları Şekil 3.1'de verilmektedir. Bakır cevheri, klinker ve kalsite ait kimyasal kompozisyon sırasıyla Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.1. Beslemelere ait tane boyu dağılımları

Çizelge 3.1. Bakır cevherine ait ilgili mineralojik dağılım

Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	Mn%	As%	Cd%
1.297	1.067	1.625	21.562	0.180	0.050	0.006

Çizelge 3.2. Klinkere ait kimyasal kompozisyon

SO ₃ %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	LOI%
3.23	15.82	3.70	3.27	65.89	0.87	0.37	0.80	6.05

Çizelge 3.3. Kalsite ait mineralojik bileşim

CaCO ₃ %	MgCO ₃ %	Fe ₂ O ₃ %
98.98	0.73	0.023

Laboratuvar ölçeğindeki, sırasıyla çeneli ve merdaneli kırıcı vasıtasıyla, tümü 2.36 mm elekten geçecek şekilde hazırlanan malzemelerden alınmış temsili numunelerin, ilk önce üst boy 2,36 mm alt boy 300 µm olacak şekilde rotap elek cihazı, daha sonra ise üst boy 300 µm alt boy 20 µm olacak şekilde havalı alpine cihazı kullanılarak elek analizleri gerçekleştirilmiş (Şekil 3.2), tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Tüm çalışmalar kuru şekilde ve ISO 3310-1-2016 standart elek serisi ($\sqrt{2}$ elek serisi) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Rotap elek cihazı ve havalı alpine cihazı

Değirmen doluluklarına karşılık gelecek malzeme miktarının belirlenmesi adına gerçekleştirilmiş yığın yoğunluğu analizleri için plastik mezür kullanılmıştır. Bir malzemenin gözenekliliği ile ters orantıda hareket eden yığın yoğunluğunun belirlenmesi için kullanılan Eşitlik 3.1'de, beslenen malzemelere ait şarj ağırlıkları ise Çizelge 3.4'te, malzemelere ait yoğunluk değerleri Çizelge 3.5'te verilmektedir.

$$d_y = \frac{M_k}{V_t} \quad (3.1)$$

d_y = Yığın yoğunluğu (g/cm^3)

M_k = Malzeme ağırlığı (g),

V_t = Sıkışma sonrası toplam hacim (cm^3).

Çizelge 3.4. Besleme şarj ağırlıkları

Malzeme (g)	Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı Bilyalı Değirmen		
	%20 Doluluk	%25 doluluk	%30 Doluluk	1,5 mm bilya	2,5 mm bilya	4,0 mm bilya
Kalsit	3403	4254	5105	526	544	495
Manyetit	6287	7859	9431	971	1004	915
Klinker	3961	4951	5941	612	633	576
Kalsit-Manyetit	4845	6056	7268	719	743	677
Kalsit-Klinker	3682	4602	5523	552	571	520
Bakır	4653	5816	6979	719	743	677

Çizelge 3.5. Malzemelere ait yoğunluk değerleri

	Kalsit	Manyetit	Klinker	Bakır cevheri
Yoğunluk (g/cm ³)	2,7	4,5	3,2	3,6
Yığın yoğunluğu (g/cm ³)	1,77	3,27	2,06	2,42

3.2. Kullanılan Ekipmanlar

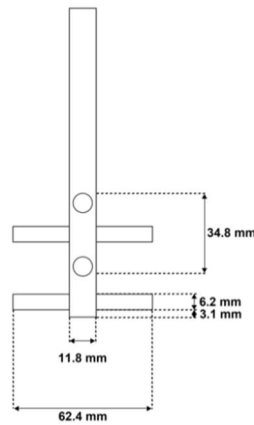
Kesikli öğütmelerin gerçekleştirildiği çalışmalarda laboratuvar ölçekli; Bond bilyalı değirmen ve dik hazneli pinli karıştırılmalı bilyalı değirmen kullanılmıştır. Değirmenlerin enerji tüketimini ve güç ölçümlerini belirlemek adına kurulmuş trifaze elektrik sayacı aracılığıyla hem anlık olarak çekilen güç hem de öğütme süresi boyunca tüketilmiş olan toplam elektrik enerjisi miktarı ölçülmüştür (Şekil 3.3). Serbestleşme analizleri (MLA) ise Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nde yapılmış, minerallerin öğütme işlemi sonrası serbestleşme derecesi tespit edilmiştir.



Şekil 3.3. Trifaze elektrik sayacı

3.2.1. Karıştırılmalı Bilyalı Değirmen

Çalışmalarda kullanılan dik hazneli karıştırılmalı değirmene ait görüntü ve teknik bilgiler sırasıyla Şekil 3.4'te ve Çizelge 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.4. Dik hazneli pinli karıştırılmalı değirmen

Çizelge 3.6. Karıştırmalı değirmenin teknik özellikleri

Motor gücü (kW)	10
Değirmen çapı (cm)	11
Değirmen yüksekliği (cm)	19,5
Efektif hacim (cm ³)	1700
Azami hız (m/s, rpm)	4,48, 950

Çalışmada gerçek yoğunlukları eşit (7,8 g/cm³) 1,5, 2,5 ve 4,0 mm çaplarında olan bilyaların kullanıldığı değirmende, öğütmeler, %50 değirmen doluluğu ve %80 malzeme doluluğu esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Değirmendeki sabit doluluk değerlerinde, farklı bilya boylarına bağlı bilya şarj ağırlıkları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Karıştırmalı değirmende farklı bilya boylarına bağlı bilya şarj ağırlıkları

Bilya çapı (mm)	1,5	2,5	4,0
Bilya şarj ağırlığı (kg)	3,92	3,82	4,09

3.2.2. Bond Bilyalı değirmen

Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen olarak kullanılan standart bond değirmeninin görüntüsü Şekil 3.5'te, teknik özellikleri ise Çizelge 3.8'de verilmiştir. Değirmende gerçekleştirilen öğütmeler farklı üç dolulukta (%20, %25, %30), 30 mm çaplı çelik bilya kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değirmendeki değişken doluluğuna bağlı bilya şarj ağırlıkları çizelge 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Bond Bilyalı değirmen

Çizelge 3.8. Bilyalı değirmene ait teknik özellikler

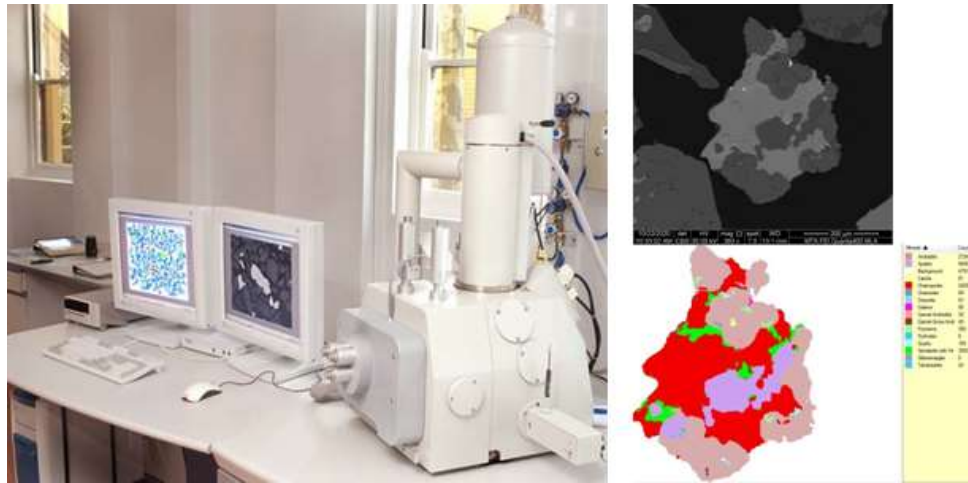
Motor gücü (kW)	20
Değirmen çapı, yüksekliği (cm)	30,5, 30,5
Efektif hacim (cm ³)	930
Dönüş hız (m/s, rpm)	2,25, 70
Kritik hız (%)	85

Çizelge 3.9. Bilyalı değirmende farklı doluluklara bağlı bilya şarj ağırlıkları

Değirmen doluluğu (%)	20	25	30
Bilya şarj ağırlığı (kg)	19,63	24,53	29,44

3.2.3. Mineral Serbestleşme Analizörü (MLA)

Bilyalı ve karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütme işlemleri sonucunda elde edilen ürünler fraksiyonlara ayrılmış ve bu fraksiyonlardaki cevherin serbestleşme dereceleri incelenmiştir. Şekil 3.6'da mineral serbestleşme analizörünün fotoğrafı ve örnek bir görüntü analizi verilmiştir.



Şekil 3.6. Mineral serbestleşme analizörü ve örnek bir görüntü analizi

3.3. Yöntem

Bu çalışma kapsamında, farklı öğütme mekanizmalarına sahip bilyalı ve karıştırmalı değirmenlerde, karıştırma hızı, bilya boyu, bilya doluluğu, malzeme doluluğu gibi farklı işletme koşullarındaki denemeler ile, aynı ürün boyunda yapılan öğütme işlemlerinin boyut bazlı mineral davranımında farklılık yaratacağı hipotezi test

edilmiştir. Bu bağlamda öncelikli olarak endüstriden saf olarak temin edilen klinker ile kalsit ve manyetit minerallerinin hem bond bilyalı değirmeninde hem de dik hazneli karıştırmalı değirmende öğütülmesi, sonrasında da bu malzemelerin belli oranlarda karıştırılarak öğütülmesi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.10’da denemeler için belirlenmiş çalışma planı, Çizelge 3.11’de ise öğütmelerin değirmenlere bağlı öğütme koşulları verilmektedir.

Çizelge 3.10. Denemeler için belirlenmiş çalışma planı

	Kalsit (%)	Manyetit (%)	Klinker (%)
Öğütme 1	100	-	-
Öğütme 2	-	100	-
Öğütme 3	-	-	100
Karışım 1	50	50	-
Karışım 2	50	-	50

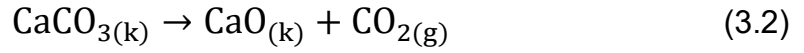
Çizelge 3.11. Bond ve karıştırmalı değirmene ait öğütme koşulları

	<u>Bond Değirmeni</u>	<u>Karıştırmalı Değirmen</u>
Bilya doluluğu (%)	20-25-30	50
Bilya çapı (mm)	30	1,5-2,5-4,5
Malzeme doluluğu (%)	100	80
Öğütme süresi (dk.)	15-30-60-120	Her koşul için en az 3 farklı süre
Eklenen öğütme yardımcısı* miktarı (g/t)	1000 – 1750	1000 – 1750
Karıştırma hızı (m/s)	-	3,5
Her bir malzeme ile gerçekleştirilen öğütme işlemi sayısı	12	Her bir malzeme ile en az 9 öğütme
Toplam öğütme işlemi sayısı	60	58

*Not: Trietanolamin (TEA) – $C_6H_{15}NO_3$

Malzemelerin tek başına gerçekleştirilen öğütmelerinin sonuçlarında, ürünlere ait boyut dağılımlarının ölçülmesi değerlendirmeler açısından yeterli olacaktır. Ancak

karışım oranlarında yapılan denemelerde malzemelerin her fraksiyon içerisinde birbirinden ayrılması gerekmektedir. Bu noktada mineraller arası fiziksel ve kimyasal farklılıklardan faydalanılmıştır. Bu bağlamda manyetit ile yapılan karışımlarda manyetik ayırma, kalsit ile olan denemelerde ise ısı işlem sonrası geride kalan malzeme üzerinden hesaplama yapılmıştır. Bu hesaplamada içerisinde kalsit (kalsiyum karbonat) olduğu bilinen fraksiyondan alınan 1 gramlık temsili numune, 975°C sıcaklıktaki fırında 45 dakika bekletilerek, kalsit içerisindeki karbondioksitin uzaklaştırılması sağlanılmış, böylece ilk ağırlığa göre kaybedilen ağırlık miktarı üzerinden karbondioksit miktarına, oradan da kalsit miktarına geçiş yapılması mümkün olmuştur. Buna yönelik prosedür TS EN 196-4 standardında belirtilmektedir [97]. Kalsite uygulanan ısı işlem sonucu oluşan tepkime eşitlik 3.2'de verilmektedir.



$\text{CaCO}_{3(k)}$ = Kalsiyum karbonat (katı)

$\text{CaO}_{(k)}$ = Kalsiyum oksit (katı)

$\text{CO}_{2(g)}$ = Karbondioksit (gaz)

Farklı minerallerin karışımlarıyla oluşturulmuş beslemeler ile yapılan öğütmeler dışında, farklı mineraller içeren bakır cevheri de aynı öğütme işlemlerine tabi tutulmuştur. Bakır cevheri içerisinde kalkopirit, pirit, galenit ve sfalerit minerallerini bulundurmaktadır. Bu tür çoklu mineral içeren cevher içerisindeki minerallerin, elek aralıkları bazında çeşitlerinin, boyutlarının ve oranlarının belirlenmesi, gerçekleştirilecek mineral serbestleşme analizi (MLA) ile mümkün olmaktadır. MLA çalışması, yazılımına tanımlanmış farklı minerallerin cevher içerisindeki tesbitini sağlayacak mikroskobik değerlendirmelerle, çalışma için önemli veriler sağlayacaktır [98].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

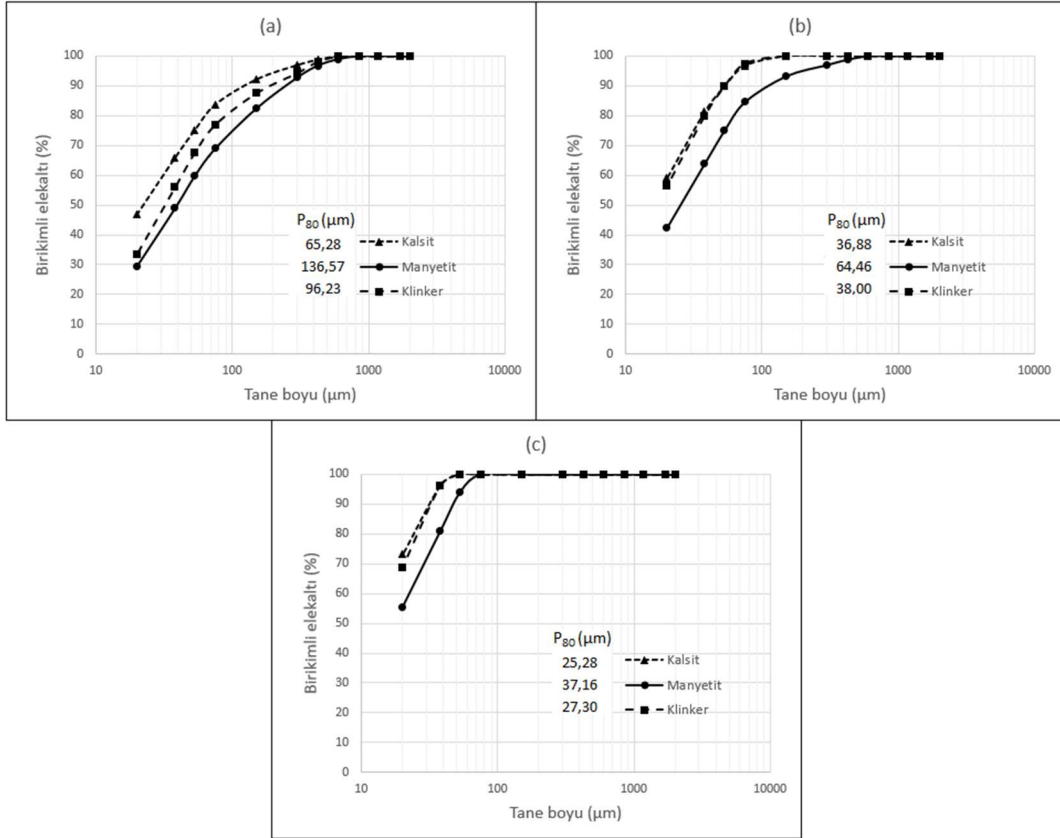
Deneysel çalışmalar 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada hem bond bilyalı değirmendeki farklı doluluk oranına, hem de karıştırmalı bilyalı değirmendeki farklı bilya çaplarına bağlı bilyalar arası boşluk üzerinden, kalsit, manyetit, klinker ve bakır için öğütülecek malzeme ağırlıkları tespit edilmiş ve sonuçların tekrarlanabilirliklerinin kontrolü adına yapılanlar ile birlikte, değişken sürelerde toplamda 144 adet öğütme gerçekleştirilmiştir. Öğütme süreleri pinli karıştırmalı değirmende 3,5 m/s karıştırma hızında; 1 dakika, 5 dakika ve 10 dakika, bilyalı değirmende ise 2,25 m/s dönüş hızında; 15 dakika, 30 dakika, 60 dakika ve 120 dakika olarak belirlenmiştir. Öte yandan çalışma gereği karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmen kıyaslamaları için gereklilik teşkil eden, değirmen ürünlerine ait eşit P_{80} değerlerine ulaşabilmek adına, karıştırmalı değirmendeki öğütme süreleri üzerinde değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda yukarıda verilen belirlenmiş sürelerde, karıştırmalı değirmenden elde edilen ürün boyuna en yakın bilyalı değirmen ürün boyu tespit edilmiş ve karıştırmalı değirmen ürününün sırasıyla daha ince veya iri olması gerektiği koşulda, öğütme süresinin artırılması veya azaltılması yöntemi belirlenmiştir [71]. Çalışmanın ikinci aşamasında, her iki değirmene ait ürünlerde tane boyu analizleri gerçekleştirilmiş ve kalsit-manyetit, kalsit-klinker karışımları tane boyu fraksiyonlarına göre ayrılmıştır. Son aşamada ise tane boyu fraksiyonlarına ayrılmış; kalsit-manyetit ve kalsit-klinker karışımlarında fraksiyonel bazda ısıtma işlemleri uygulanarak, bakır cevheri içerisindeki mineraller için ise fraksiyon bazda gerçekleştirilen MLA çalışması yoluyla minerallerin fraksiyon dağılımları belirlenmiştir.

4.1. Tek Bileşenli Öğütme Çalışmaları

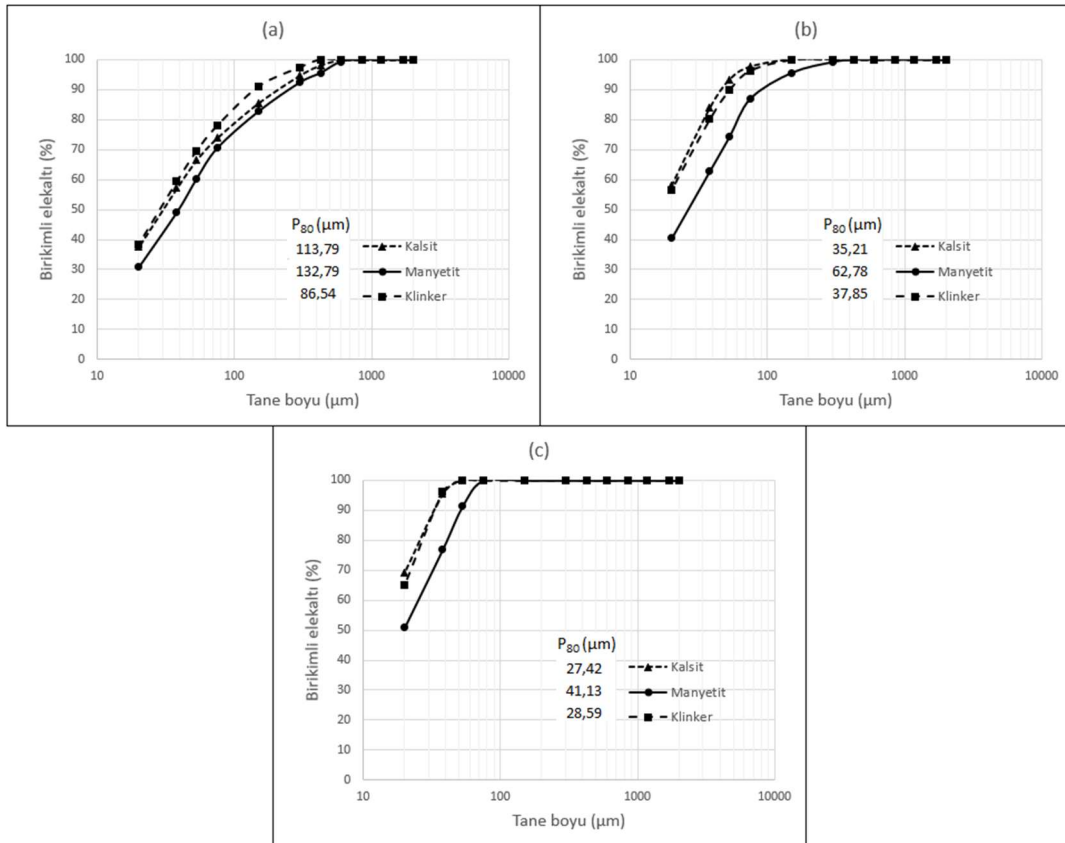
Bu başlık altında, iki değirmende de her biri ayrı ayrı olacak şekilde gerçekleştirilmiş, kalsit, manyetit ve klinker öğütmelerinin sonuçları ile bu sonuçlar kullanılarak değirmenlerin performansı açısından yapılacak karşılaştırmalar yer almaktadır.

4.1.1 Karıştırmalı Değirmen Testleri

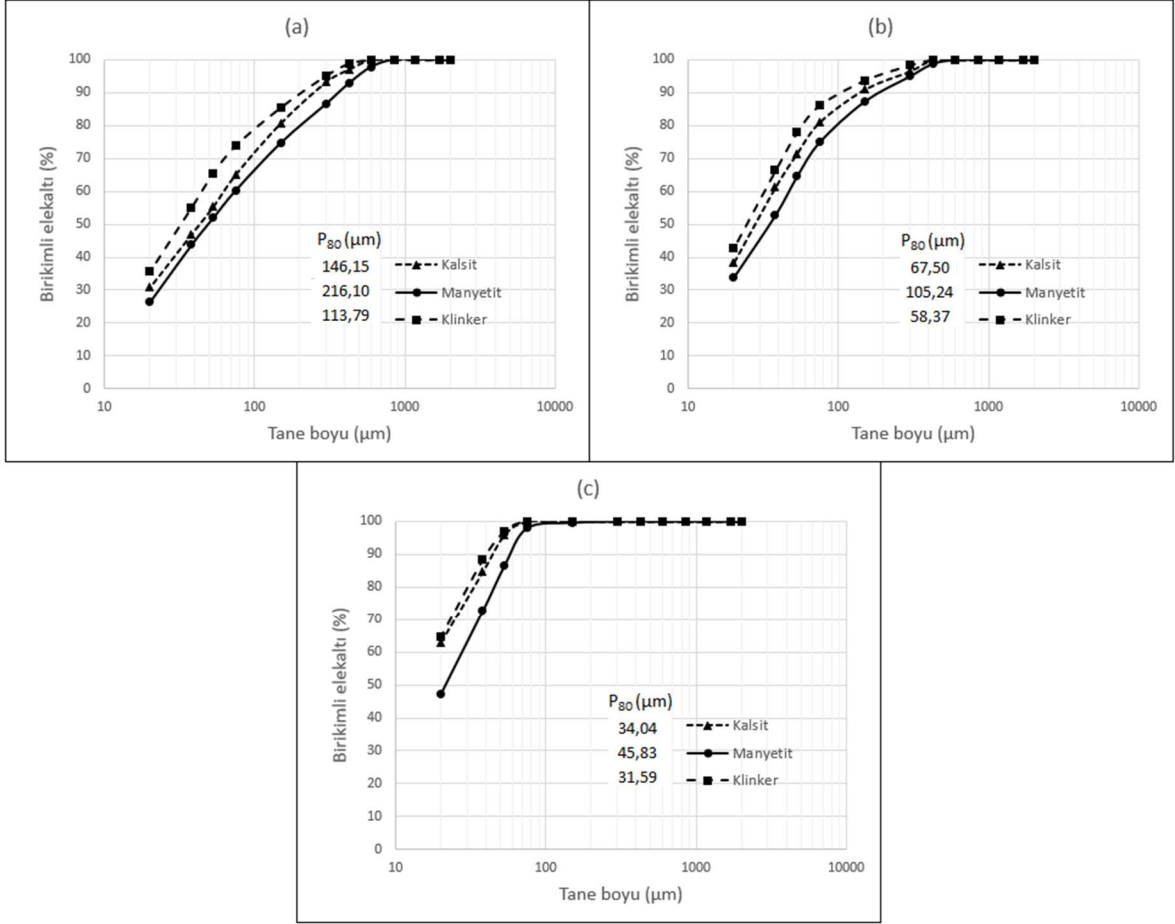
Karıştırmalı bilyalı değirmende 1,5 mm, 2,5 mm ve 4,0 mm olmak üzere değişken bilya boyuna bağlı gerçekleştirilen öğütme sonuçları sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te yer almaktadır.



Şekil 4.1. Karıştırmalı bilyalı değirmende 1,5 mm bilya ile gerçekleştirilen tekli öğütmeler; (a) 1 dakika, (b) 5 dakika ve (c) 10 dakika



Şekil 4.2. Karıştırmalı bilyalı değirmende 2,5 mm bilya ile gerçekleştirilen tekli öğütmeler; (a) 2 dakika, (b) 6 dakika ve (c) 10 dakika

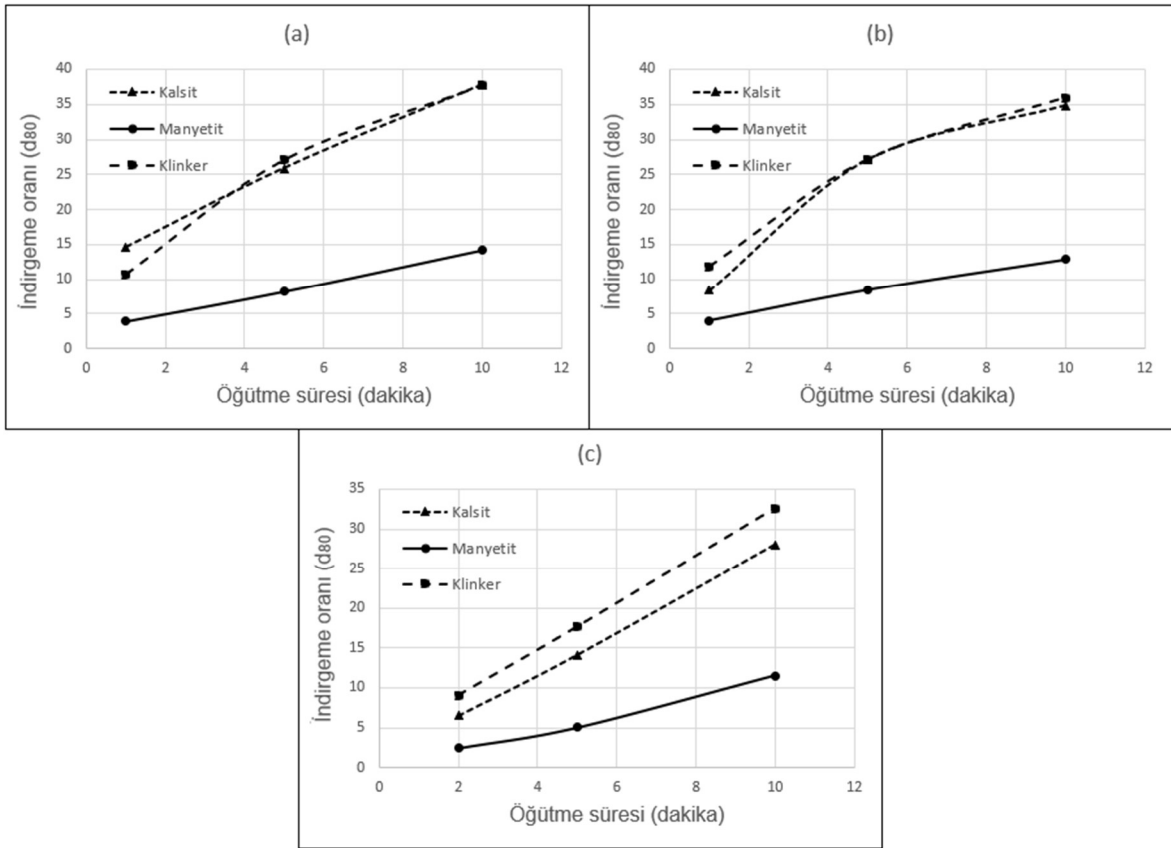


Şekil 4.3. Karıştırmalı değirmende 4,0 mm bilya ile gerçekleştirilen tekli öğütmeler; (a) 2 dakika, (b) 5 dakika ve (c) 10 dakika

Karıştırmalı bilyalı değirmende tek bileşenli olarak gerçekleştirilen 10 dakikalık (c) öğütmelere bakıldığında; malzeme türü fark etmeksizin, bilya çapının artışı ile ürün irileşmektedir. Aynı durum 1,5 mm ve 4,0 mm bilya ile yapılan 5 dakikalık öğütmelerde de aynı şekilde gözlemlenebilmektedir. Kullanılan üç malzeme için de ortak olan bu durum, Zheng [78] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da aynı şekilde yer almıştır. Öte yandan öğünmeye karşı gösterilen direncin artışı ile gerekli enerji transferini sağlamak adına daha iri bilya kullanılması gerekliliği [45]; klinkere kıyasla daha yüksek öğütülebilirliğe sahip olan kalsitin 1,5 mm ile yapılan tüm öğütmelerde klinkere göre daha iyi öğünmesi, klinkerin ise kalsite göre 2,5 mm bilya ile gerçekleştirilen 2 dakikalık öğütmede daha iyi, 4,0 mm bilya ile yapılan öğütmeler de dahil olacak şekilde diğer tüm öğütmelerde kalsit ile yakın boylara öğütülmüş olması üzerinden gözlemlenmiştir.

Kalsit ve klinkere ait ürün boyları incelendiğinde, ikinci ve üçüncü öğütme sürelerindeki ürün incelikleri arasındaki değişimin, birinci ve ikinci öğütme

sürelerindeki göre daha düşük olduğunu görmek mümkündür. Bu durum söz konusu öğütme süreleri arasında birinci dereceden olmayan öğütme kinetiğinin gerçekleşmiş olduğunu göstermektedir. Yavaşlama etkisi olarak da adlandırılan bu durum; beslemenin %80'lik kısmının altında kalacağı elek aralığını ifade eden F_{80} değerinin, öğütme ürününün %80'lik kısmının altında kalacağı elek aralığını ifade eden P_{80} değerine bölümüyle elde edilen indirgeme oranı ile incelenebilmektedir [13]. Karıştırmalı bilyalı değirmende değişken bilya boyuna bağlı indirgeme oranlarındaki değişim Şekil 4.4'te verilmektedir.



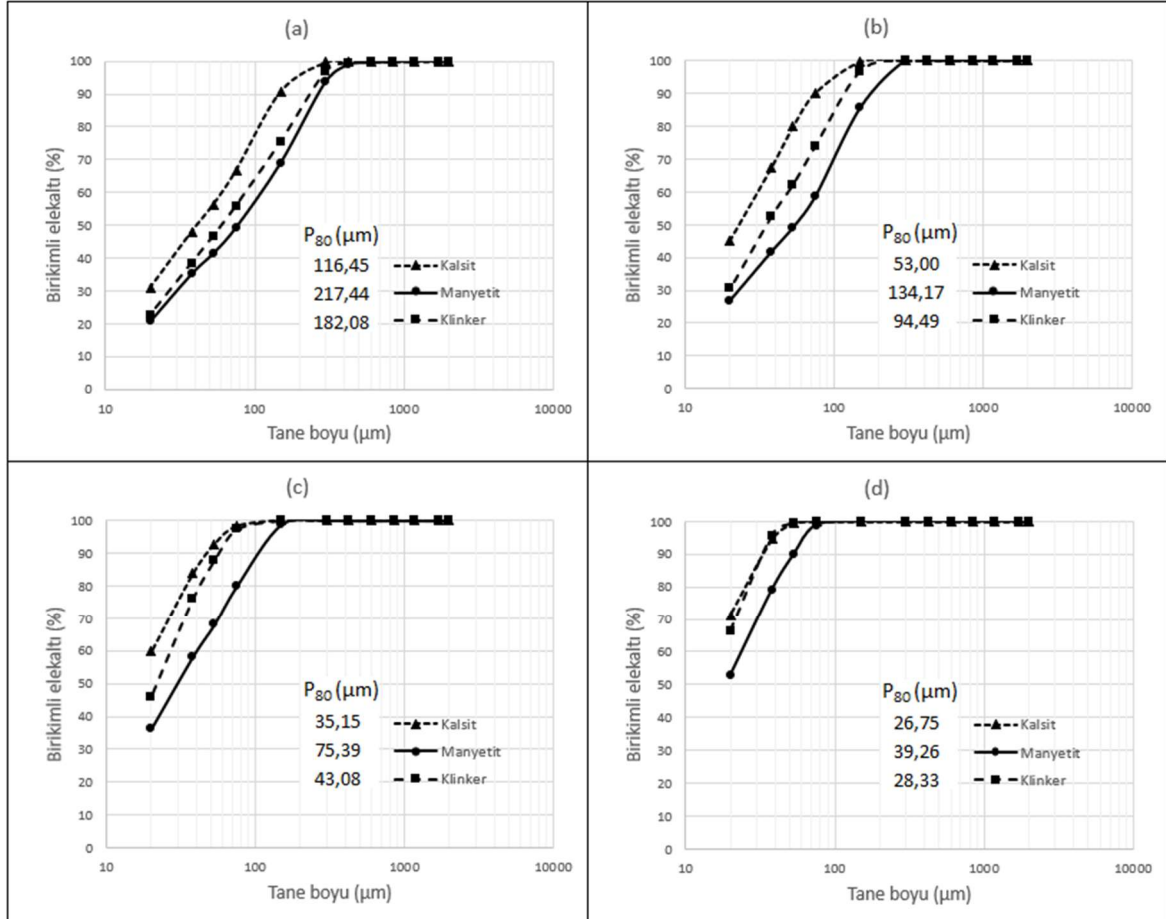
Şekil 4.4. Karıştırmalı değirmenin tekli öğütmelerindeki indirgeme oranları; (a) 1,5 mm bilya, (b) 2,5 mm bilya, (c) 4,0 mm bilya

İndirgeme oranlarındaki değişimler incelendiğinde; kalsit ve klinker, 2,5 mm bilya ile gerçekleştirilen öğütmenin altıncı dakikasından sonra yavaşlama etkisi göstermiş ve öğünme doygunluğuna ulaşmaya başlamıştır. Buna ek olarak klinker aynı etkiyi 1,5 mm bilya ile gerçekleştirilen öğütmenin beşinci dakikasından sonra da göstermiştir. Manyetit ise tüm bilya boylarında lineer öğütme kinetiğine sahiptir. Göze çarpan diğer önemli detaylardan birisi ise kalsitin 1,5 mm ve 2,5 mm bilya ile yapılan öğütmelerde, ilk iki öğütme süreleri arasındaki öğünme davranışıdır. Kalsitin her iki öğütmesinde beşinci dakikada indirgeme oranı yaklaşık 27 seviyesindedir. Fakat

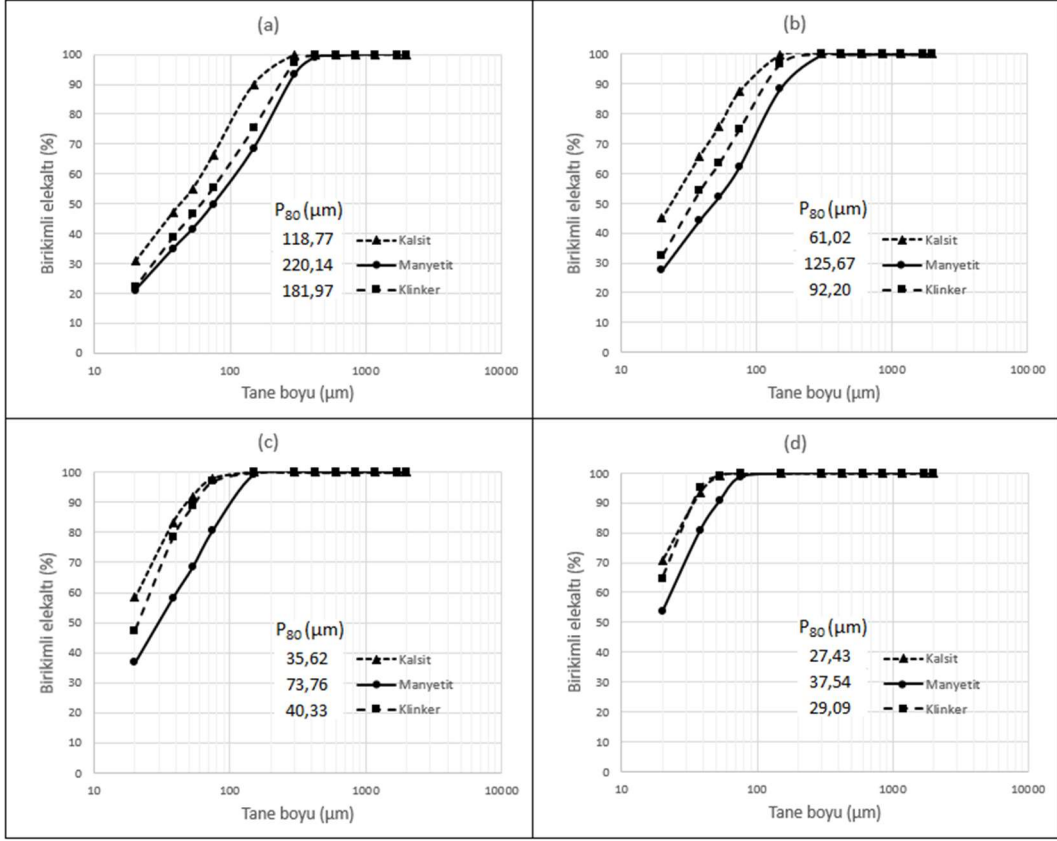
1,5 mm ve 2,5 mm bilya ile yapılan öğütmelerin ikinci dakikasında indirgeme oranlarının sırasıyla 17 ve 8 olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum öğütmede ikinci dakikaya kadar küçük çaplı bilyanın malzeme ile arasında sağladığı yüksek çarpışma sayısına, ikinci ve beşinci dakikalar arasında ise büyük çaptaki bilyanın malzeme üzerinde daha yoğun bir stres enerjisi uyguluyor olmasına ait etkinin sonucu olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle ikinci dakikadan önce 1,5 mm bilya 2,5 mm bilyaya kıyasla, ikinci ve beşinci dakikalar arasında ise 2,5 mm bilya 1,5 mm bilyaya kıyasla birim zamanda daha yoğun bir öğütme gerçekleştirmiştir.

4.1.2. Bilyalı Değirmen Testleri

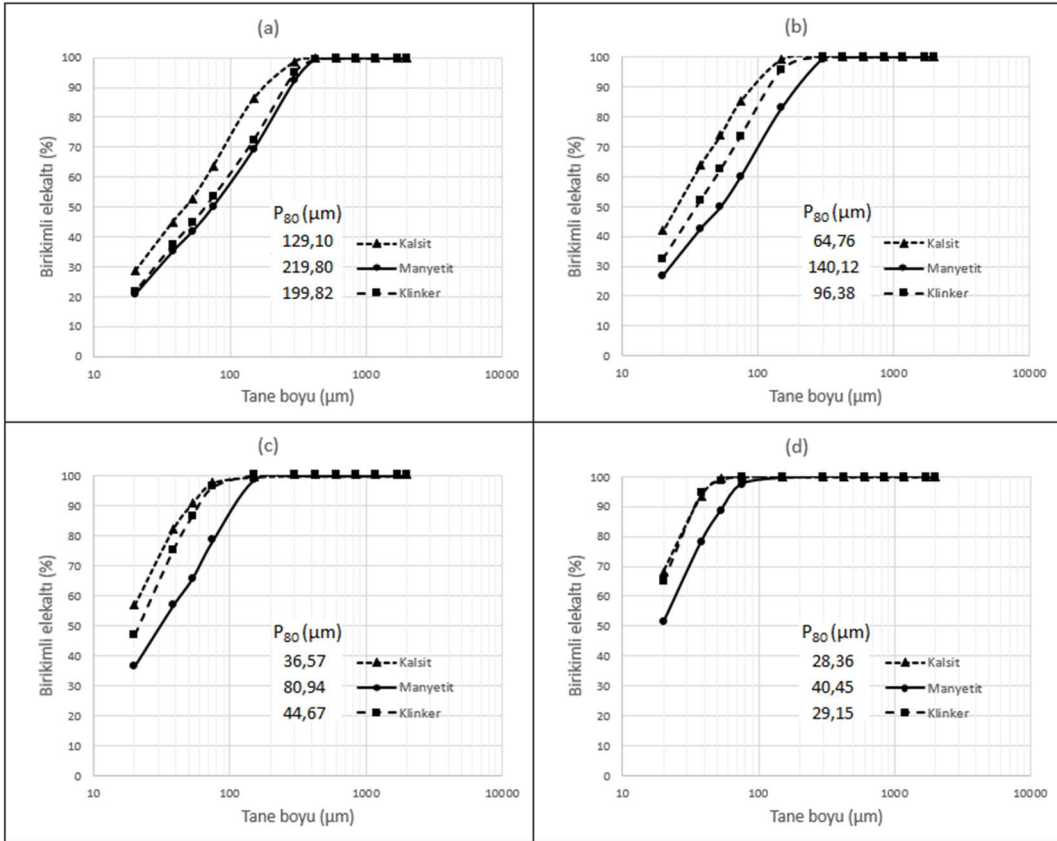
Bond bilyalı değirmende %20, %25 ve %30 olmak üzere değişken doluluk oranına bağlı gerçekleştirilen öğütme sonuçları sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de yer almaktadır.



Şekil 4.5. Bilyalı değirmende %20 dolulukta gerçekleştirilen tekli öğütmeler; (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 60 dakika, (d) 120 dakika

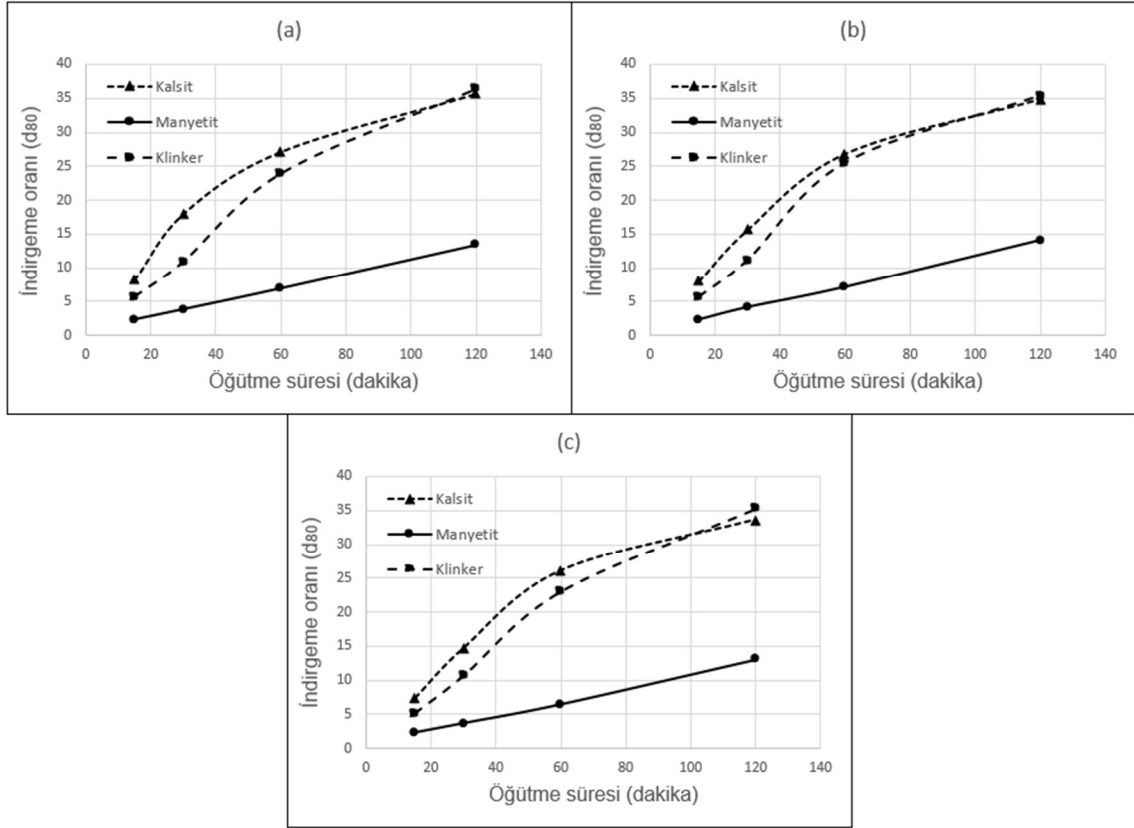


Şekil 4.6. Bilyalı değirmende %25 dolulukta gerçekleştirilen tekli öğütmeler; (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 60 dakika, (d) 120 dakika



Şekil 4.7. Bilyalı değirmende %30 dolulukta gerçekleştirilen tekli öğütmeler; (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 60 dakika, (d) 120 dakika

Bond bilyalı değirmende tek bileşenli olarak gerçekleştirilen öğütme sonuçları incelendiğinde; Tüm malzemelerde, değişken değirmen doluluğuna rağmen aynı öğünme eğilimleri gözlemlenmiş ve aynı süreli öğütmelerde benzer ürün inceliğine ulaşılmıştır. Bu durum, değirmen doluluğunun artışı ile paralel olarak artacak değirmen enerjisine rağmen, söz konusu değişken bilya doluluk oranlarının benzer özgül enerji tüketimine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [75]. Bu etkiyi Şekil 4.8’de verilen indirgeme oranları üzerinde de gözlemlenmek mümkündür.

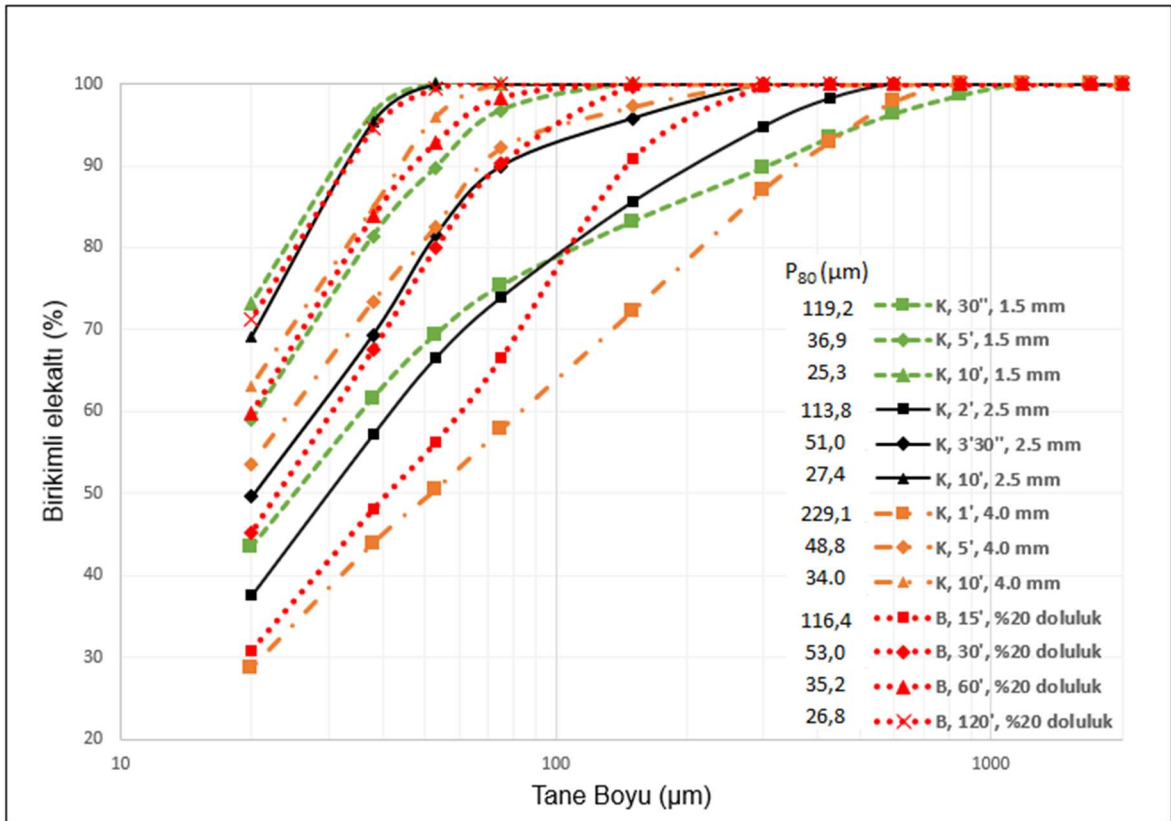


Şekil 4.8. Bilyalı değirmenin tekli öğütmelerindeki indirgeme oranları; (a) %20 doluluk, (b) %25 doluluk, (c) %30 doluluk

Tüm malzemelere ait indirgeme oranlarının aynı öğütme sürelerinde benzer değerlere sahip olduğunun gözlemlendiği çalışmada, kalsitin ve klinkerin altmışıncı dakikadan sonra gösterdiğini yavaşlama etkisini de fark etmek mümkündür. Kalsit öğütmelerinde bilya doluluğunun malzeme inceliği üzerindeki etkisinin öğütmenin ilk 30 dakikasında daha belirgin olduğu farkedilmektedir. Özellikle bir saatlik öğütme süresi aşıldıktan sonra bilya doluluğunun öğütmeye olan etkisinin azaldığı anlaşılmaktadır. Öğütme işlemlerine devam edildiğinde (60 ve 120 dk.); kalsitin inceliğinin azalmasına bağlı olarak, bilya doluluğunun da kalsitin tane boyu dağılımı üzerindeki etkisini kaybettiği görülmektedir.

4.1.3. Teknolojik Farklılıkların Tartışılması

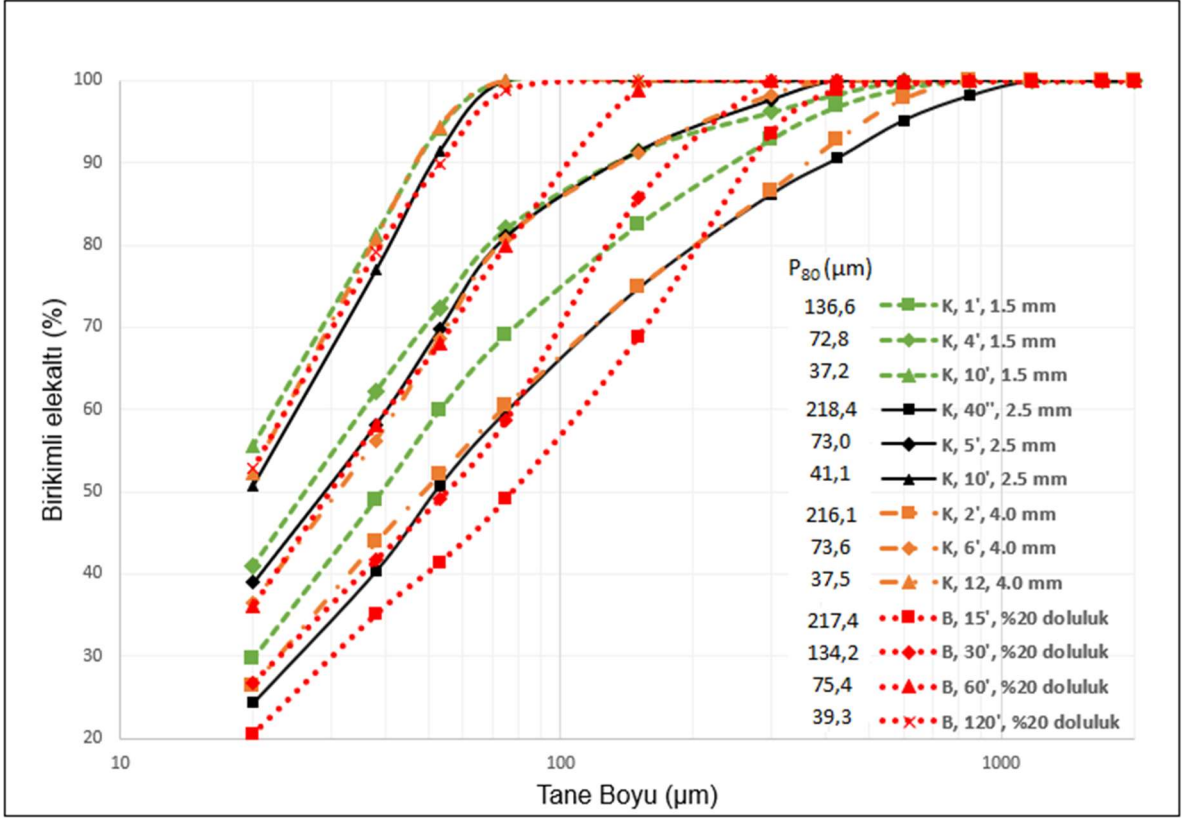
Karıştırmalı bilyalı ve bond bilyalı değirmenin öğütme performanslarını karşılaştırmak için gerçekleştirilen kalsit, manyetit, klinker öğütmeleri ve ürün incelikleri sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de (Gösterge; **K**arıştırmalı değirmen-**B**ond Bilyalı değirmen, öğütme süresi, Karıştırmalı değirmen için bilya boyu-Bilyalı değirmen için doluluk oranı) verilmektedir. Bilyalı değirmende gerçekleştirilen 15, 30, 60 ve 120 dakikalık öğütmelere ait ürün inceliklerine en yakın karıştırmalı değirmen ürün inceliklerinin belirlenmesi yoluyla elde edilen sonuçlara bakıldığında; karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde farklı işletim parametreleri kullanılarak benzer ürün inceliğine sahip olunabileceği görülebilmektedir. Fakat bu durumda sadece P_{80} değeri üzerinden değerlendirmede bulunmak hataya sebep olacaktır. Örneğin karıştırmalı değirmende kalsitin, 1,5 mm bilya ile 30 saniye, 2,5 mm bilya ile 2 dakika, bilyalı değirmende ise %20 doluluk ile 15 dakika sürdürülen öğütmelerde benzer P_{80} değerleri, fakat farklı P_{90} ve P_{50} değerleri elde edilmiş, bu da ürünlerin fraksiyonel bazda yoğun farklılıklara sahip olduğunu göstermiştir. Tüm ilk öğütme sürelerinden gözlemlenen bu durum son öğütme sürelerinde farklı bir hal almıştır.



Şekil 4.9. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki kalsit öğütmeleri

Şekil 4.9'da sırasıyla; bond bilyalı değirmende %20 dolulukta 15 dakika, karıştırmalı değirmende ise 1,5mm bilya ile 30 saniye ve 2,5 mm bilya ile 2 dakika öğütmelerinde ortalama 116 µm, bond bilyalı değirmende %20 dolulukta 60 dakika, karıştırmalı değirmende ise 1,5mm bilya ile 5 dakika ve 4,0 mm bilya ile 10 dakika öğütmelerinde ortalama 35 µm, bond bilyalı değirmende %20 dolulukta 120 dakika, karıştırmalı değirmende ise 1,5mm bilya ve 2,5 mm bilya ile 10 dakika öğütmelerinde ortalama 26 µm ürün elde edilen boyut dağılımları üzerinde yoğunlaşmıştır. P₈₀ değerleri ortalama 116 µm olan ürünlerin dağılımları incelendiğinde, Bond değirmeninden alınan ürünün daha dik dağılıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Karıştırmalı değirmende çarpışma olasılığının ve çarpışma sayısının bilyalı değirmen teknolojisine oranla daha fazla olması ince üretim hızı üzerinden olumlu etki yapmakta ve bunun sonucu olarak da daha yatık bir dağılım elde edilmektedir.

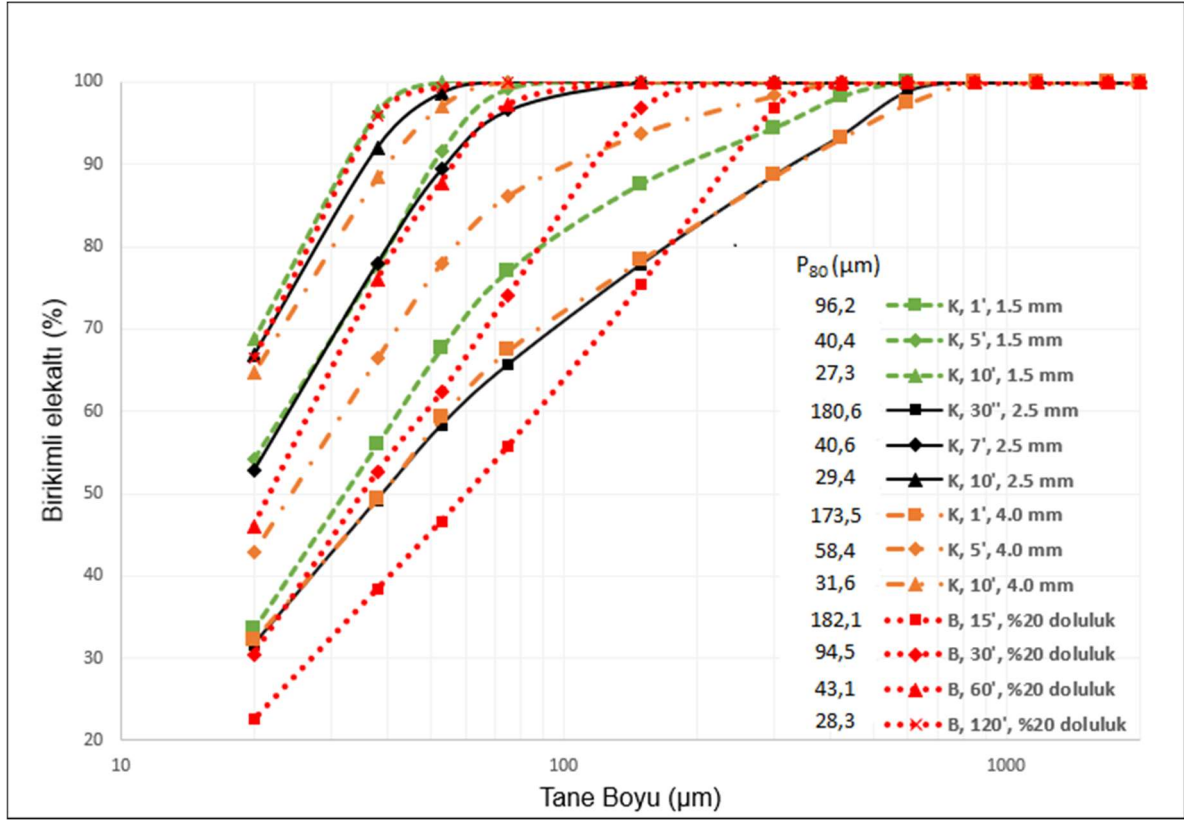
Bilyalı değirmen teknolojisinin daha çok darbe mekanizması ile öğütme işlemini gerçekleştirmesi sebebiyle, iri taneler üzerinde daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Bilyalı değirmende yapılan işlemde bahsi geçen boyut aralığı için karıştırmalı değirmen teknolojisine göre daha ince dağılım elde edilmiştir. Darbe mekanizması, yakaladığı taneler üzerinde daha etkin işleme sahip iken alt boylarda bu davranım değişmektedir. Öte yandan P₈₀ değerleri ortalama 35 µm ve 26 µm olan kalsitin tane boyu dağılımlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Özellikle öğütülen kalsitin en üst boyu küçüldükçe, karıştırmalı ve bilyalı değirmen ile elde edilen tane boyu dağılımlarının eğimlerdeki farklılaşmanın da azaldığı anlaşılmaktadır. İri boylarda ürün elde edildiğinde, karıştırmalı değirmene kıyasla daha dik dağılımın elde edildiği bilyalı değirmende, ürün boyunun incilmesi ile karıştırmalı değirmenin dağılımı ile hemen hemen paralel ve hatta çok daha ince boylarda (P₈₀ = 26 µm) daha yatık bir dağılım elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.10 Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki manyetit öğütmeleri

Şekil 4.10'da sırasıyla; birinci, ikinci ve üçüncü eşit ürün boyutuna ortalama 217, 74 ve 39 µm'da ulaşılmıştır. P₈₀ değerleri ortalama 217 µm olan dağılımlar incelendiğinde, manyetitin Bond değirmeninde öğütülmesi sonucunda, karıştırmalı değirmende öğütülen manyetite kıyasla daha dik tane boyu dağılımının elde edildiği görülmektedir. Yine aynı boy için, karıştırmalı değirmende elde edilen sonuçların birbirine yakın oldukları saptanmıştır. P₈₀ değerleri ortalama 74 µm olan dağılımlar incelendiğinde, bilyalı değirmende öğütülen manyetitin dağılımı içinde 300 µm'den daha büyük tanenin bulunmadığı tespit edilmiştir. Karıştırmalı değirmende ise gerçekleştirilen öğütme işlemleri sonucunda 300 µm'den daha iri olan manyetit tanelerinin hepsini öğütmek mümkün olmamıştır. Bu sonuçlar göstermektedir ki, bilyalı değirmende iri manyetit tanelerini öğütmek daha kolayken, ince manyetit tanelerini öğütmek daha zordur. Karıştırmalı değirmende ise iri manyetit tanelerini öğütmek daha zor iken, ince manyetit tanelerini öğütmek bilyalı değirmene kıyasla daha kolaydır. P₈₀ değerleri ortalama 39 µm olan dağılımlar incelendiğinde ise, bilyalı ve karıştırmalı değirmende elde edilen tane boyu dağılımlarının birbirine oldukça yakın olduğu ve eğimlerinin de neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Bu da göstermektedir ki, üretilen manyetitin boyut dağılımı incelendikçe, bilyalı ve

karıştırılmalı değirmenin ürünleri arasındaki farklılıklar azalmakta ve tane boyu dağılımları birbirine benzemektedir.

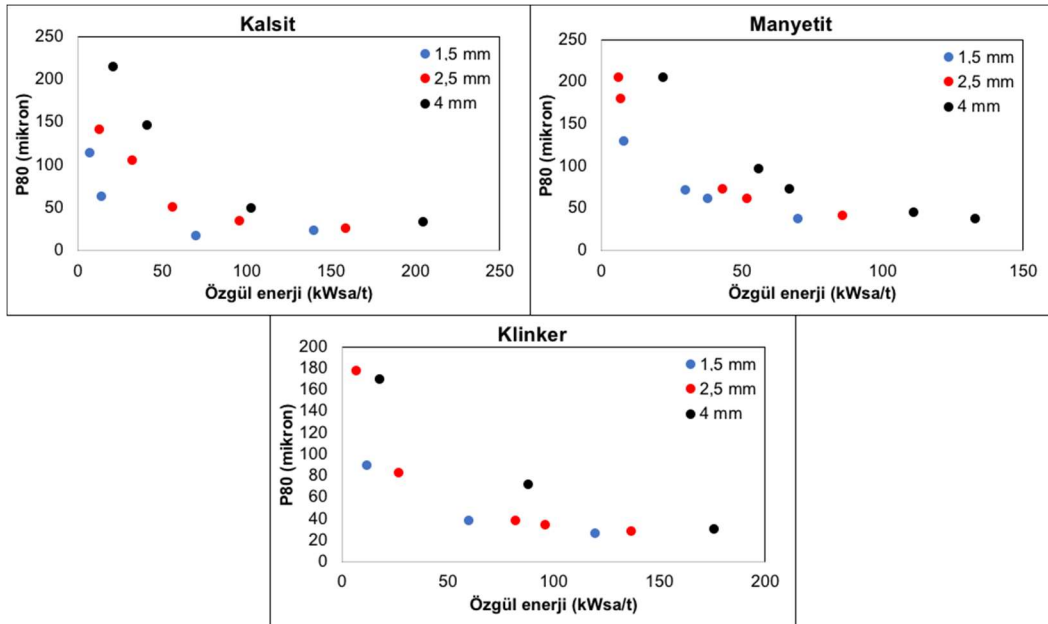


Şekil 4.11. Karıştırılmalı ve bilyalı değirmendeki klinker öğütmeleri

Şekil 4.11'de ortalama 179, 41, 28 µm ürün elde edilen boyut dağılımları üzerinde yoğunlaşmıştır. P₈₀ değerleri ortalama 179 µm olan dağılımlar incelendiğinde kalsit ve manyetit malzemelerinin davranımına benzer şekilde, Bond değirmeninde yapılan öğütme işlemi neticesinde daha dik bir dağılımın elde edildiği tespit edilmiştir. Bu davranım, iri boylarda bilyalı değirmenin yarattığı etkinin karıştırılmalı değirmene kıyasla daha belirgin olmasından kaynaklanmaktadır. P₈₀ değerleri ortalama 41 µm olan dağılımlar incelendiğinde, bilyalı değirmende öğütülen klinker dağılımı içinde 300 µm'den daha büyük tanenin bulunmadığı, -300+150 µm fraksiyonunda ise karıştırılmalı değirmende elde edilenden daha az miktarda klinker bulunduğu görülmektedir. Karıştırılmalı değirmende özellikle ince bilya boylarında (1,5 ve 2,5 mm) 300 µm'den daha iri olan klinker tanelerinin hepsini öğütmenin mümkün olmadığı anlaşılmaktadır. Daha ince boyda ise (-150 µm) bilyalı değirmenin performansının karıştırılmalı değirmenin performansından daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim 20 µm'den daha ince klinkerin üretilmesi, karıştırılmalı değirmende 1,5 mm'lik bilyaların kullanıldığı koşulda gerçekleşmiştir.

Bu sonuçlar da iri klinker tanelerinin bilyalı değirmen ile, ince klinker tanelerinin ise karıştırmalı değirmen ile öğütülmesinin daha verimli olacağı görüşünü desteklemektedir. P₈₀ değerleri ortalama 28 µm olan dağılımlar incelendiğinde ise, bilyalı değirmen dağılımının karıştırmalı değirmene kıyasla daha dik olduğu anlaşılmaktadır. Değirmen teknolojisindeki farklılık, ince tane üretimi üzerinde etkili olmuş ve çarpışma olasılığının daha yüksek olduğu karıştırmalı değirmende daha ince ürün boyu elde edildiğini gösteren yatık bir dağılımın edildiği anlaşılmıştır.

Kalsit, manyetit ve klinker fark etmeksizin tüm malzemelerin, karıştırmalı değirmendeki 10 dakikalık öğütmeleri ile bilyalı değirmende gerçekleştirilen 120 dakikalık öğütmelerinde benzer P₈₀ değerleri elde edilmiş olmasının yanı sıra yine benzer P₉₀ ve P₅₀ değerleri elde edilerek, her iki değirmene ait ürünlerin sadece benzer ürün inceliklerine değil, aynı zamanda da benzer tane boyu dağılımlarına sahip oldukları gözlemlenmiştir. Öte yandan değirmenlerde aynı ürün özelliklerine ulaşmak için gerekli olan öğütme süreleri göz önüne alındığında, bilyalı değirmende karıştırmalı değirmene kıyasla daha yoğun bir özgül enerji tüketimi söz konusu söylenebilir. Buna ek olarak, karıştırmalı değirmende her bir malzeme için gerçekleştirilen öğütme işlemlerinin enerji ve tane boyu ilişkilerinin verildiği Şekil 4.12'den hareketle; her bir malzeme ve bilya boyu için birim enerji tüketimi arttıkça ürünün incelendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca daha ince bilya kullanımının aynı incelik değerinde hem enerji tüketimini azalttığı hem de ürünü incelttiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. Karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütmelerin ürün boyuna bağlı özgül enerji değerleri.

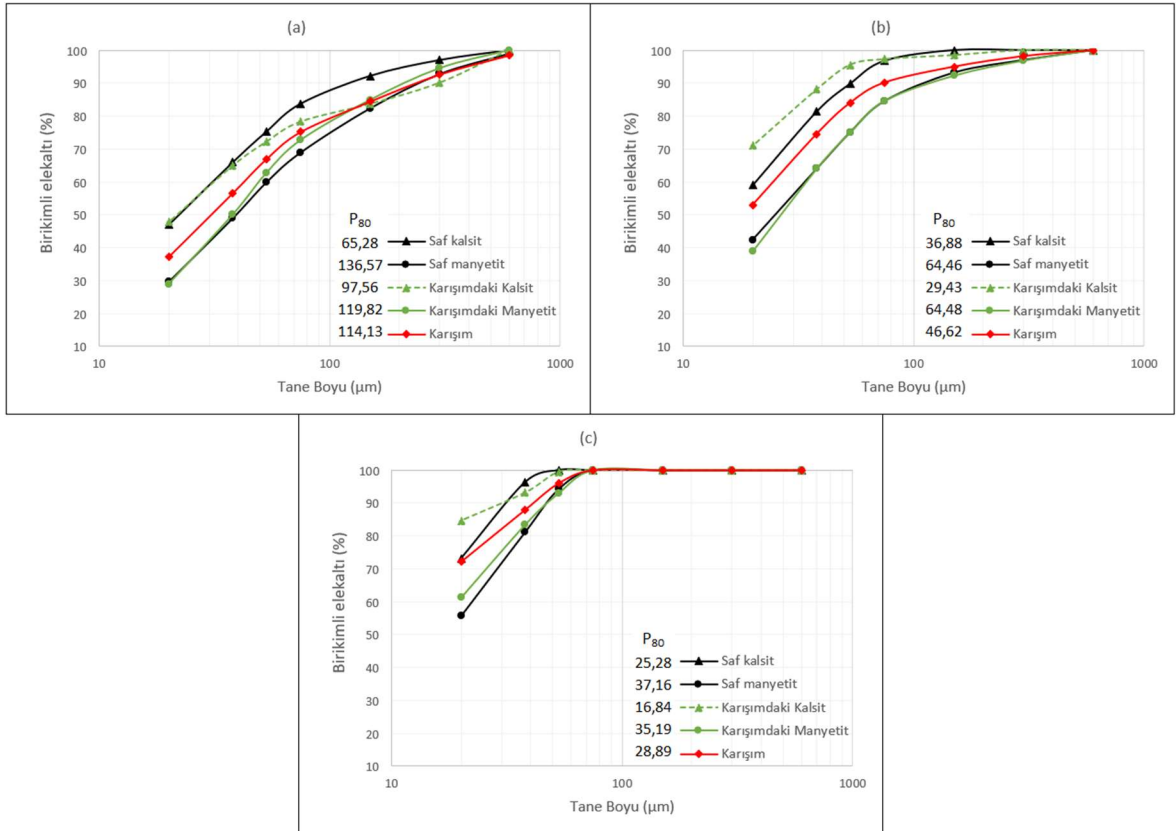
4.2. Karışımlar ile Yapılan Öğütme Çalışmaları

Bu başlık altında, her iki değirmende de gerçekleştirilmiş olan kalsit-manyetit ve kalsit-klinker öğütmelerinin sonuçları verilmiş, karışımları oluşturan malzemelerin; ürün içerisindeki fraksiyonel dağılımları ve birbiri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

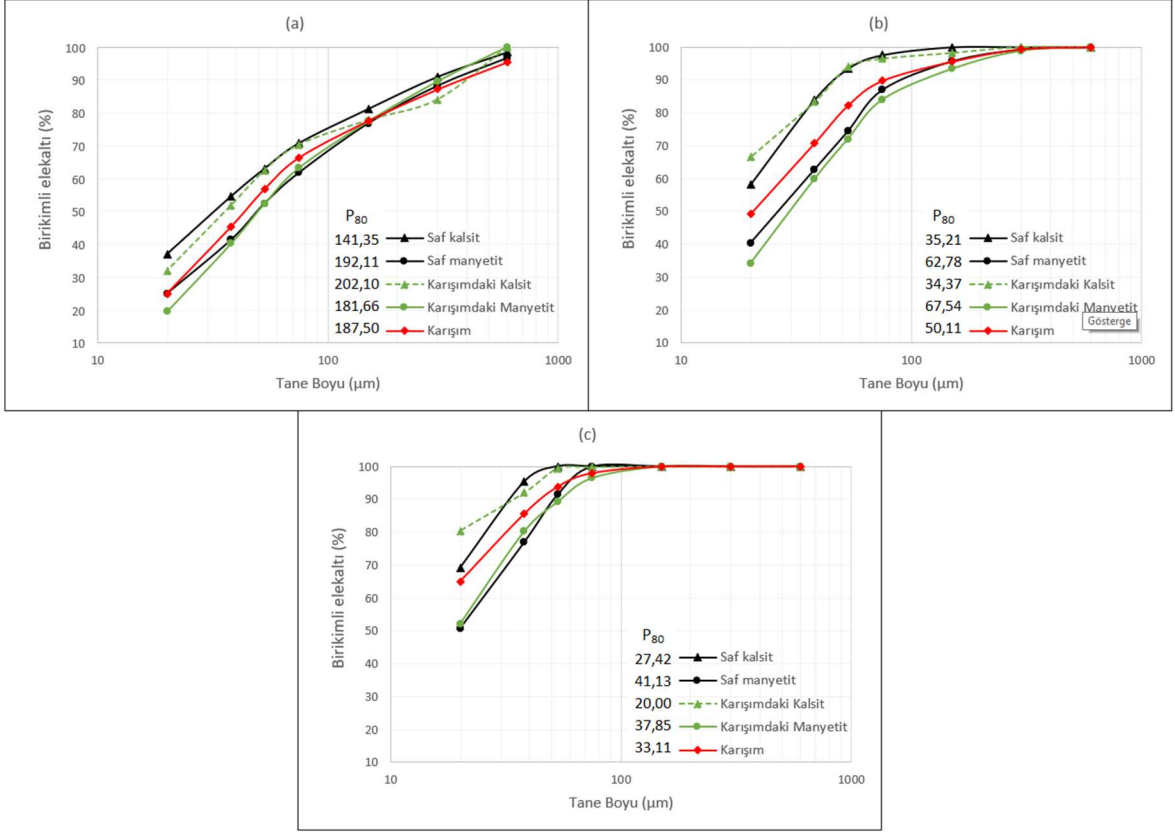
4.2.1. Karıştırmalı Değirmen Testleri

4.2.1.1. Kalsit-Manyetit Karışımı

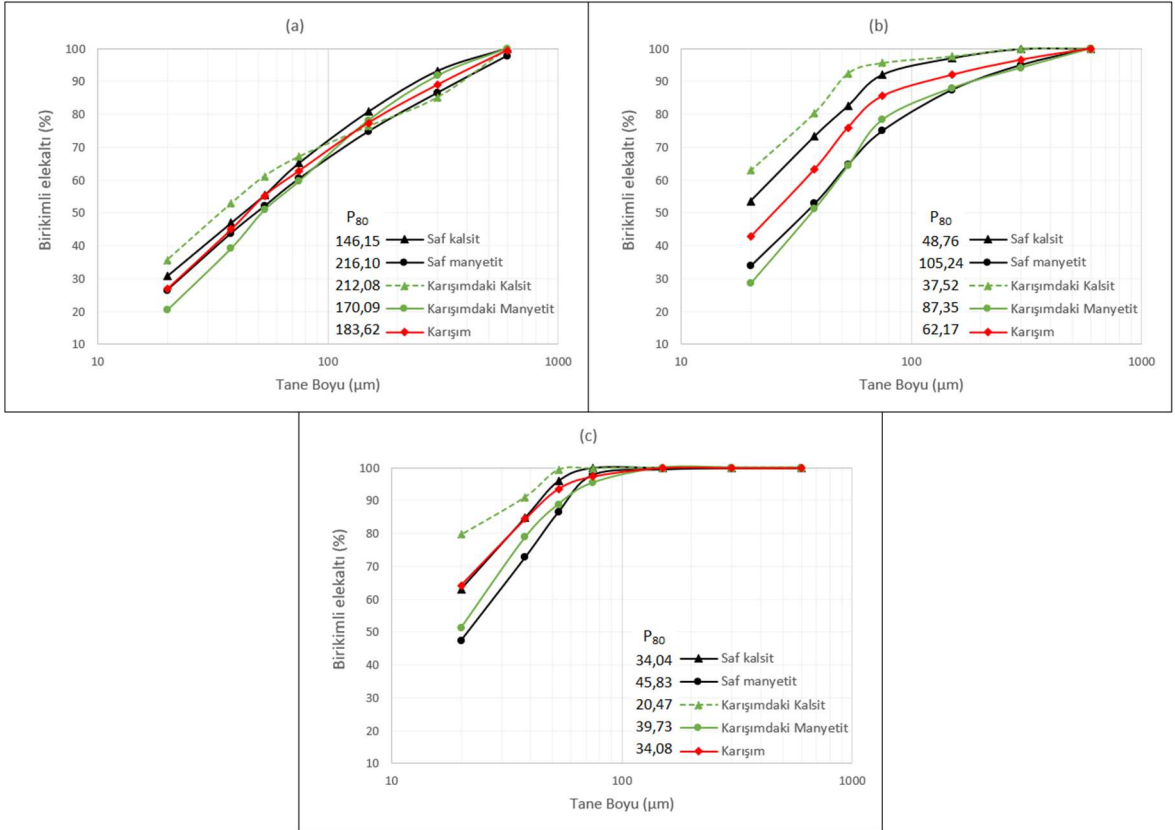
Karıştırmalı değirmende 1,5, 2,5 ve 4,0 mm olmak üzere değişken bilya boyuna bağlı gerçekleştirilen, ağırlıkça %50 kalsit ve %50 manyetit ile oluşturulan karışımlara ait öğütme sonuçları sırasıyla Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te yer almaktadır.



Şekil 4.13. Karıştırmalı bilyalı değirmende 1,5 mm bilya ile gerçekleştirilen kalsit-manyetit öğütmeleri; (a) 1 dakika, (b) 5 dakika ve (c) 10 dakika



Şekil 4.14. Karıştırmalı bilyalı değirmende 2,5 mm bilya ile gerçekleştirilen kalsit-manyetit öğütmeleri; (a) 50 saniye, (b) 6 dakika ve (c) 10 dakika



Şekil 4.15. Karıştırmalı bilyalı değirmende 4,0 mm bilya ile gerçekleştirilen kalsit-manyetit öğütmeleri; (a) 2 dakika, (b) 5 dakika ve (c) 10 dakika

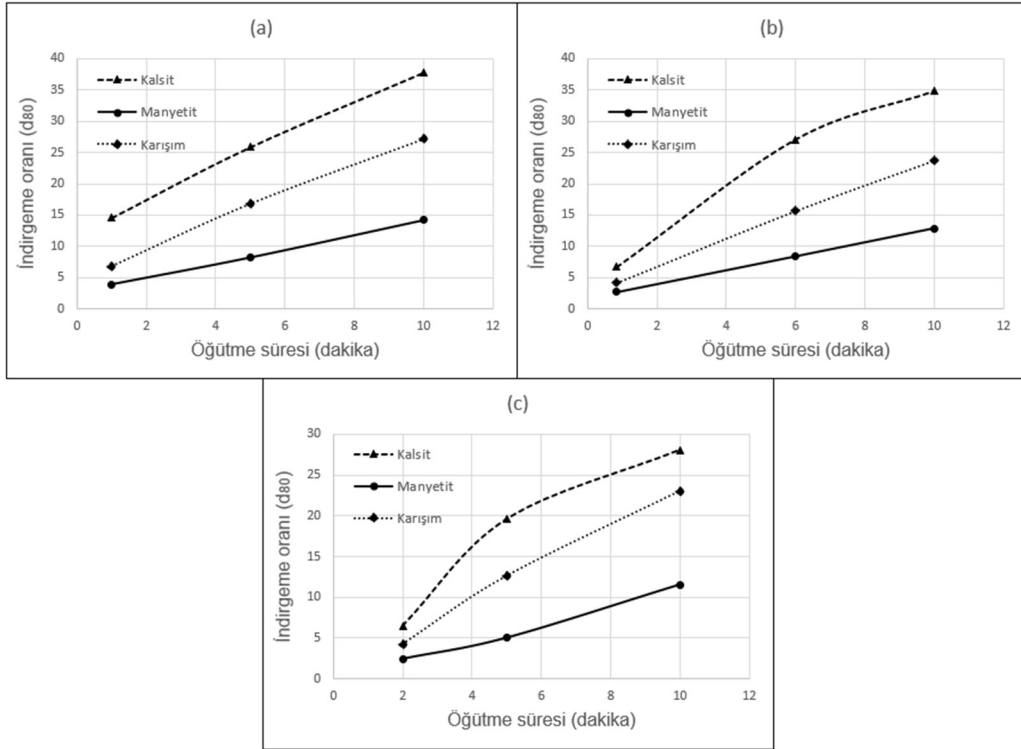
Kalsit ile manyetit karışımına ait tüm boyut dağılımları, beklenildiği gibi bileşenlerin tek başına öğütmelerine ait eğilimler arasında yer almaktadır. Karışımlara ait eğilimlere bakıldığında; her bilya boyu için eşit olan 10 dakikalık öğütmelerde, tekli öğütmelerde de gözlemlendiği üzere bilya çapı azaldıkça ürün incelmektedir.

Değişken bilya koşullarında; tekli kalsit, manyetit ve bunların karışım öğütmelerinde benzer öğünme eğilimleri gözlenmektedir. Fakat karışımlar içerisindeki kalsite ve manyetite ait fraksiyonel dağılımları birbirinden farklılaşmaktadır. Kalsit ve manyetit içerisindeki kalsit davranımı incelendiğinde manyetit içerisindeki kalsitin yüksek enerji seviyelerine doğru daha yatık bir dağılıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum sert bileşen etkisi ile açıklanabilir. Yapılan çalışmalarda Mohs ölçeğine göre daha sert bileşenin daha aşındırıcı özellik gösterdiğini gözlemlenmiştir [99,100]. Denemelerde sertlik değeri sırasıyla 6 ve 5,5 olan yüksek fırın cürufu klinkere göre daha yüksek bir aşındırmaya sebep oluşturmuştur [99]. Aynı durum kuvars (7), klinker (5,5), manyetit (5) ve kalsit (3) üzerinde yapılan çalışmada da kendini göstermiştir [100]. Buna bağlı olarak yüksek sertliğe sahip mineral parçacıklarının bilya yüzeylerini temizleyerek daha verimli bir çarpışma ortamı sağlamasıyla yumuşak mineralin daha iyi öğütülmesine katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu nedenle de sert bileşenin kalsit öğütme hızını yüksek enerji seviyelerinde dahi arttırıyor oluşu bunun sonucu olarak gösterilebilir.

Kalsit ile yapılan öğütme işleminde manyetitin öğünme hızındaki düşüşün nedeninin kalsit tanelerinin manyetit tanelerine ve bilyalara sıvanması olduğu düşünülmektedir. Karışım içerisinde daha zor öğünen malzeme olan manyetit için tek başına öğütme işlemine nazaran daha dik bir dağılım elde edildiği gözlemlenmektedir. Karışım içerisindeki ince üretiminin daha düşük olması neticesinde bu sonucun elde edildiği düşünülmektedir. Özellikle -50 μm mertebesinde bu farklılığın çıkması, belirtilen hipotezi desteklemektedir (Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15).

Son iki öğütme sürelerine bakıldığında keskin bir şekilde iri fraksiyonda manyetitin, ince fraksiyonda ise kalsitin yoğunlukta olduğu çıkarımı yapılabiliyorken, ilk öğütme sürelerinde yaklaşık 160 μm tane boyuna kadar kalsit iri, manyetit ise ince boyda kendini göstermiştir. Bu durumun malzemeler arası öğünme davranışları arasındaki farklılıktan çok, kalsit beslemesinin manyetite göre daha iri olmasının (Şekil 3.1; manyetit beslemesinin %60'ı, kalsit beslemesinin %25'i 160 μm) bir sonucu olduğu

öngörülmektedir. Çünkü 160 µm tane boyundan daha küçük fraksiyonlarda karışımdaki kalsit dağılımı, ince boylarda tekli kalsit öğütmesinde olduğundan daha ince veya benzerdir. Böylece besleme içerisindeki ince boy manyetit ve öğütülmesi için yeterli süreyi bulamamış iri boy kalsit birleşimi bu tür bir görüntüye sebep olmuştur. Karışım içerisindeki kalsit ve manyetit oranının, son iki öğütme süresindeki tane boyuna bağlı belirgin ayrımı ve kalsitin manyetite oranla daha yüksek bir kırılabilirliğe sahip olması ile açıklanabilir (Şekil 4.16). Bunlara ek olarak, ikinci ve üçüncü öğütme sürelerindeki, tekli kalsit ve karışım içerisindeki kalsite ait ürün incelik değerleri incelendiğinde, karışımdaki kalsit inceliğinin tekli kalsit öğütmesindeki inceliğe kıyasla daha ince olduğu, bu nedenle de kalsit ve kalsite kıyasla daha düşük öğütülebilirliğe ve daha yüksek sertliğe sahip olan manyetit karışımında seçici bir öğütmenin gerçekleşmiş olduğu görülmektedir.

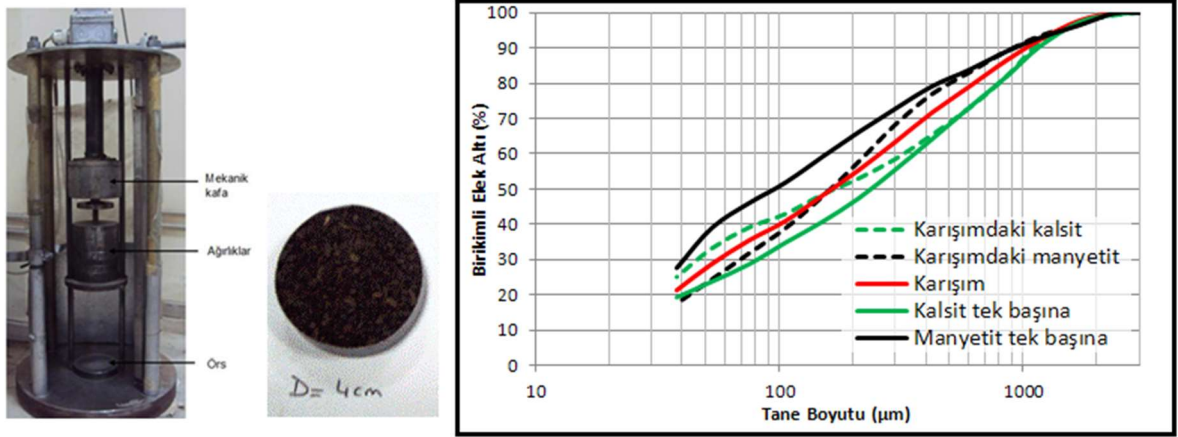


Şekil 4.16. Karıştırmalı değirmenin kalsit-manyetit öğütmesinde indirgeme oranları; (a) 1,5 mm bilya, (b) 2,5 mm bilya, (c) 4,0 mm bilya

Şekil 4.16 incelendiğinde her bir koşul için, bilya çapının küçülmesine bağlı olarak indirgeme oranının arttığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda en yüksek indirgeme oranı 1,5mm'lik bilya kullanımında sağlanmıştır. Kalsitin tek başına ve karışımlar içinde karıştırmalı değirmen ile öğütüldüğünde elde edilen indirgeme oranları incelendiğinde ise, benzer koşullarda en yüksek indirgeme oranlarına manyetit ile karıştırılarak öğütüldüğünde ulaşıldığı anlaşılmıştır. Özellikle değirmende 1,5 ve 2,5

mm'lik bilyalar kullanılarak, eşit birim enerji tüketiminde gerçekleştirilen öğütme işlemleri kıyaslandığında, tek başına öğütülen kalsitin indirgeme oranının, karışım içinde öğütülenlerinkine göre ince olduğu görülmektedir. Bunun nedeni daha önce açıklandığı üzere; daha sert olan bileşenin öğütme yardımcısı gibi davranarak bilya yüzeyindeki sıvanmaları engelleyip, daha verimli bir öğütme koşulu sağlamasıdır.

Karıştırmalı değirmende gerçekleştirilmiş kalsit-manyetit öğütmesine ait sonuçlar, malzemelerin değirmendeki kırılma mekanizmalarının benzerini gerçekleştiren ağırlık düşürme testi kullanılarak denetlenmiştir. Bu amaçla 4 cm çap ve 1 cm yüksekliğe sahip yataklara, karıştırmalı değirmene beslenen manyetit, kalsit malzemeleri ve kalsit-manyetit karışımı konularak 1,62 kWsa/t özgül ufalama enerjisi ile kırma işlemine tabi tutulmuştur. Ağırlık düşürme test düzeneği, hazırlanan malzeme yatağı ve elde edilen sonuçlara ait grafik Şekil 4.17'de verilmektedir.

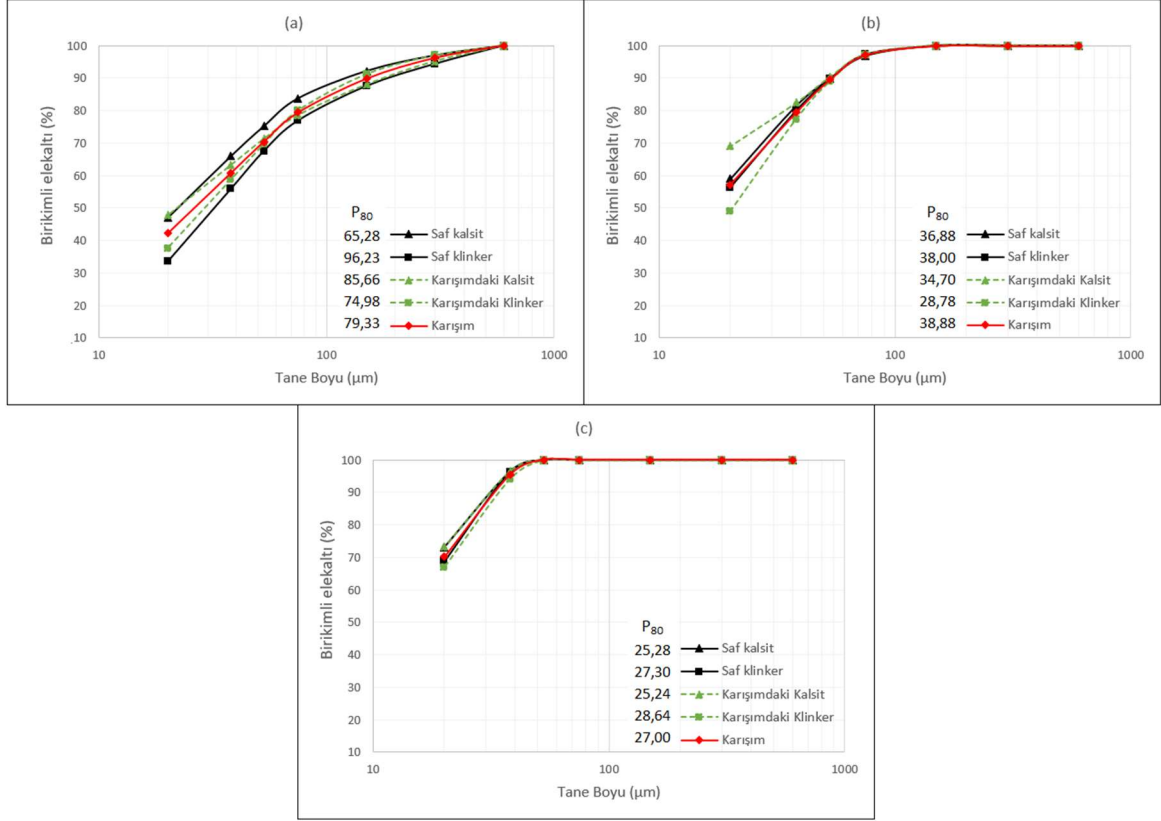


Şekil 4.17. Ağırlık düşürme test düzeneği, hazırlanan malzeme yatağı ve test sonucunda elde edilmiş olan tane boyu dağılımları

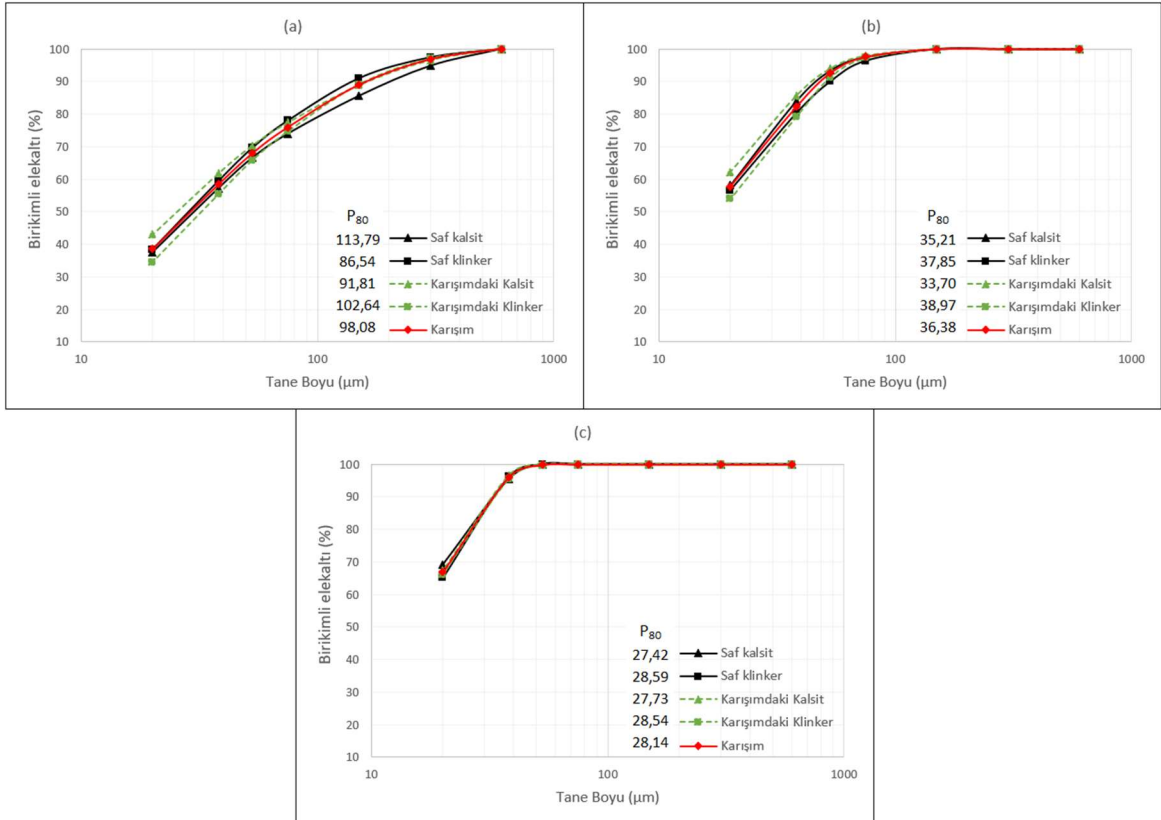
Test sonucu elde edilen veriler incelendiğinde karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütme sonuçlarına benzer şekilde, tek başına kırma işlemine tabi tutulan kalsit karışım içinde kırılan kalsitten daha iriyken, tek başına kırılan manyetitin ise karışım içinde kırılan manyetitten daha ince olduğu görülmüştür. Böylece karışım içindeki bileşenlerin yatak içinde kırılması ve öğütülmesi sırasında ufalanma davranımlarının birbirine benzer olduğu anlaşılmaktadır.

4.2.1.2. Kalsit-Klinker Karışımı

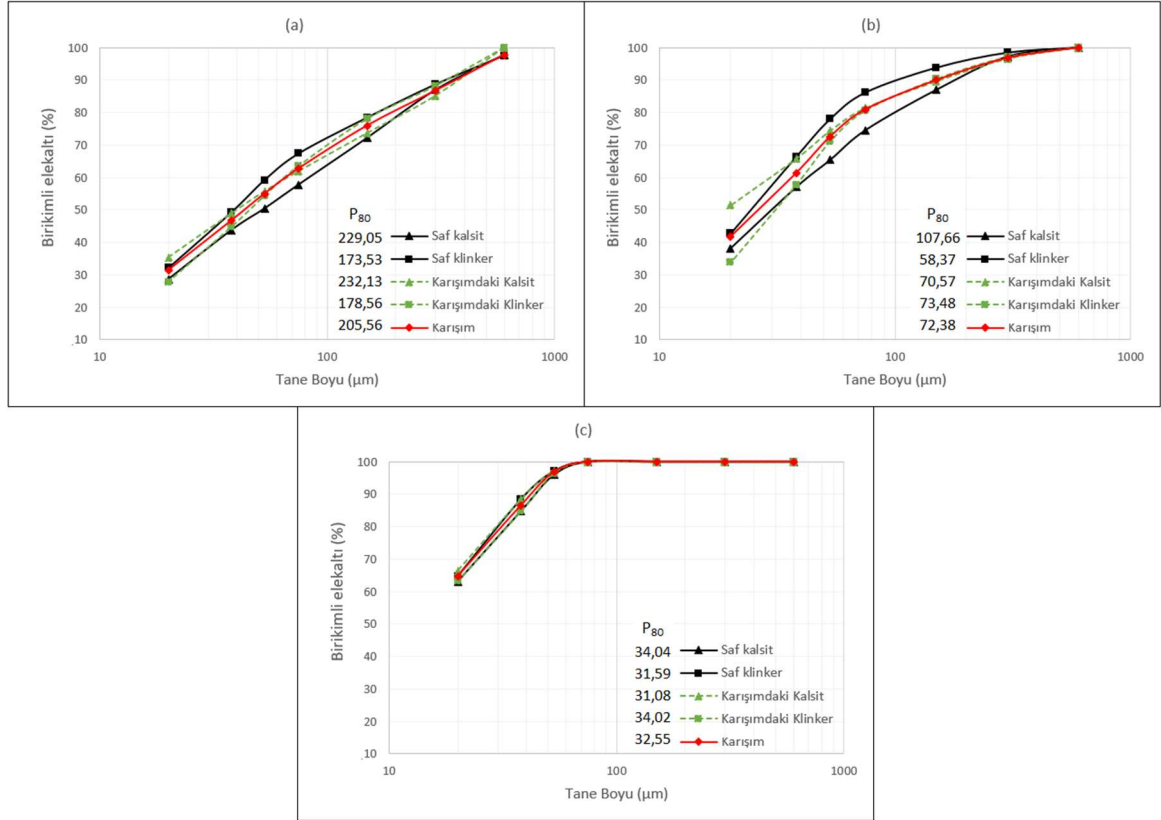
Karıştırmalı değirmende 1,5 mm, 2,5 mm ve 4,0 mm olmak üzere değişken bilya boyuna bağlı gerçekleştirilen, ağırlıkça %50 kalsit ve %50 klinker ile oluşturulan karışımlara ait öğütme sonuçları sırasıyla Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de yer almaktadır.



Şekil 4.18. Karıştırmalı değirmende 1,5 mm bilya ile kalsit-klinker öğütmeleri; (a) 1 dakika, (b) 5 dakika ve (c) 10 dakika



Şekil 4.19. Karıştırmalı değirmende 2,5 mm bilya ile kalsit-klinker öğütmeleri; (a) 2,5 dakika, (b) 6 dakika ve (c) 10 dakika



Şekil 4.20. Karıştırmalı değirmende 4,0 mm bilya ile kalsit-klinker öğütmeleri; (a) 1 dakika, (b) 5 dakika ve (c) 10 dakika

Karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen kalsit-klinker karışımına ait öğütmeler, tıpkı kalsit-manyetit öğütmelerindekine benzer bir öğütme kinetiği ortaya çıkararak, düşük öğütülebilirliğe sahip olan klinkerin, alt elek aralıklarında bulunan kalsite göre, iri elek aralıklarında yoğunlaştığı bir bileşen davranımı ortaya çıkartmıştır. Ayrıca kalsit-manyetit karışımındaki ilk öğütme sürelerinde yaklaşık 160 µm tane boyundan itibaren kalsit ve manyetit yoğunluklarının iri ve ince fraksiyonlardaki yerlerini değiştiren etki, kalsit-klinker karışımlarına ait ilk öğütme sürelerinde, kalsit ve klinker yoğunlukları üzerinde yaklaşık 70 µm tane boyundan itibaren kendini göstermiştir.

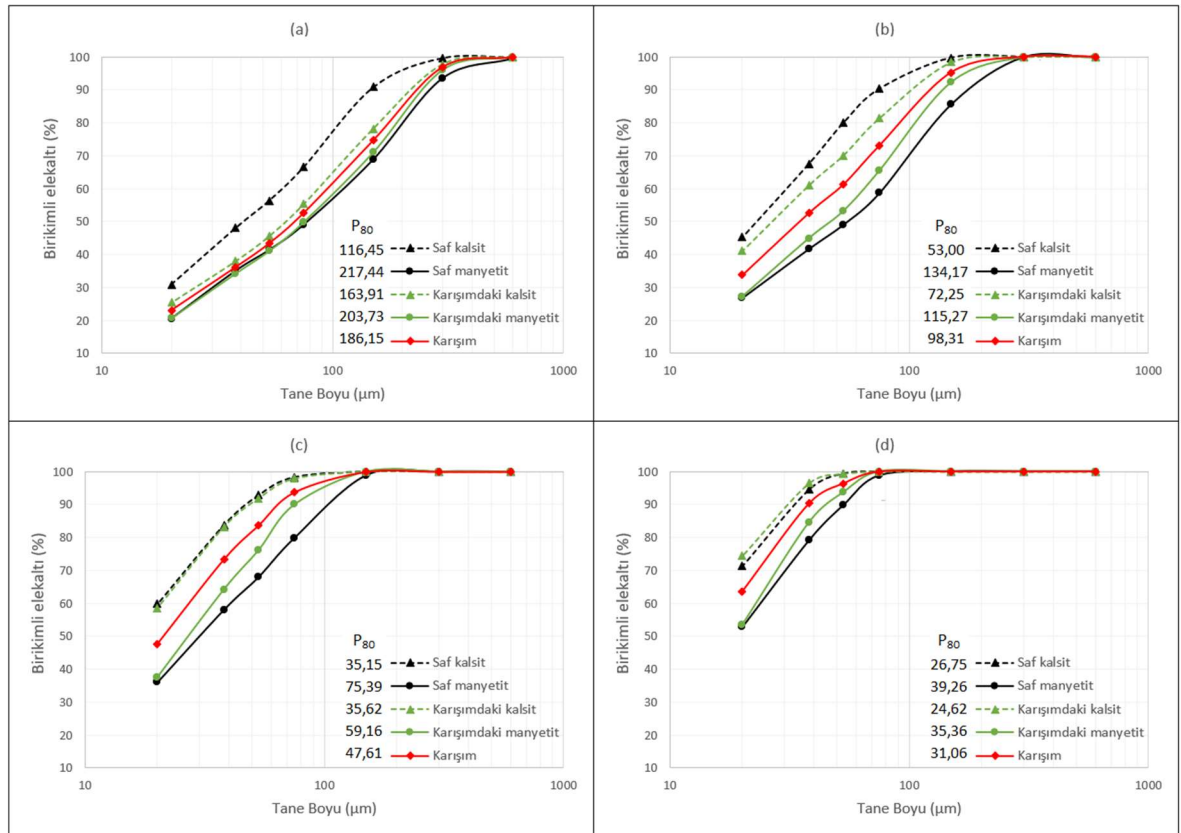
Klinker, kalsit ile karışımında kalsitin manyetit ile yaptığı karışımdakine benzer bir şekilde, karışım içerisindeki kalsit inceliğini tekli kalsit öğütmesi ürününe göre daha ince olmak üzere seçici bir öğütme gerçekleştirmiştir. Kalsit, manyetit ve klinker için sertlik değerleri Mohs ölçeğinde sırasıyla 3, 5 ve 5,5 değerini almaktadır [99,100]. Aynı zamanda klinker iş indeksi değeri 12-14 kWsa/t aralığında değişen ve kalsite oranla nispeten daha aşındırıcı bir malzemedir. Manyetit ile karışımında da geçerli olacak şekilde bileşenler arasındaki daha sert ve dolayısıyla daha aşındırıcı bir malzemenin varlığı bilyalardaki sıvanma olasılığını düşürmektedir. Buna bağlı

olarak öğünme hızlanmaktadır. Klinkerin tek başına kullanıldığı öğütme koşulunda, kalsit ile beraber yapılan öğütme işleminden daha fazla boyut indirgemesi sağlanması bu olguyla ilişkilendirilebilir. Öte yandan klinkerin sağladığı bu etki, manyetitin klinkere kıyasla daha düşük öğütülebilirliğe sahip olabileceği sebebiyle, kalsit ile karışımı içerisinde, manyetitin kalsit üzerinde oluşturduğu etkiden daha düşük kalmıştır. Bunu her iki karışımda da 10 dakika yapılmış öğütmelere ait ürün inceliklerine bakarak söylemek mümkündür. Öyle ki tekli kalsit öğütmelerine ait ürün incelikleri sırasıyla 1,5 mm-2,5 mm-4,0 mm bilya için 25,28-27,42-34,04 μm iken, karışımdaki kalsit incelikleri; kalsit-manyetit karışımında 16,84-20,00-20,47 μm , kalsit-klinker karışımında ise 25,24-27,73-31,08 μm sıralamasındadır.

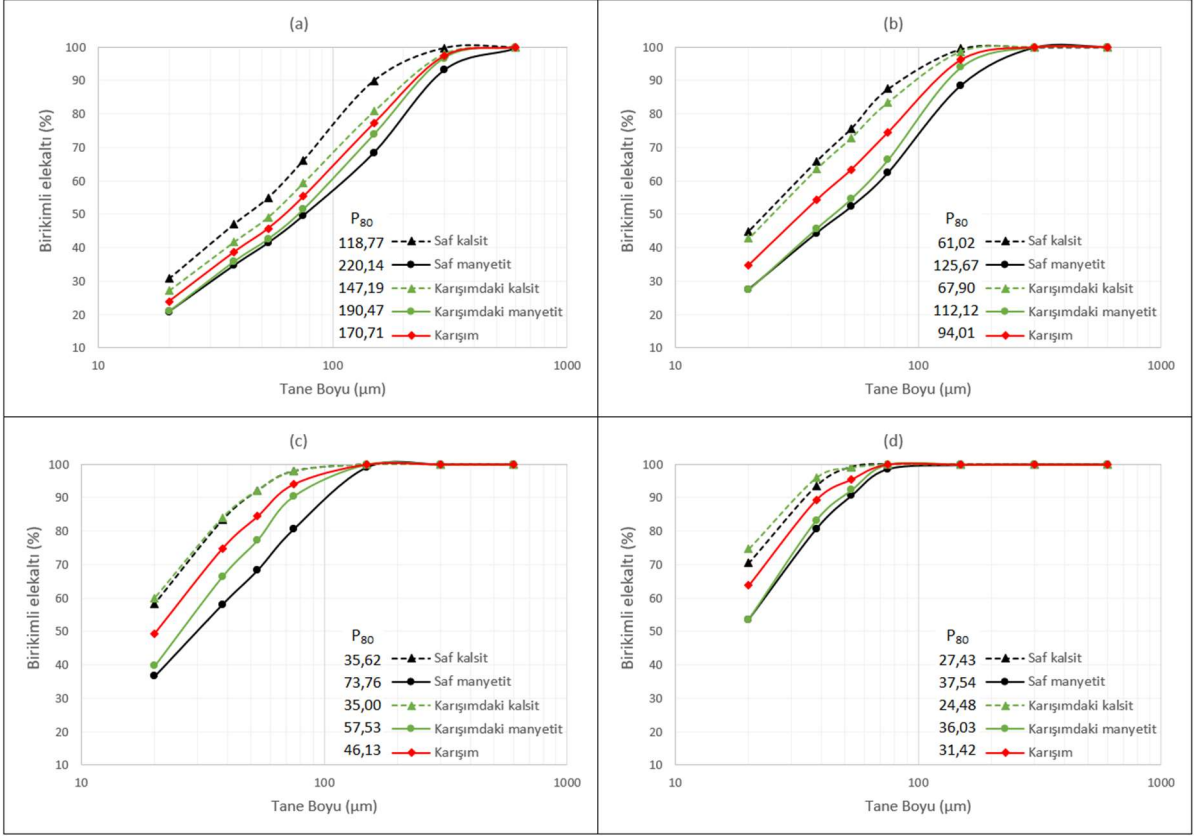
4.2.2. Bilyalı Değirmen Testleri

4.2.2.1. Kalsit-Manyetit Karışımı

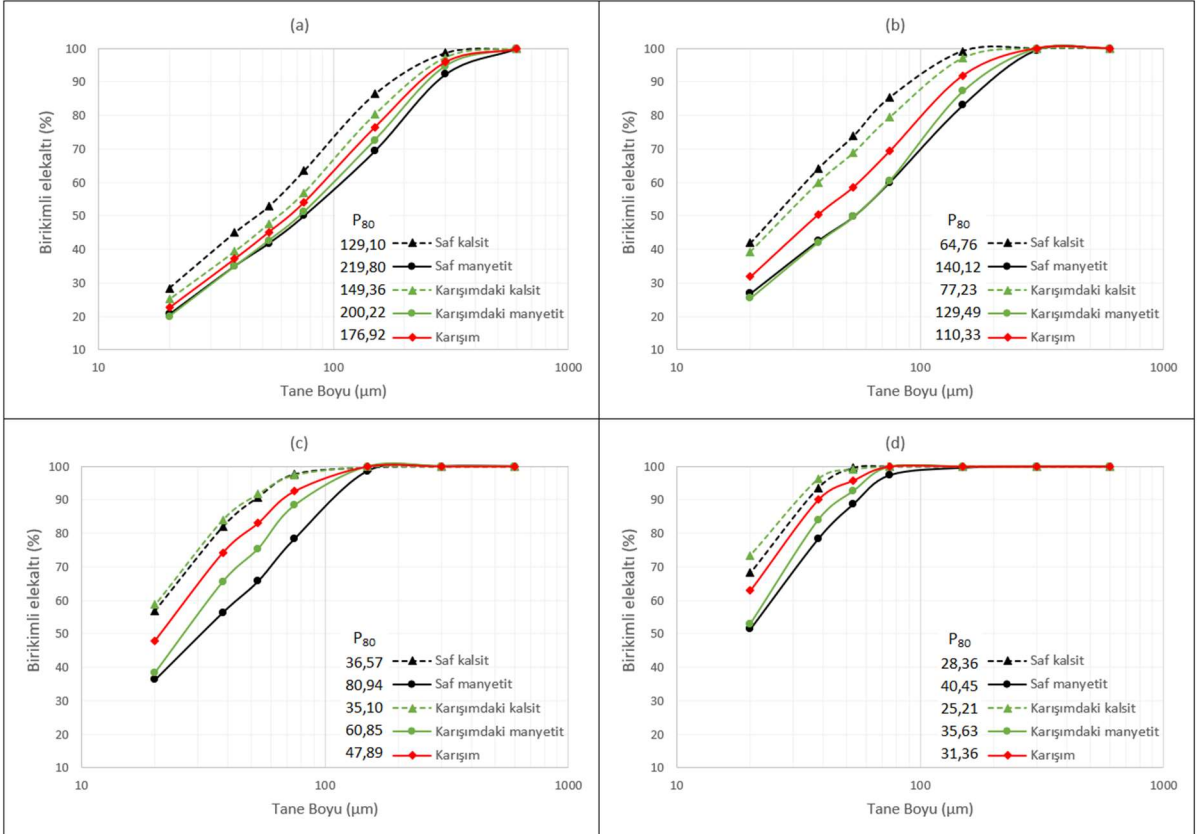
Bilyalı değirmende %20, %25 ve %30 olmak üzere değişken doluluk oranlarına bağlı gerçekleştirilen, ağırlıkça %50 kalsit ve %50 manyetit ile oluşturulan karışımlara ait öğütme sonuçları Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve şekil 4.23'te yer almaktadır.



Şekil 4.21. Bilyalı değirmende %20 dolulukta kalsit-manyetit öğütmeleri; (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 60 dakika, (d) 120 dakika



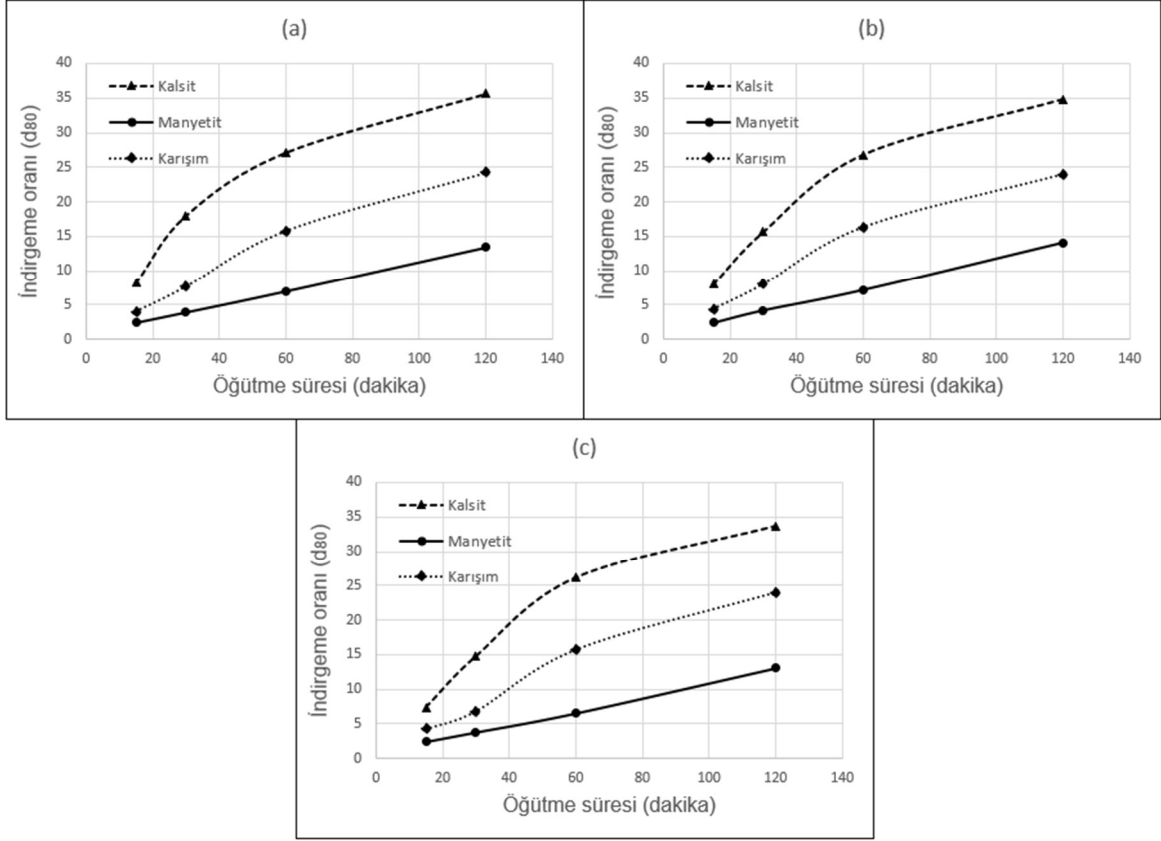
Şekil 4.22. Bilyalı değirmende %25 dolulukta kalsit-manyetit öğütmeleri; (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 60 dakika, (d) 120 dakika



Şekil 4.23. Bilyalı değirmende %30 dolulukta kalsit-manyetit öğütmeleri; (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 60 dakika, (d) 120 dakika

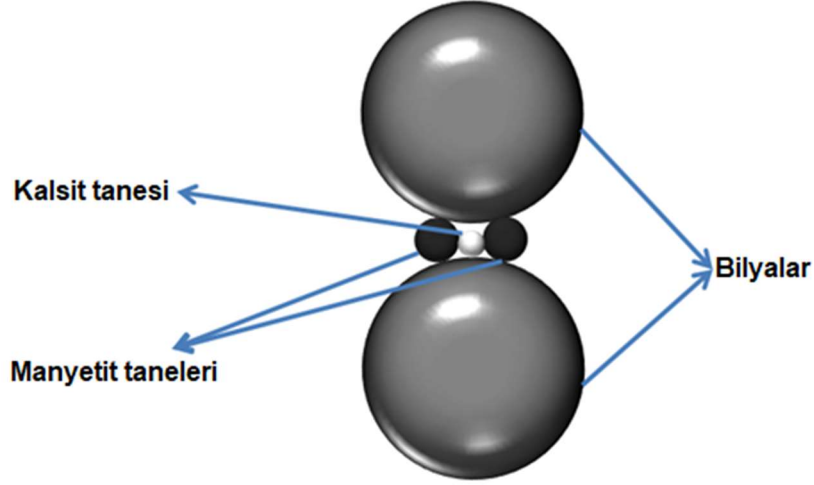
Bilyalı değirmende gerçekleştirilen kalsit-manyetit karışımına ait öğütmelerde ürün inceliğinin değirmen doluluk oranıyla doğrusal olmayan bir şekilde ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Öyle ki karışım öğütmelerinde en düşük ürün inceliği; 15 dakika, 30 dakika ve 60 dakikalık öğütme sürelerinde %25 doluluk ile alınabilmişken, bunu sırasıyla %20 doluluk ve %30 doluluk takip etmekte, 120 dakikalık öğütmelerde ise tüm doluluklarda benzer ürün incelikleri elde edilmektedir. Karışım öğütmelerinde gözlemlenen bu durum hem karışım içerisindeki klinker hem de karışım içerisinde manyetit incelikleri üzerinde de aynı şekilde gözlemlenebilmektedir. Hem kalsitin hem de manyetitin tek başına öğütüldüğü koşullarda olduğu gibi, değirmen doluluk oranının kalsit-manyetit karışımının ürün tane boyuna etkisinin en belirgin olarak gözlemlendiği öğütme süresi 30 dakikadır. Kalsit-manyetit karışımının 30 dakika öğütülmesi sonucunda bilya doluluğunun ürün tane boyu dağılımına etkisi, manyetit tek başına öğütüldüğü koşulunkine benzemektedir.

Karışım içerisindeki kalsit ve manyetit inceliklerine bakıldığında tüm doluluk değerlerinde ve öğütme sürelerinde, karışım içerisindeki kalsit ince boyda, karışım içerisindeki manyetit ise iri boyda yoğunluk göstermektedir. Öte yandan tüm doluluk değerlerinde; karışımdaki kalsit inceliği, tekli kalsit öğütmesinde elde edilen incelik değerine kıyasla, 15 dakika ve 30 dakika öğütme sürelerinde daha yüksek, 60 dakika ve 120 dakika öğütme sürelerinde benzer değerler almış, karışımdaki manyetit ise, tekli manyetit öğütmesine kıyasla, tüm öğütme sürelerinde daha inceye öğünmüştür. Bunu Şekil 4.24'te verilen indirgeme oranları üzerinden görmek de mümkündür. Öyle ki değirmen doluluğu fark etmeksizin sırasıyla 15-30-60-120 dakika öğütmelerde 3-4-6-14 değerlerinde sabit kalan manyetit indirgeme oranları, değirmen doluluğunun artışı ile 15 dakika öğütmelerinde 9-8-7, 30 dakikalık öğütmelerde 18-16-14, 60 dakika öğütmelerde 27-26-25,5, 120 dakika öğütmelerde 36-35-34 şeklinde değişmiştir.



Şekil 4.24. Bilyalı değirmenin kalsit-manyetit öğütmesindeki indirgeme oranları; (a) %20 doluluk, (b) %25 doluluk, (c) %30 doluluk

Karışım içerisindeki manyetitin özellikle ilk 15 ve 30 dakika öğütmelerindeki tane boyu dağılımının kalsite nazaran daha ince olmasına rağmen, öğütme sonunda iri fraksiyonda kalan manyetit oranının kalsitten daha fazla olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, anlık olarak değirmen içindeki iri boydaki manyetit tanelerinin sayısının o boydaki kalsit tanelerinin sayısından daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.25'te gösterildiği üzere; değirmen içinde bilyaların ince tanelere göre iri tanelerle çarpışma olasılığının daha fazla olacağı düşünüldüğünde, seçimli olarak değirmen içinde iri boylarda daha fazla miktarda bulunan manyetit tanelerinin kırıldığı öngörülmektedir.

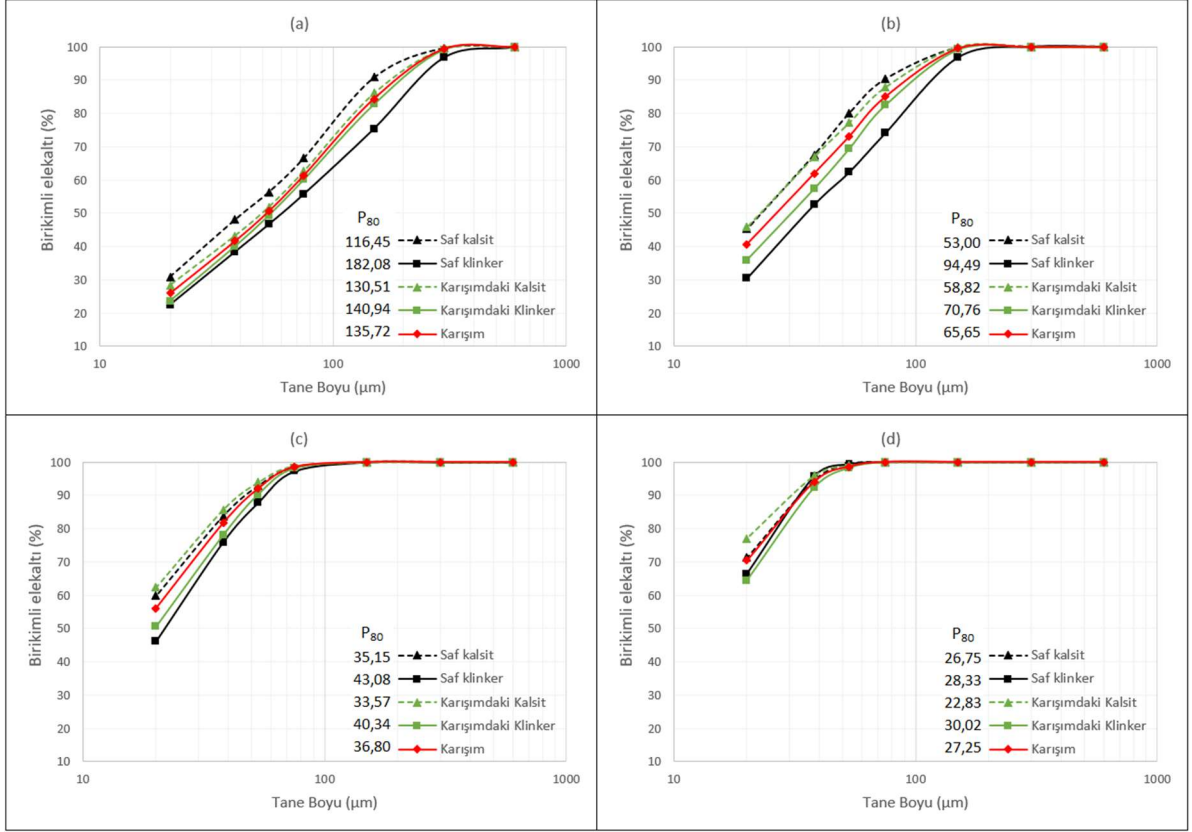


Şekil 4.25. Kalsit-manyetit karışımında bilyalar ile kalsit ve manyetit tanelerinin çarpışması

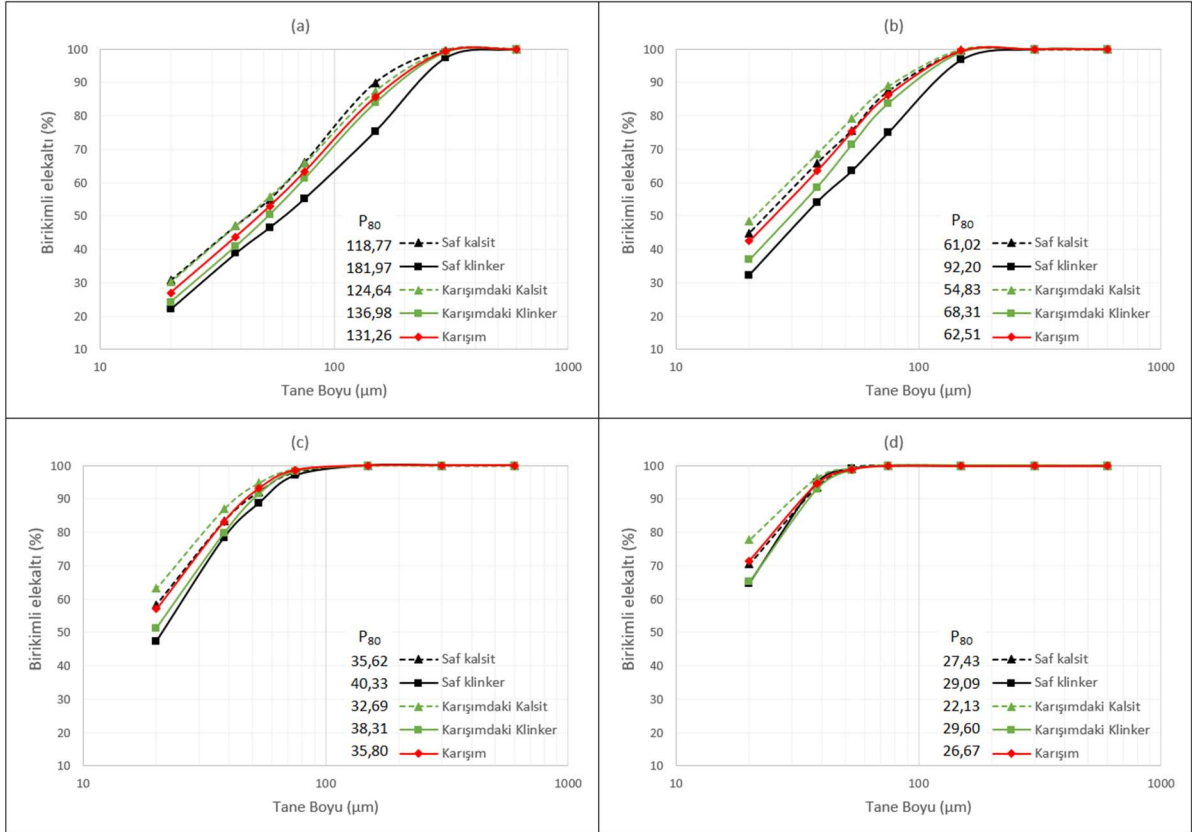
Karışım içerisindeki kalsit ise, ilk iki öğütme süresi sonunda kalsitin yüksek topaklanma eğilimine bağlı olarak; tekli öğütmesindekinden daha iri kalmıştır. Daha sonraki öğütme süreleri sonunda; ince boya gidildikçe artış gösterecek kalsitin topaklanma eğiliminin, bu öğütme bölgesinde; karışım içerisindeki manyetitin nispeten daha sert bileşen olmasından ötürü bilya yüzeyini temizlediği ve topaklanma eğilimini düşürücü bir etki yarattığı öngörülmektedir. Bu nedenle, karışım içerisindeki kalsit için daha verimli bir öğütme ortamının sağlandığı düşünülmektedir. Öte yandan, karışım olarak öğütme yapılması nedeniyle kalsit miktarının az olması, ince boydaki topaklanmanın azalmasına yol açabilmekte ve bu durum da öğütme işlemini daha verimli kılabilir. Bunlar ile birlikte iri boydaki tekli kalsit öğütme işleminde, karışımdaki kalsit davranımına kıyasla daha ince malzeme üretildiği belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak kalsitin daha kolay kırılan bir malzeme olması ve iri boyda bu etkiye bağlı olarak kırılma hızının da artmış olması gösterilebilir. Öte yandan, karışım içerisindeki koşulda ise, bilyaların kalsit taneleri ile yeterli temas ve çarpışma sayısını yakalayamaması bu boydaki kalsitin iride kalmasına yol açmış olabilir. Bu durumdan dolayı karışım içerisindeki kalsitin öğütme hızı tekli olan öğütme işlemine göre geride kalmıştır.

4.2.2.2. Kalsit-Klinker Karışımı

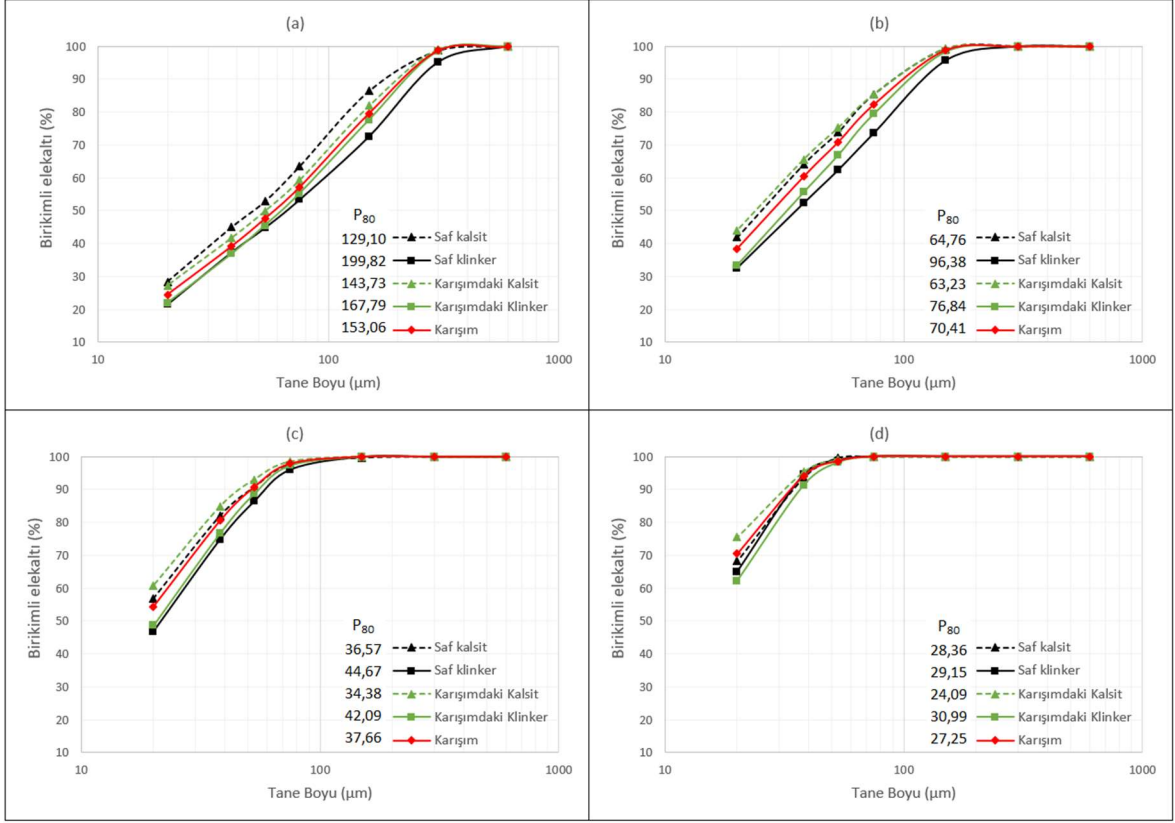
Bilyalı değirmende %20, %25 ve %30 olmak üzere değişken doluluk oranlarına bağlı gerçekleştirilen, ağırlıkça %50 kalsit ve %50 klinker ile oluşturulan karışımlara ait öğütme sonuçları Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de yer almaktadır.



Şekil 4.26. Bond bilyalı değirmende %20 dolulukta gerçekleştirilen kalsit-klınker öğütmesinin sonuçları; (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 60 dakika, (d) 120 dakika



Şekil 4.27. Bond bilyalı değirmende %25 dolulukta gerçekleştirilen kalsit-klınker öğütmesinin sonuçları; (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 60 dakika, (d) 120 dakika



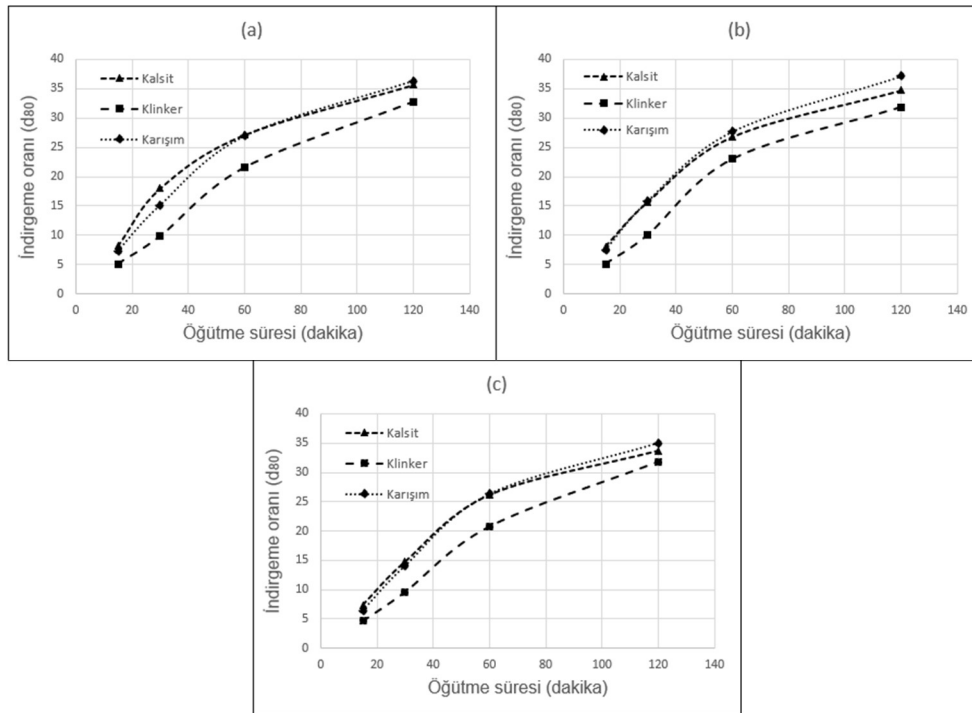
Şekil 4.28. Bond bilyalı değirmende %30 dolulukta gerçekleştirilen kalsit-klinker öğütmesinin sonuçları; (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 60 dakika, (d) 120 dakika

Bilyalı değirmende gerçekleştirilen kalsit-klinker öğütmelerinde, kalsit-manyetit öğütmelerinde de gözlemlendiği gibi, bilya doluluk oranına bağlı doğrusal olmayan öğünme davranışı gözlemlenmiştir. Karışıma ve karışım içerisindeki bileşenlere ait incelik değerleri; tüm öğütme sürelerinde küçükten büyüğe %25-%20-%30 değirmen doluluklarıyla elde edilmiştir. Ayrıca bilya doluluk etkisinin ilk 30 dakikada daha belirgin olduğu sonucuna varılmaktadır. Özellikle bir saatlik öğütme süresi aşıldıktan sonra bilya doluluğunun öğütmeye olan etkisinin azaldığı anlaşılmaktadır.

Klinkerin besleme tane boyu dağılımının kalsitinkine göre daha ince olmasına rağmen, aynı koşullarda öğütüldüklerinde klinkerin ürün tane boyu dağılımı kalsitinkine göre daha iri olduğu görülmektedir. Bu durum klinkerin öğütülebilirliğinin kalsit malzemesine oranla daha düşük olması ile açıklanabilir. Ayrıca kalsit malzemesi, ince tane boyuna gidildikçe elektrostatik olarak da daha fazla yüklenme ve topaklanma eğilimindedir. Bu koşulda klinker tanelerini sarması ve bilya ile olan teması da etkilemesi nedeniyle klinkerin öğünme hızını düşürdüğü düşünülmektedir. Buna bağlı olarak da ince üretimi olumsuz etkilenmektedir. İnce üretiminin düşmesi, özellikle 40-50 µm mertebesinde, boyut dağılımının da daha dik bir hale gelmesine

neden olmaktadır. Bunlara ek olarak tek başına öğütülen kalsit ve klinkerle aynı koşullarda öğütülen kalsit-klinker karışımına ait tane boyu dağılımları incelendiğinde ise karışımın tane boyu dağılımının kalsitinkinden daha iri, klinkerinkinden ise daha ince olduğu görülmektedir.

Klinkerin kalsit ile karışımında, kalsitin manyetit ile yaptığı karışım sonuçlarının aksine 15 dakikalık öğütme sonuçları dışındaki tüm öğütme sürelerinde, karışımdaki kalsit inceliğinin, tekli kalsit öğütmelerindeki incelik değerlerinden daha ince olduğu gözlemlenmektedir. Öte yandan karışım içerisindeki klinkerin tek başına klinker öğütmesine kıyasla, tüm doluluklarda 120 dakikalık öğütmelere kadarki her aşamada nispeten iyi, 120 dakikalık öğütmede ise; klinker ile kalsitin bilyalı değirmen içerisindeki farklı indirgeme davranımları ve çok ince kalsitin topaklanma ile yastıklama etkisine bağlı olarak daha az öğütüldüğü belirlenmiştir. Bu durum, Şekil 4.29'da verilen karışımdaki kalsit ve klinker indirgeme oranları ile tek başına kalsit ve klinker öğütmelerine ait indirgeme oranları (Şekil 4.4) karşılaştırıldığında; doluluk oranının artışı ile karışımdaki kalsitin tekli kalsite kıyasla 36-35-33 ile benzer indirgeme oranlarına sahip olması, karışımdaki klinkerin ise tekli klinkere ait indirgeme oranlarına (37-35-34) kıyasla sabit bir değer (32) alması üzerinden de belirlenebilmektedir.



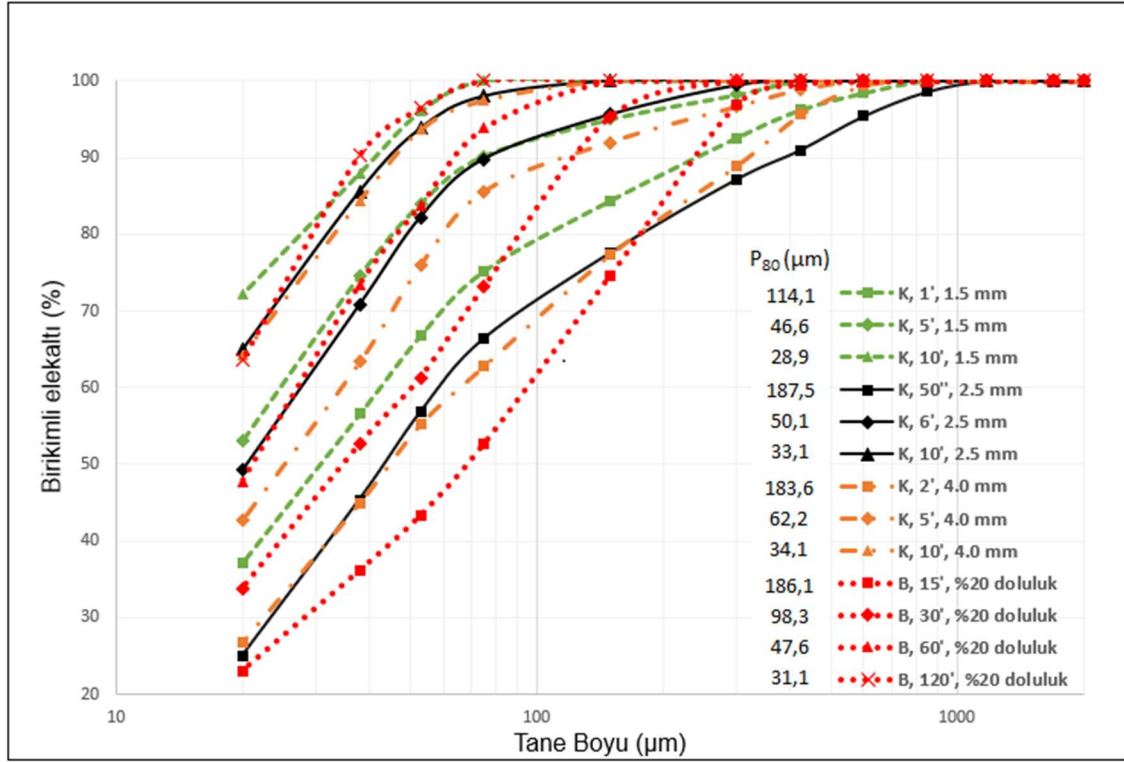
Şekil 4.29. Bond bilyalı değirmende kalsit-klinker öğütmesinin indirgeme oranlarındaki değişimleri; (a) %20 doluluk, (b) %25 doluluk, (c) %30 doluluk

Klinkerin tek başına ve karışım içerisindeki öğütmesinde gözlemlenen duruma benzer bir etki kalsit için de geçerlilik göstermektedir. Özellikle 1 saatlik öğütme süresini aşan öğütme işlemleri sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları incelendiğinde (Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28), aynı kalsit-manyetit karışımında da olduğu gibi, tekli öğütülen kalsitin karışım içindeki kalsitten daha iri kaldığı; tek başına öğütülen klinkerin ise karışım içinde öğütülen klinkerden daha ince olduğu gözükmemektedir.

4.2.3. Teknolojik Farklılıkların Tartışılması

4.2.3.1. Kalsit-Manyetit Karışımı

Karıştırmalı ve bond bilyalı değirmende kalsit ve manyetit karışımı ile gerçekleştirilen öğütme sonuçlarında bileşen davranımları incelenmiştir. Eşit ürün inceliklerinin elde edilmesi yoluyla gerçekleştirilen farklı öğütme sürelerindeki karışım öğütmeleri ve ürün incelikleri Şekil 4.30'da (Gösterge; **K**arıştırmalı değirmen-**B**ond Bilyalı değirmen, öğütme süresi, karıştırmalı değirmen için bilya boyu-bilyalı değirmen için doluluk oranı) verilmektedir. Bu bağlamda farklı değirmen işletim parametrelerinde gerçekleştirilen toplamda 3 farklı kalsit-manyetit öğütmesinde aynı ürün inceliklerine ulaşılmıştır. Bunlar; bileşen dağılımlarına ait sonuçların sırasıyla Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te verildiği, bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 15 dakika, karıştırmalı değirmenin 2,5 mm bilya ile 50 saniye ve 4,0 mm bilya ile 2 dakika (186,15-187,5-183,6 µm) öğütmeleri, bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 60 dakika, karıştırmalı değirmenin 1,5 mm bilya ile 5 dakika ve 2,5 mm bilya ile 6 dakika (47,61-46,6-50,1 µm) öğütmeleri ve son olarak bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 120 dakika, karıştırmalı değirmenin 1,5-2,5-4,0 mm çaplarındaki bilyalarında 10 dakika (31,6-28,9-33,1-34,1) öğütmeleridir.



Şekil 4.30. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki kalsit-manyetit öğütmeleri

Çizelge 4.1. Bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 15 dakika, karıştırmalı değirmenin 2,5 mm bilya ile 50 saniye ve 4,0 mm bilya ile 2 dakika kalsit-manyetit öğütmelerinde bileşen dağılımları

Fraksiyon (µm)	Bilyalı Değirmen		Karıştırmalı Bilyalı Değirmen			
	Kalsit (%)	Manyetit (%)	Kalsit (%)		Manyetit (%)	
			2,5 mm bilya	4,0 mm bilya	2,5 mm bilya	4,0 mm bilya
+300	1,13	1,95	6,94	6,27	5,86	4,73
-300+150	9,85	12,45	2,74	3,74	6,86	7,86
-150+75	11,49	10,51	3,25	3,90	7,95	10,70
-75+53	4,92	4,38	3,43	2,54	6,17	5,06
-53+38	3,79	3,38	4,62	3,48	6,78	6,72
-38+20	6,34	6,75	8,70	7,30	11,70	10,90
-20	12,79	10,28	13,96	15,06	11,04	11,74

Yukarıdaki koşullara ait bileşen dağılımlarına bakıldığında, kalsit miktarı; 53 µm tane boyuna kadar bilyalı değirmende, daha alt tane boylarında ise 20 µm tane boyuna kadar 2,5 mm bilya, 20 µm tane boyundan daha alt boylarda ise 4 mm bilya ile karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütmelerde kendini göstermiştir. Manyetit ise 75 µm tane boyuna kadar bilyalı değirmendeki, daha alt boylarda ise kalsit yoğunluğundakine benzer şekilde, 20 µm tane boyuna kadar 2,5 mm bilya, daha alt boylarda ise 4 mm bilya ile karıştırmalı değirmendeki öğütme sonuçlarına ait bileşen dağılımlarında daha yoğun şekilde gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2. Bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 60 dakika, karıştırmalı değirmenin 1,5 mm bilya ile 5 dakika ve 2,5 mm bilya ile 6 dakika kalsit-manyetit öğütmelerinde bileşen dağılımları

Fraksiyon (µm)	Bilyalı Değirmen		Karıştırmalı Bilyalı Değirmen			
	Kalsit (%)	Manyetit (%)	Kalsit (%)		Manyetit (%)	
			1,5 mm bilya	2,5 mm bilya	1,5 mm bilya	2,5 mm bilya
+300	0,00	0,00	0,00	0,00	1,80	0,60
-300+150	0,00	0,00	0,66	0,83	2,54	2,97
-150+75	1,02	5,18	0,53	0,82	4,27	4,98
-75+53	2,90	7,20	0,76	1,15	5,44	6,45
-53+38	4,15	6,15	3,26	4,89	6,14	6,51
-38+20	11,89	13,81	7,52	7,79	14,08	13,81
-20	28,21	19,49	31,22	30,80	21,78	18,40

Bilyalı değirmenin üçüncü, karıştırmalı değirmenin ise ikinci öğütme süreleri sonunda elde edilen yukarıdaki bileşen dağılımlarında, ilk öğütme sürelerindeki dağılımlara benzer şekilde hem kalsit hem de manyetit 75 µm tane boyuna kadar bilyalı değirmende daha yoğun bir fraksiyonel dağılıma sahiptir. Bunun yanı sıra karıştırmalı değirmenin 2,5 mm bilya ile gerçekleştirilen öğütmelerinde 75 µm tane boyundan 38 µm tane boyuna kadar daha yoğun olan kalsit ve manyetit, 20 µm altı tane boyutlarında ise 1,5 mm bilya ile gerçekleştirilen öğütmelerde diğer koşullara göre daha yoğundur. Fakat fark edileceği üzere 20 µm tane boyu altı dışındaki tüm dağılımlar birbirlerine çok yakın değerlere sahiptir.

Çizelge 4.3. Bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 120 dakika, karıştırmalı değirmenin 1,5-2,5-4,0 mm bilya ile 10 dakika kalsit-manyetit öğütmelerinde bileşen dağılımları

Fraksiyon (µm)	Bilyalı Değirmen		Karıştırmalı Bilyalı Değirmen					
	Kalsit (%)	Manyetit (%)	Kalsit (%)			Manyetit (%)		
			1,5 mm bilya	2,5 mm bilya	4,0 mm bilya	1,5 mm bilya	2,5 mm bilya	4,0 mm bilya
+300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-300+150	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-150+75	0,00	0,00	0,00	0,08	0,11	0,00	1,92	2,49
-75+53	0,35	3,25	0,24	0,23	0,20	3,76	3,97	3,60
-53+38	1,38	4,72	2,95	3,32	3,72	5,05	4,88	5,48
-38+20	10,69	16,01	4,00	5,27	5,17	11,80	15,33	15,03
-20	35,97	27,63	39,54	36,59	36,12	32,66	28,41	28,08

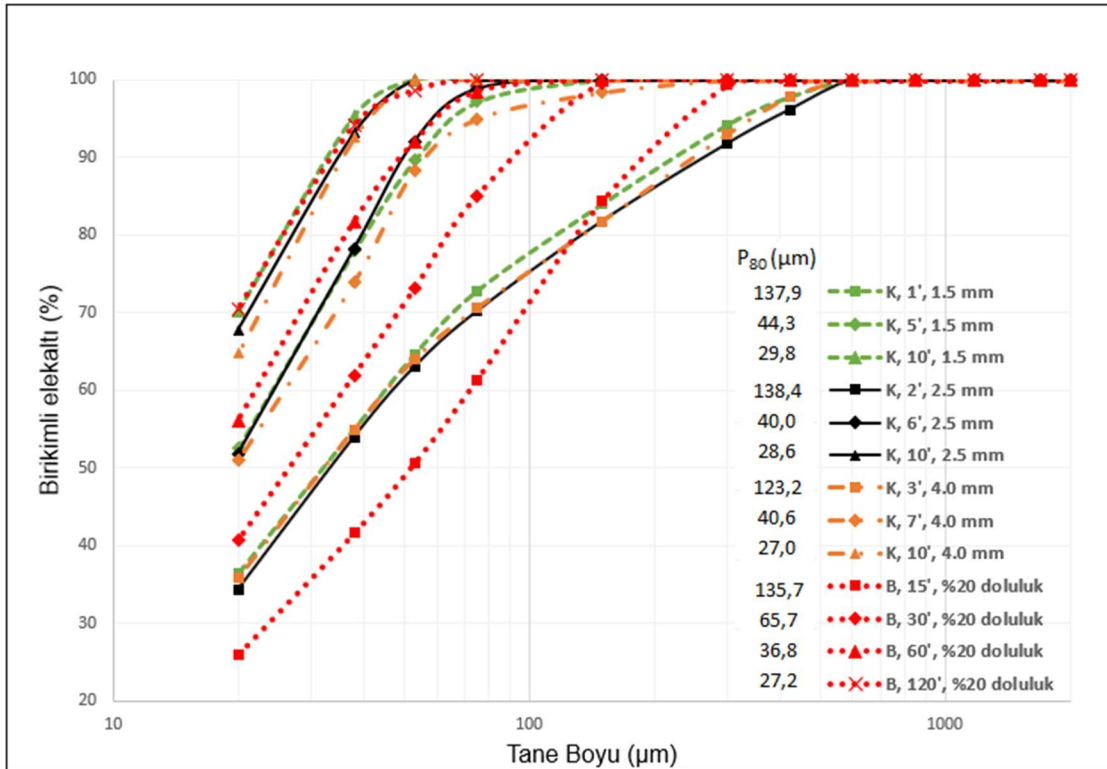
Son kalsit manyetit öğütmesine ait bileşen dağılımlarının verildiği yukarıdaki çizelgede, açık bir şekilde görülmektedir ki; karıştırmalı değirmen öğütmelerindeki 20 µm altı tane boyutlarındaki kalsit ve manyetit yoğunluğu, bilyalı değirmene

kıyasla daha yüksek değerlere sahiptir. Ayrıca kalsitteki ve manyetitteki bu yoğunluk, karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütmelerde kullanılan bilya çapının azalmasıyla, artan bir eğilim göstermektedir.

Kalsit-manyetit karışımındaki bileşen dağılımlarına genel olarak bakmak gerekirse; özellikle karıştırmalı değirmen için kısa olan ilk öğütme sürelerindeki sonuçlarda, bileşenler dağılımları öğünme performanslarından çok, besleme tane boylarına bağlı özellikleri yansıtarak kesin çıkarımlar yapılmasını zorlaştırmıştır. Bu bağlamda daha net gözlemlerin yapılabildiği ikinci ve üçüncü öğütme sonuçlarında karıştırmalı değirmenin ince fraksiyonlarda bilyalı değirmene kıyasla sağladığı performans farkı ortaya çıkmaktadır. Bond değirmeninde yapılan öğütme işleminde benzer P_{80} değerleri için daha dik dağılımın elde edildiği saptanmıştır. Dağılımdaki bu farklılık bileşenlerin alt boylara dağılıma davranımını da etkilemiştir. Karıştırmalı değirmende iri elek boylarında tane birikiminin darbe ile öğütme yapan bilyalıya göre daha fazla olduğu saptanmıştır. Her ne kadar benzer P_{80} değerlerine öğütülse de teknolojik farklılıklar ürün özellikleri üzerinde doğrudan etki yaratmaktadır. Karıştırmalı değirmenle öğütülen kalsit-manyetit karışımının tane boyu dağılımı incelendiğinde ise, + 300 μm ve -20 μm fraksiyonlarında kalsit miktarı manyetitinkinden fazla iken, diğer fraksiyonlarda manyetit miktarının kalsit miktarında fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, bilyalı değirmende iri taneleri öğütmenin karıştırmalı değirmene göre daha kolay olduğunu ve kalsitin hem bilyalı değirmende hem de karıştırmalı değirmende manyetite göre daha kolay öğütüldüğü savını doğrular niteliktedir. Öte yandan belirtilmelidir ki; karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen karışım öğütmeleri sonucunda, karışımı oluşturan malzemelere ait tane boyu dağılımları genişlemiş ve fraksiyondaki tane boyu artışıyla da homojenlik daha da azalmıştır. Bu durum, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te Görüleceği üzere karıştırmalı değirmenin; bilyalı değirmene kıyasla 20 μm altında daha yoğun bir kalsit ve manyetit miktarına sahip olacak bir öğütme gerçekleştirmiş olmasına rağmen, düşük değerlerde de olsa, bilyalı değirmen sonuçlarında olmayan üst boylarda da malzeme bulunduruyor olması ile kendini göstermektedir. İri fraksiyon olan +300 ve -300+150 μm 'da kalsit miktarının fazla olmasının nedeni, değirmene beslenen karışımındaki kalsitin tane boyu dağılımının manyetitinkinden daha iri olması ve iri boylarda karıştırmalı değirmenin öğütme performansının düşmesidir.

4.2.3.2. Kalsit-Klinker Karışımı

Karıştırmalı ve bilyalı değirmende kalsit ve klinker karışımı ile gerçekleştirilen öğütmeler ve ürün incelikleri Şekil 4.31’de (Gösterge; **K**arıştırmalı değirmen-**B**ilyalı Bilyalı değirmen, öğütme süresi, karıştırmalı değirmen için bilya boyu-bilyalı değirmen için doluluk oranı) verilmektedir. Bu bağlamda farklı değirmen işletim parametrelerinde gerçekleştirilen toplamda 3 farklı kalsit-klinker öğütmesinde aynı ürün inceliklerine ulaşılmıştır. Bunlar; bileşen dağılımlarına ait sonuçların sırasıyla Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verildiği, bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 15 dakika, karıştırmalı değirmenin 2,5 mm bilya ile 2 dakika ve 4,0 mm bilya ile 3 dakika (135,7-138,4-137,9 μm) öğütmeleri, bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 60 dakika, karıştırmalı değirmenin 1,5 mm bilya ile 5 dakika ve 2,5 mm bilya ile 6 dakika (36,8-40,6-40,0 μm) öğütmeleri ve son olarak bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 120 dakika, karıştırmalı değirmenin 1,5-2,5-4,0 mm çaplarındaki bilyalarında 10 dakika (27,2-27,0-28,6-29,8) öğütmeleridir.



Şekil 4.31. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki kalsit-klinker öğütmeleri

Çizelge 4.4. Bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 15 dakika, karıştırmalı değirmenin 2,5 mm bilya ile 2 dakika ve 4,0 mm bilya ile 3 dakika kalsit-klinker öğütmelerinde bileşen dağılımları

Fraksiyon (μm)	Bilyalı Değirmen		Karıştırmalı Bilyalı Değirmen			
	Kalsit (%)	Klinker (%)	Kalsit (%)		Klinker (%)	
			2,5 mm bilya	4,0 mm bilya	2,5 mm bilya	4,0 mm bilya
+300	0,23	0,46	1,67	4,18	1,53	3,42
-300+150	5,79	7,98	3,66	5,62	4,14	5,78
-150+75	10,28	11,89	5,48	4,87	7,52	6,93
-75+53	4,71	5,72	3,39	2,70	4,61	4,30
-53+38	4,15	4,96	4,12	3,63	5,48	5,57
-38+20	7,98	8,82	8,97	7,72	10,83	11,48
-20	14,35	12,67	20,61	17,54	17,99	16,26

Kalsit-klinker karışımının ilk öğütme sürelerinde gerçekleştirilen öğütmelerinden elde edilmiş yukarıdaki bileşen dağılımlarına göre; kalsit yoğunluğu 38 μm tane boyuna, klinker yoğunluğu ise 53 μm tane boyuna kadar bilyalı değirmende, daha alt boylarda ise, her iki bileşende de kullanılan bilya çapının azalmasıyla yoğunluk değerlerinin artacağı şekilde karıştırmalı değirmende kendini göstermektedir.

Çizelge 4.5. Bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 60 dakika, karıştırmalı değirmenin 1,5 mm bilya ile 5 dakika, 2,5 mm bilya ile 6 dakika ve 4,0 mm bilya ile 7 dakika kalsit-klinker öğütmelerinde bileşen dağılımları

Fraksiyon (μm)	Bilyalı Değirmen		Karıştırmalı Bilyalı Değirmen			
	Kalsit (%)	Klinker (%)	Kalsit (%)		Klinker (%)	
			1,5 mm bilya	2,5 mm bilya	1,5 mm bilya	2,5 mm bilya
+300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-300+150	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-150+75	0,48	0,92	1,32	0,00	1,45	0,00
-75+53	1,97	3,53	3,39	0,07	4,09	0,13
-53+38	3,70	6,20	4,01	1,44	5,87	2,36
-38+20	11,27	14,93	6,67	13,12	14,21	16,08
-20	29,95	27,05	34,33	33,66	24,65	33,14

Yukarıdaki çizelgede verilen, bilyalı değirmendeki 60 dakikalık öğütmeye ait her iki bileşen malzemedeki fraksiyonel dağılım değerleri, neredeyse tüm fraksiyonlarda karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütmelerin bileşen dağılımları arasında yer almıştır. Karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütmelerde ise özellikle 20 μm tane boyunun altındaki dağılım değerlerine bakıldığında, kalsit 1,5 mm bilya, klinker ise 2,5 mm bilya ile öğütülmesinde daha inceye gitmiştir. Karıştırmalı değirmende bilya çapının azalmasıyla gözlemlenmesi beklenen öğütme

performansındaki yükseliş, kalsit öğütmesine kıyasla klinker öğütmesinde kendini gösterememiştir. Buna 1,5 mm bilyanın değirmen içerisinde yarattığı yüksek akışkanlığa bağlı olarak gerçekleşen sıvanmaların sebep olduğu öngörülmektedir.

Çizelge 4.6. Bilyalı değirmenin %20 doluluğunda 120 dakika, karıştırmalı değirmenin 1,5-2,5-4,0 mm bilya ile 10 dakika kalsit-klinker öğütmelerinde bileşen dağılımları

Fraksiyon (µm)	Bilyalı Değirmen		Karıştırmalı Bilyalı Değirmen					
	Kalsit (%)	Klinker (%)	Kalsit (%)			Klinker (%)		
			1,5 mm bilya	2,5 mm bilya	4,0 mm bilya	1,5 mm bilya	2,5 mm bilya	4,0 mm bilya
+300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-300+150	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-150+75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-75+53	0,38	0,72	0,00	0,06	1,38	0,00	0,14	1,82
-53+38	1,41	2,89	1,81	1,61	4,31	2,79	2,19	5,89
-38+20	9,10	14,10	12,17	14,64	10,91	13,03	14,56	10,89
-20	38,17	33,23	38,18	33,78	32,86	32,02	33,02	31,94

Klinkere ait dağılım değerlerinin neredeyse tüm fraksiyonlarda benzer olduğunu gösteren yukarıdaki çizelgede, kalsite ait en yoğun dağılım değerinin ise karıştırmalı değirmende 1,5 mm bilya ile gerçekleştirilen öğütme sonunda elde edildiği çıkarımı yapılabilmektedir. Bütün koşullarda 20 µm'den daha ince olan kalsit oranının klinker oranından daha fazla olduğu görülmektedir. 15 dakikadan daha uzun süre boyunca yapılan öğütme işlemleri sonucunda ise öğütülen karışımın 20 µm'dan daha iri olan bütün fraksiyonlarda klinker oranının kalsit oranından daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. 15 dakikalık öğütme işlemi sonucunda ise özellikle -150+75, -75+53, -53+38 ve -38+20 µm fraksiyonlarındaki kalsit ve klinker oranlarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Karışıma eklenen klinkerin tane boyu dağılımının kalsitinkinden daha ince olduğu da göz önünde bulundurulduğunda, karışım içindeki klinkerin kalsite göre daha zor öğütüldüğü açıkça görülmektedir.

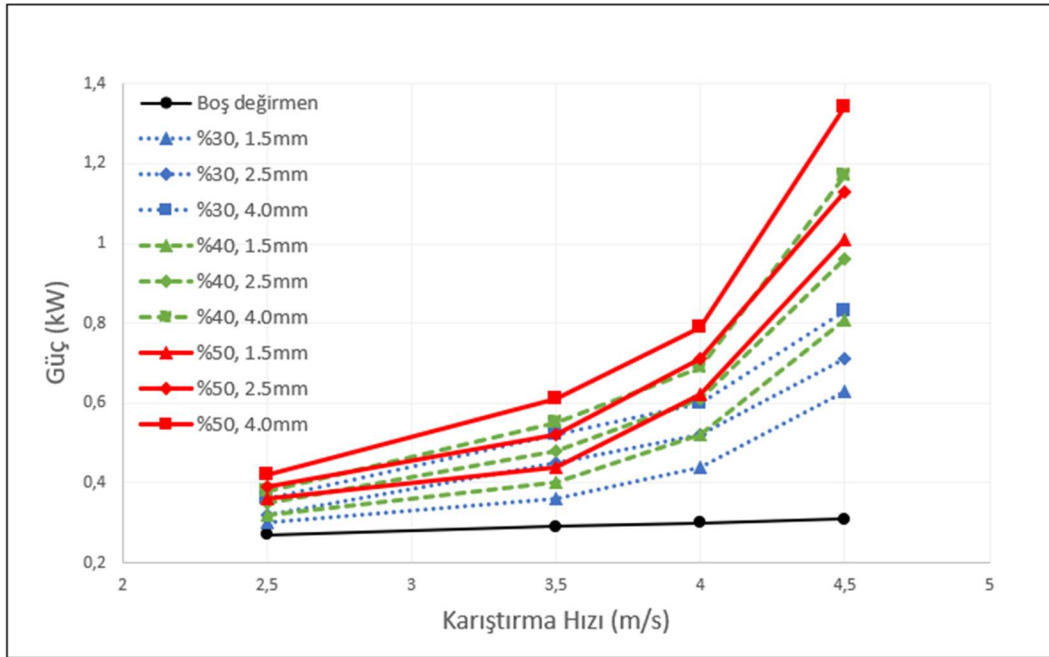
Karıştırmalı değirmende öğütülen kalsit-manyetit karışımı üzerinde gözlemlenen; karıştırmalı değirmen sonuçlarında bilyalı değirmen sonuçlarında olmayan üst boylarda da (+300 ve -300+150 µm) malzeme bulunduruyor olması durumu, daha düşük değerlerde de olsa kalsit-klinker karışımı içinde de kendini göstermektedir. Bu durumun nedeni olarak, kalsit besleme dağılımının klinkere göre daha iri olması gösterilebilir. Öğütme enerjisi arttıkça bu eğilimin tersine döndüğü ve kalsit miktarının belirtilen fraksiyonlarda azaldığı gözlemlenmektedir. Bütün koşullarda, -

150+75, -75+53 ve -53+38 µm fraksiyonlarında klinker miktarının kalsite oranla fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak, kalsitin klinkere göre daha hızlı ufalanarak daha ince fraksiyonlarda birikmesi gösterilebilir. Daha ince -38+20 µm fraksiyonunda biriken malzemeler incelendiğinde, farklı bilya çaplarında ve enerji seviyelerinde farklı durumların ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Enerji seviyesinin 130 kWsa/t değerinden düşük olduğu koşulda -38+20 µm fraksiyondaki klinker miktarının kalsit miktarından daha fazla olduğu görülmüştür. Bu enerji seviyesinin üstüne çıkıldığı koşulda ise 1,5 mm'lik bilyaların kullanıldığı koşulda klinker oranın kalsitinkinden fazla olduğu, 2,5 mm'lik bilyaların kullanılması durumunda miktarların eşit olduğu ve 4 mm'lik bilyaların kullanılması durumunda da kalsit miktarının klinker miktarından daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, irileşen bilya boyu ile öğütme veriminin düşmesinin bir sonucudur. Öte yandan hem kalsit-manyetit hem de kalsit-klinker karışımında seçilmiş, bilyalı değirmenin 120 dakika ve karıştırmalı değirmenin tüm bilya çaplarındaki 10 dakika öğütmelerinin yer aldığı öğütmeler karşılaştırıldığında (Şekil 4.3, Şekil 4.6); tüm öğütme koşullarında karışım içerisindeki 20 µm altı kalsit yoğunluğu, kalsit-manyetit karışımında daha yüksektir. Fakat özellikle karıştırmalı değirmende kalsit-manyetit karışımındaki kalsit, kalsit-klinker karışımındakine kıyasla daha geniş şekilde fraksiyonlara dağılmıştır. Örneğin; karıştırmalı değirmende 1,5 mm bilya ile gerçekleştirilen 10 dakikalık öğütme ürününe ait bileşen dağılımındaki kalsit yoğunlukları; Sırasıyla -20, -38+20, -53+38, -75+53 µm fraksiyonlarında, kalsit-manyetit için %39,54, %4,00, %2,95, %0,24 iken, kalsit-klinker için %38,18, %12,17, %1,18, %0,00 değerini almıştır.

Çalışmada yer alan karışım bileşenleri hem klinker hem de manyetit kalsite oranla daha zor öğünmekte ve daha sert bileşen olarak nitelendirilebilmektedir. Bu koşulda, kalsit tanelerinin sıvanma eğilimleri öğütme enerjisinden bağımsız olarak engellenmiş ve öğünme hızının etkilenmeden devam etmesi sağlanabilmiştir. Bu nedenle de tekli kalsit ile olan öğütme işleminden daha verimli bir kalsit öğütmesi sağlanmıştır. Ek olarak manyetit içerisindeki kalsitin en yüksek indirgeme oranına sahip olduğu da tespit edilmiştir. Bu noktada manyetit klinkere oranla daha sert bir malzeme olması buna neden olmuştur. Böylelikle sert bileşenin kalsitin öğünme hızını arttırdığı hipotezi de desteklenmiş olmaktadır.

4.3 Bakır Cevheri Öğütmeleri

Karıştırmalı ve bond bilyalı değirmende gerçekleştirilen bakır cevheri öğütmelerinde; değirmenlerin değişken işletim parametrelerine bağlı öğütmeler gerçekleştirilmiştir. Yapılacak MLA çalışmaları için ise her iki değirmende de belirlenmiş sabit işletim parametreleri ile yapılan öğütme ürünleri kullanılmıştır. Bu bağlamda, bilyalı değirmen öğütmelerinde denenmiş değişken doluluk oranlarının değirmenin öğütme performansı üzerinde yoğun bir etkiye sahip olmamasının gözlemlenmesi üzerine, bond bilyalı değirmende gerçekleştirilecek bakır cevheri öğütmeleri için değişken doluluk oranları (%20-%25-%30) arasındaki ortalama değere sahip %25 değirmen doluluğu seçilmiştir. Karıştırmalı değirmende ise değişken bilya çaplarına bağlı farklı doluluk oranlarında ve değişken karıştırma hızlarında tamburlama testleri yapılarak belirlenen değirmenin çektiği güç değerleri üzerinden değerlendirmelerle, diğer bilya çaplarına kıyasla ortalama güç değerlerine gereksinim duyan 2,5 mm bilya çapı ile 3,5 m/s karıştırma hızı sabit tutulmuştur. Karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen güç tüketim denemelerine ait sonuçlar Şekil 4.32’de verilmektedir.



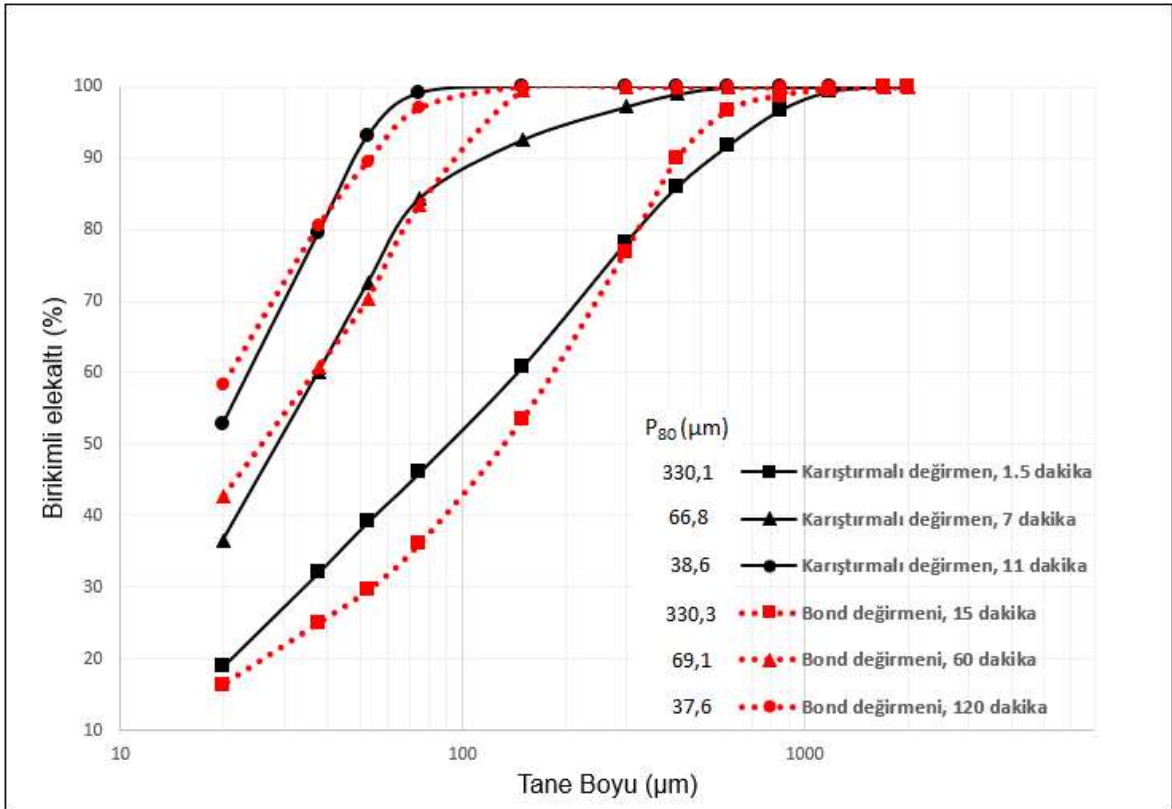
Şekil 4.32. Karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen güç tüketim denemeleri

Karıştırmalı ve bilyalı değirmen için belirlenen sabit parametrelerde sürdürülen öğütme ve MLA çalışmaları ile, bakır gibi içerisinde farklı mineralleri barındıran bir cevhere ait ürünlerde mineral içeriğinin fraksiyonel dağılımı değerlendirilebilecektir. Bakır cevheri beslemesine ait mineral dağılımı Çizelge 4.7’de verilmektedir.

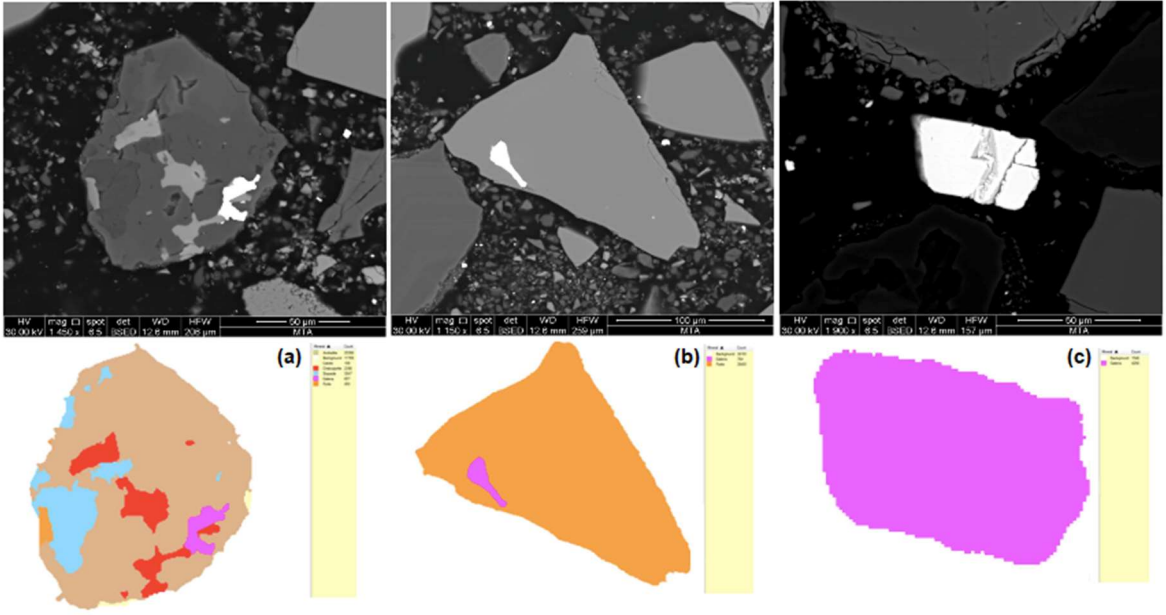
Çizelge 4.7. Bakır cevheri beslemesine ait ilgili mineral dağılımı

Kalkopirit- $CuFe_2$ (%)	Sfalerit- ZnS (%)	Galenit- PbS (%)	Pirit- FeS_2 (%)
2,6	3,2	2,5	31,3

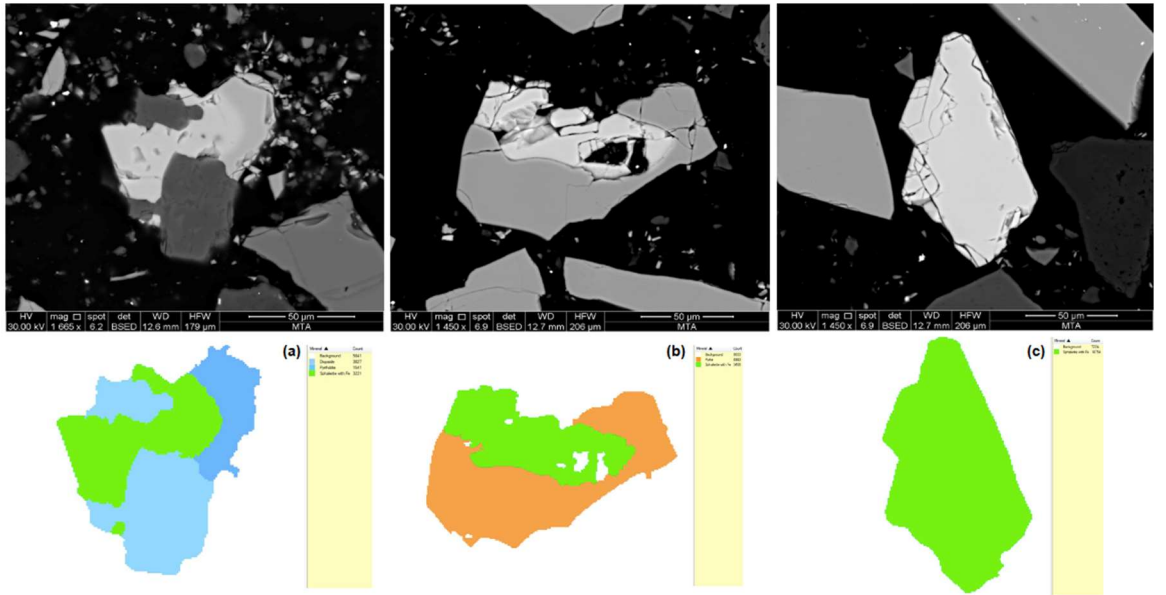
Bilyalı değirmendeki %25 doluluğun ve karıştırmalı değirmendeki 2,5 mm bilya çapının sabit tutulduğu bakır cevheri öğütmelerinde, mineral dağılımının karşılaştırılması için gerekli eşit ürün inceliklerine (P_{80} değerlerine); sırasıyla bilyalı değirmende ve karıştırmalı değirmende, 15 dakika-1,5 dakika (330,3-330,1 μm), 60 dakika-7 dakika (69,1-66,8 μm) ve 120 dakika-11 dakika (37,6-36,3 μm) olmak üzere 3 çift öğütme süresinde ulaşılmıştır. Değirmenlerde bakır cevheri öğütmelerinin karşılaştırılması için gerçekleştirilen öğütmeler Şekil 4.33'te verilmektedir. Ayrıca Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nde yapılmış MLA çalışmalarına ait mineral bazlı örnek görüntüler Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de yer almaktadır.



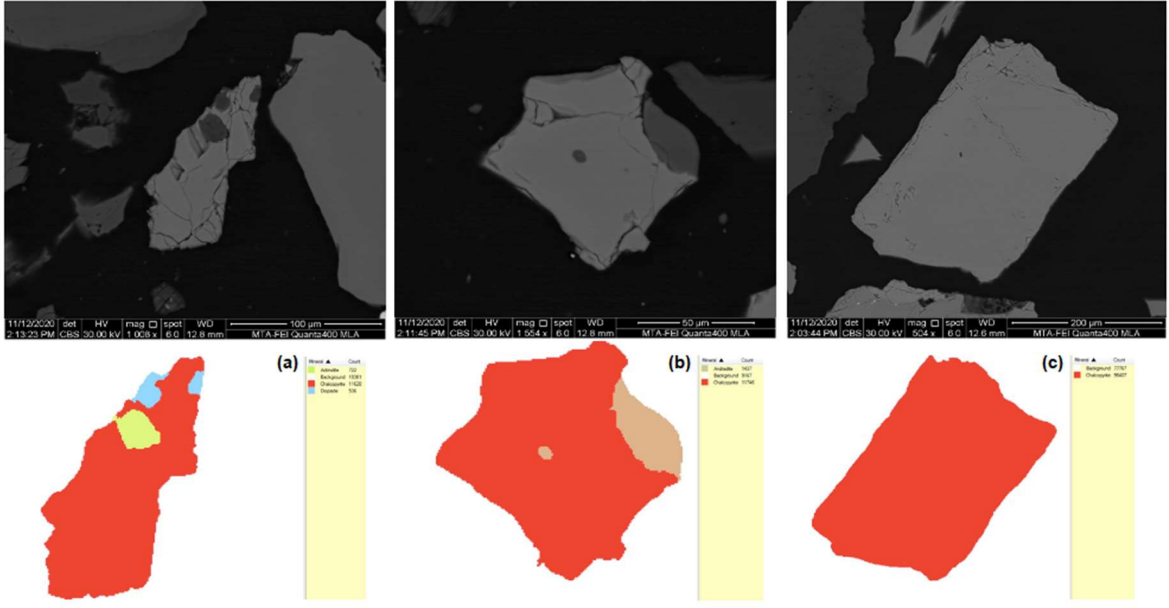
Şekil 4.33. Karıştırmalı ve bilyalı değirmendeki bakır cevheri öğütmeleri



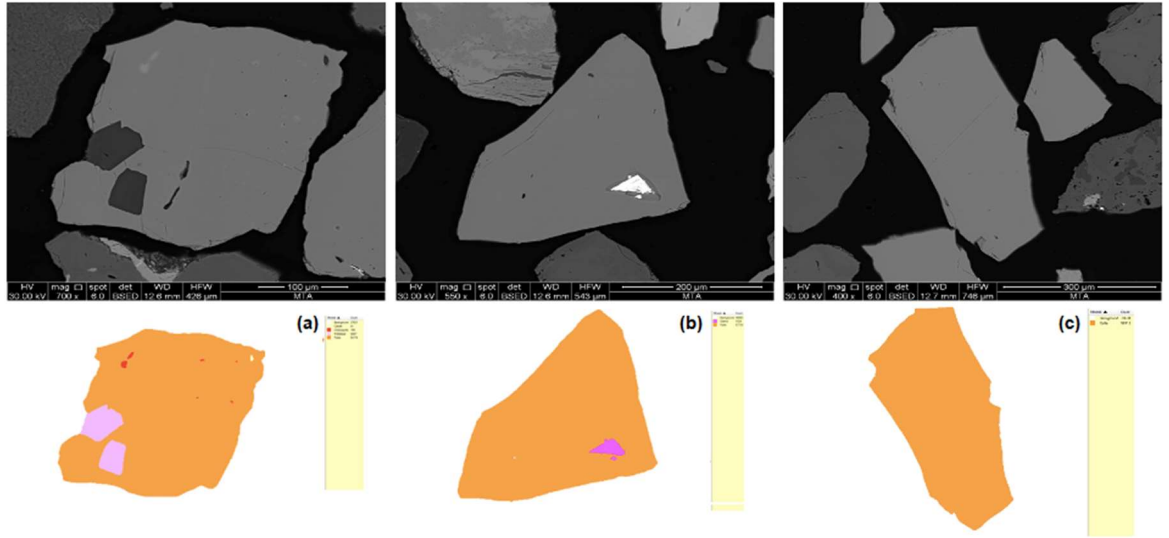
Şekil 4.34. Galenit mineralinin (-150+75 µm) karıştırmalı değirmen ile 82 kWh/t'da öğütme sonrası MLA görüntüleri; (a) çoklu kenetli, (b) ikili kenetli, (c) serbest



Şekil 4.35. Sphalerit mineralinin (-150+75 µm) bond değirmeni ile 120 dakika öğütme sonrası MLA görüntüleri; (a) çoklu kenetli, (b) ikili kenetli, (c) serbest



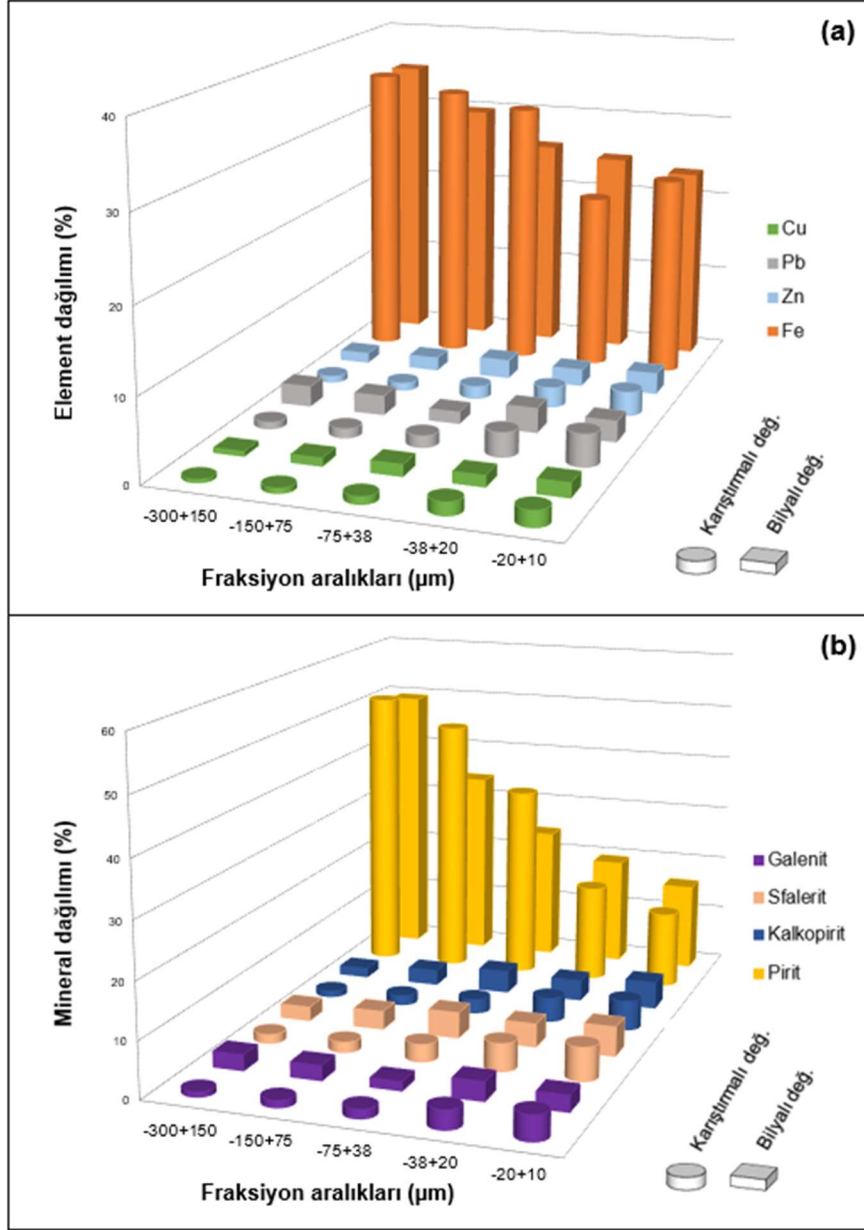
Şekil 4.36. Kalkopirit mineralinin (-150+75 μm) bond değirmeni ile 15 dakika öğütme sonrası MLA görüntüleri; (a) çoklu kenetli, (b) ikili kenetli, (c) serbest



Şekil 4.37. Pirit mineralinin (-300+150 μm) karıştırılmalı değirmen ile 82 kWh/t'da öğütme sonrası MLA görüntüleri; (a) çoklu kenetli, (b) ikili kenetli, (c) serbest

4.3.1. Birinci Öğütme Sürelerinde Bakır Cevheri Öğütmeleri

Bakır cevheri beslemesinin, karıştırmalı değirmende 1,5 dakika, bilyalı değirmende ise 15 dakika öğütmeleriyle benzer P_{80} değerlerine ($\sim 330 \mu\text{m}$) ulaşılmıştır. Birinci öğütme sürelerinde bakır cevherine ait ürünler üzerinde gerçekleştirilen MLA çalışmaları sonuçlarına göre bakır içeriğinin fraksiyonel dağılımları Şekil 4.38'de verilmektedir.



Şekil 4.38. Birinci bakır cevheri öğütme ürünlerindeki bakır içeriklerinin fraksiyonel dağılımları; (a) element dağılımı, (b) mineral dağılımı

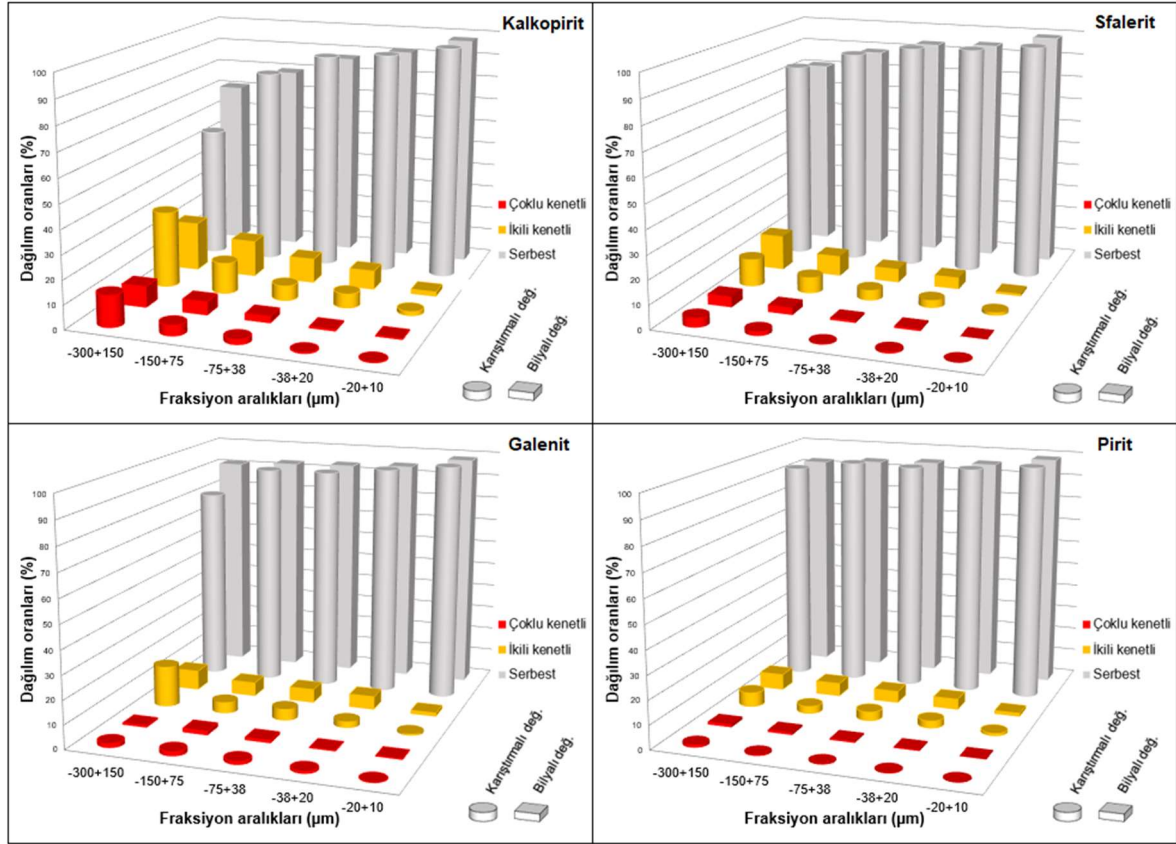
Şekil 4.38 incelendiğinde, her iki değirmende de bakır ve çinkonun tane boyu dağılımında ince fraksiyonlara gittikçe gösterdiği artış gözlenmektedir. Öte yandan

kurşun dağılımında +75 µm tane boyunda bond, daha alt boylardaki tane boylarında ise karıştırmalı değirmende yoğun olacak şekilde kendini göstermektedir. Demirin ise, bilyalı değirmende ince fraksiyonlara gittikçe azalan davranım, karıştırmalı değirmende, -20 µm fraksiyonundaki nispete yüksek değere rağmen, -38+20 µm fraksiyonunda gösterdiği düşük demir yoğunluğu sebebiyle gözlemlenememiştir. Bu durum ile birlikte üst boylardaki demir yoğunluğunun karıştırmalı değirmende daha yoğun olduğu gözlemine dayanarak, karıştırmalı değirmenin 1,5 dakika içerisinde gerçekleştirdiği bu öğütmede, demir tanecikleri üzerinde daha çok aşındırma etkisine bağlı olarak gerçekleşen kırılma mekanizmasının söz konusu olduğu öngörülmektedir. Böylece demir sadece yüzeyleri üzerinden tıraşlamaya benzer bir etkiye bağlı olarak, -20 µm fraksiyonunda bilyalı değirmendekine benzer değerlere sahip olurken iri fraksiyonlardaki varlığını da devam ettirmiştir [31]. Bu, bakır cevheri içerisindeki demir miktarının büyük çoğunluğunu sağlayan pirit mineralinde de gözlemlenen, pirit dağılımının karıştırmalı değirmende bilyalı değirmendekine kıyasla +38 µm fraksiyonundan itibaren daha çok, -38 µm fraksiyonu altında ise daha az olduğu durumu ile de kendini göstermektedir. Diğer minerallerde ise farklı bir durum gözlemlenmektedir.

Kalkopirit, sfalerit ve galenit minerallerinin tamamında görüldüğü üzere; karıştırmalı değirmenden alınan ürüne ait mineral dağılımlarının, en iri fraksiyondan en ince fraksiyona doğru artış gösterdiği bir durumu söz konusudur. Bilyalı değirmendeki sonuçlarda ise belirgin bir davranım olmamakla birlikte, her bir minerallerin fraksiyonlar arasındaki eşit olmaya çok yakın dağılımları göze çarpmaktadır.

Farklı öğütme mekanizmaları kullanan karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerdeki öğütmeler, mineral dağılımları üzerinde gösterdiği etki kadar, minerallerin ürün içerisindeki serbestleşme dereceleri üstündeki etkisi ile de büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda Şekil 4.39'da verilen, minerallerin fraksiyonel olarak gösterdiği serbest ve kenetli dağılımlarının incelendiği çalışmanın sonuçlarından hareketle, pirit için her fraksiyonda her iki değirmende de aynı dağılımlar gözlemlenmekte iken, kalkopirit, sfalerit ve galenit minerallerinde iri boylardaki farklılıklar göze çarpmaktadır. Öyle ki karıştırmalı değirmende bilyalı değirmene kıyasla, özellikle kalkopirit ve galenit minerallerinin -300+150 fraksiyonlarındaki daha düşük serbestleşme değeri ve daha yüksek kenetli mineral varlığına bağlı olarak, karıştırmalı değirmenin bu iki mineralin öğütülmesi için gösterdiği öğütme

performansının yeterli olmadığını söylemek mümkündür. Sfaleritte ise neredeyse her fraksiyonda, karıştırmalı değirmen daha iyi bir öğütme gerçekleştirmiştir.

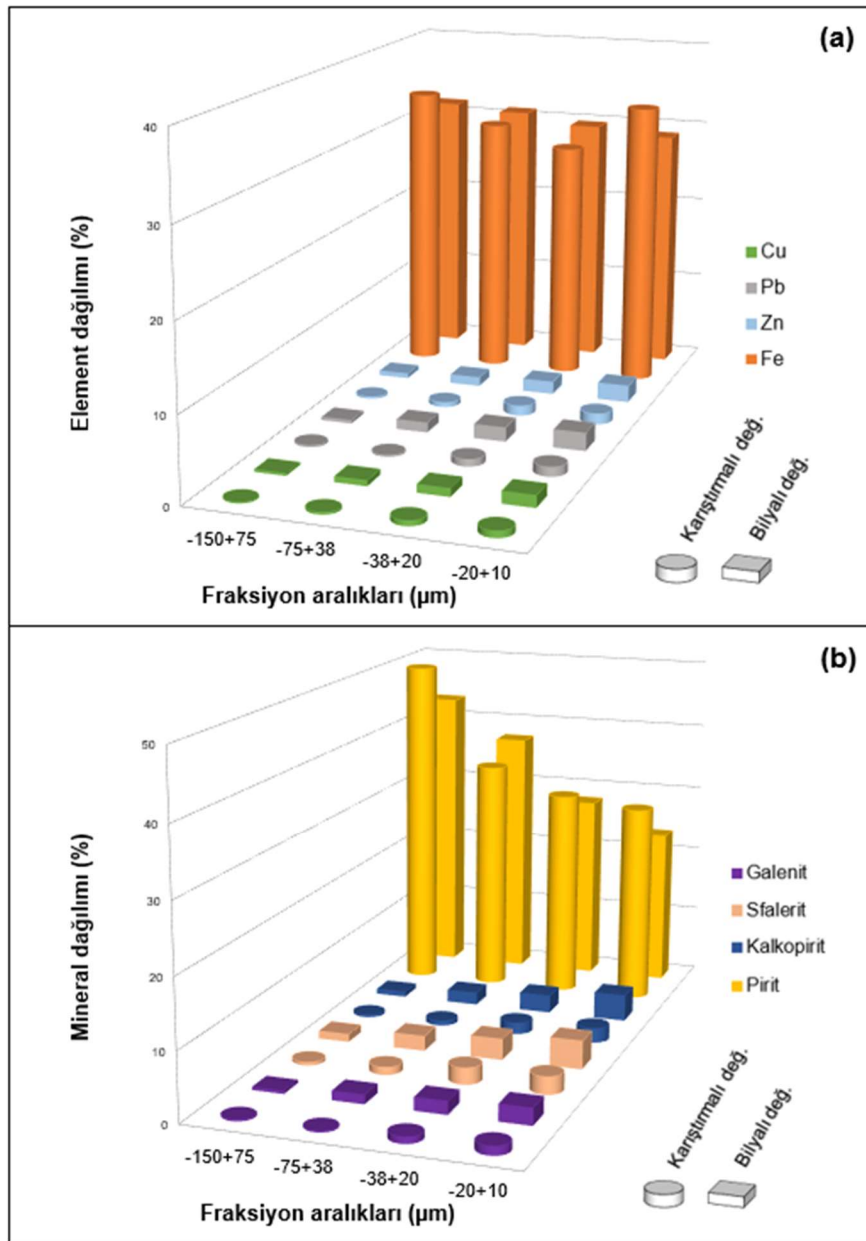


Şekil 4.39. Birinci bakır cevheri öğütme ürünlerindeki serbest ve kenetli tanelerin fraksiyonel dağılımları

4.3.2. İkinci Öğütme Sürelerinde Bakır Cevheri Öğütmeleri

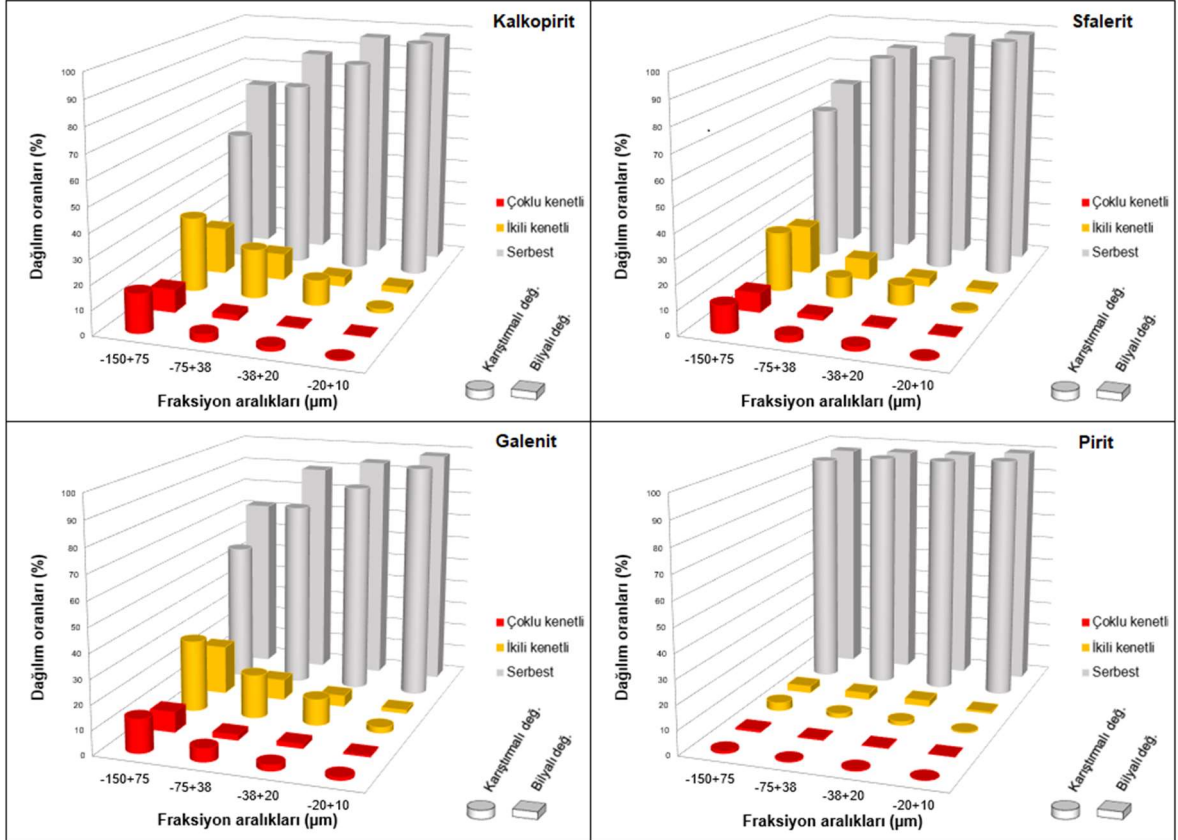
Bakır cevheri beslemesinin, karıştırmalı değirmende 7 dakika, bilyalı değirmende ise 60 dakika öğütmeleriyle benzer P_{80} değerlerine ($\sim 69 \mu m$) ulaşılmıştır. İkinci öğütme sürelerine ait ürünler üzerinde gerçekleştirilen MLA çalışmasının Şekil 4.40'da verildiği bakır içeriğinin fraksiyonel dağılımlarına ait sonuçlar incelendiğinde; demir üzerinde birinci bakır cevheri öğütmelerinin $-38+20$ fraksiyonunda gözlemlenen aynı etkinin devam ettiği fakat bu fraksiyonda karıştırmalı ve bilyalı değirmenler arasındaki dağılım miktarları arasındaki farkın daha da azaldığı fark edilmektedir. Öte yandan demir dışındaki elementler üzerinde, birinci bakır cevheri öğütmelerinde sadece karıştırmalı değirmenin gösterdiği; fraksiyonların incilmesiyle artış gösteren element yoğunluğu, ikinci öğütmelerde bilyalı değirmende de aynı şekilde gözlemlenebilmektedir.

Mineral dağılımlarına bakıldığında, karıştırmalı değirmenin bilyalı değirmene kıyasla birinci öğütmelerde pirit minerali üzerinde gösterdiği; +38 μm fraksiyonundan itibaren daha çok, -38 μm fraksiyonu altında ise daha az dağılıma sahip olduğu durumu geçerliliğini kaybederek, karıştırmalı değirmen sonuçlarındaki pirit yoğunluğunun bilyalı değirmenine kıyasla, -38 μm altındaki fraksiyonlarda daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca bilyalı değirmenin pirit dışındaki, birinci bakır cevheri öğütmelerinde gösterdiği mineral dağılımlarının fraksiyonlar arasındaki eşite yakın dağılımı, yerini ince fraksiyona gittikçe yoğunluğunu arttıran bir eğilime bırakmıştır.



Şekil 4.40. İkinci bakır cevheri öğütme ürünlerindeki bakır içeriklerinin fraksiyonel dağılımları; (a) element dağılımı, (b) mineral dağılımı

İkinci bakır cevheri öğütmelerinde minerallerin serbest ve kenetli dağılımlarına ait fraksiyonel sonuçlarının verildiği Şekil 4.41'de görülmektedir ki; karıştırmalı değirmenin bilyalı değirmene kıyasla sahip olduğu, kalkopirit ve galenit minerallerinin üst boylarındaki düşük serbestleşme ve daha fazla kenetli mineral bulunduruyor olduğu durum değişmemiştir. Sferit ve piritte dağılımlarında ise birinci öğütmelerde gözlemlenenlere benzer tablolar söz konusudur.

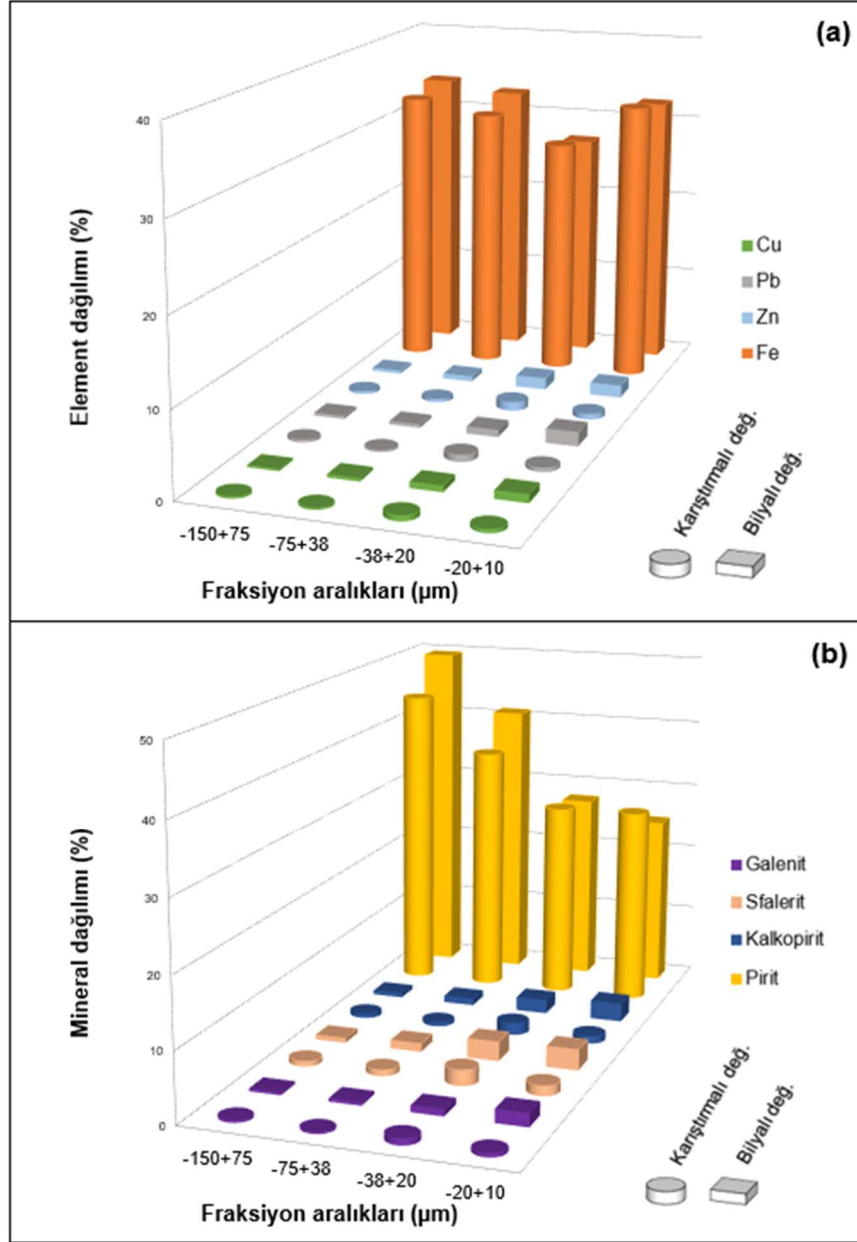


Şekil 4.41. İkinci bakır cevheri öğütme ürünlerindeki serbest ve kenetli tanelerin fraksiyonel dağılımları

4.3.3. Üçüncü Öğütme Sürelerinde Bakır Cevheri Öğütmeleri

Bakır cevher beslemesinin, karıştırmalı değirmende 11 dakika, bilyalı değirmende ise 120 dakika öğütmeleriyle benzer P_{80} değerlerine ($\sim 38 \mu\text{m}$) ulaşılmıştır. Üçüncü öğütme sürelerindeki ürünlerinin Şekil 4.42'de yer alan bakır içeriğe ait fraksiyonel dağılımlara göre, demirin ve piritin fraksiyonel dağılımının diğer öğütmelerin aksine, $+38 \mu\text{m}$ fraksiyonlarından itibaren bilyalı değirmende öğütme sonuçlarında daha yoğun olacak şekilde kendini göstermiştir. Bunun dışında genel itibariyle ikinci bakır cevheri öğütmelerindeki dağılım oranlarına benzer sonuçlar elde edilmiş ve ikinci ile üçüncü öğütmesindeki element ve mineral dağılım değerlerinin değişimlerdeki düşük farklardan çıkarımlarla, bakır beslemesinin tüm fraksiyonlarda öğütme

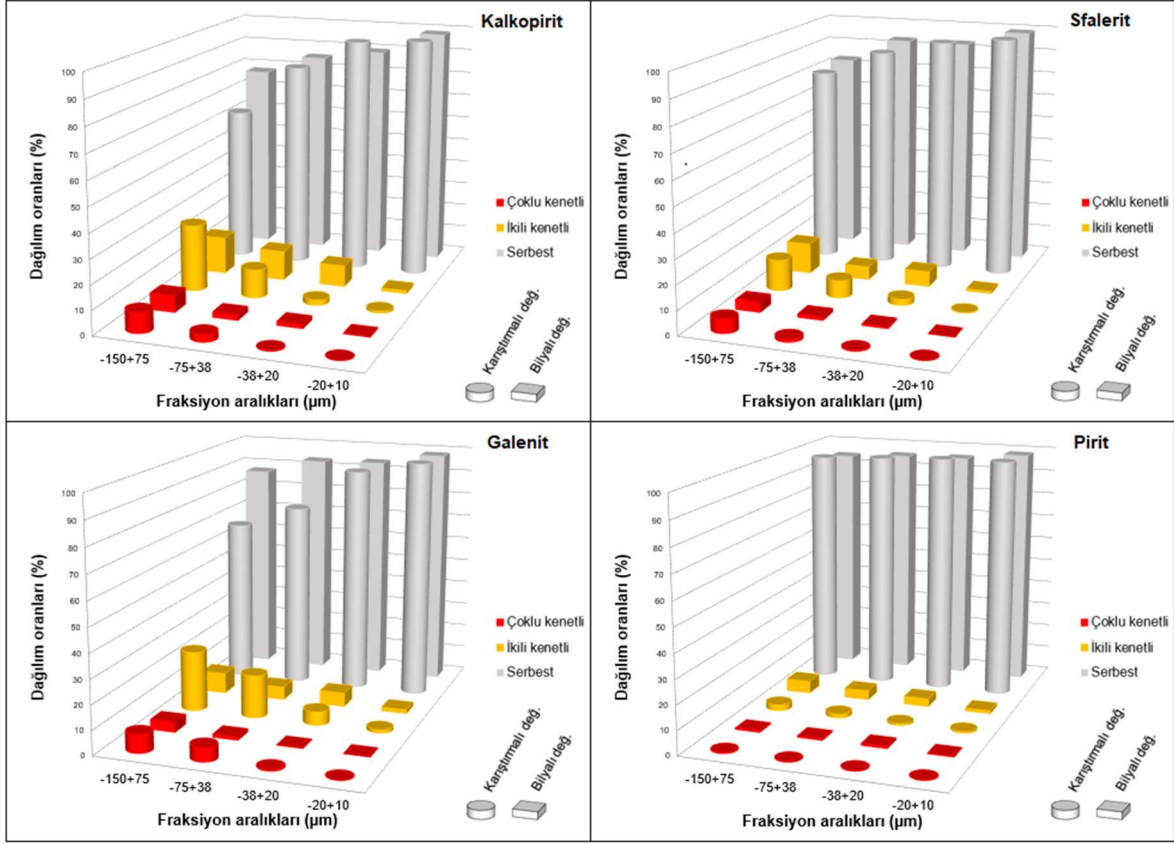
doğunluğuna erişmiş olduğu gözlemlenmiştir. Aynı durumu serbestleşme oranlarında da görmek mümkündür.



Şekil 4.42. Üçüncü bakır cevheri öğütme ürünlerindeki bakır içeriklerinin fraksiyonel dağılımları; (a) element dağılımı, (b) mineral dağılımı

Üçüncü bakır cevheri öğütmelerinin ürünlerine ait serbest ve kenetli tane dağılımlarının verildiği Şekil 4.43’de mineral dağılımlarındaki gibi diğer öğütmesindekine benzer fraksiyonel dağılım verileri elde edilmiş ve genel olarak; karıştırmalı değirmende bilyalı değirmendekine kıyasla, özellikle kalkoprit ve galenit minerallerinin +38 µm üzerindeki fraksiyonlarındaki dağılımların daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 38 µm tane boyundan daha alt boylardaki fraksiyonlar da

ise, karıştırmalı bilyalı ve bond bilyalı değirmende tüm mineraller için benzer serbestleşme değerleri elde edilmiştir.



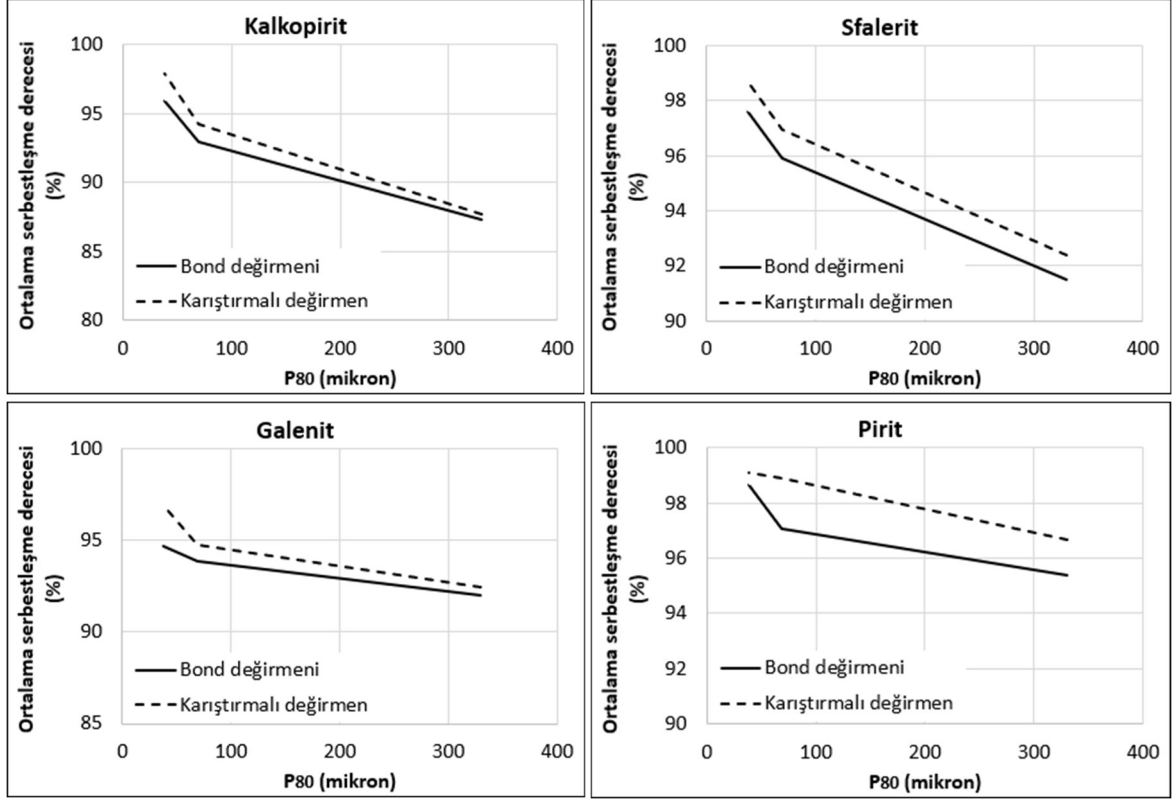
Şekil 4.43. Üçüncü bakır cevheri öğütme ürünlerindeki serbest ve kenetli tanelerin fraksiyonel dağılımları

4.3.4. Bakır Cevheri İçindeki Bileşenlerin Öğütme Davranışları

MLA sonuçları üzerinden gerçekleştirilen değerlendirmelerde değirmen teknolojisindeki farklılıklar öncelikle tane boyu dağılımı üzerinden, sonrasında minerallere ait serbestleşme derecesi ve son olarak da bunların fonksiyonu olan serbest mineral miktarında farklılık göstermektedir.

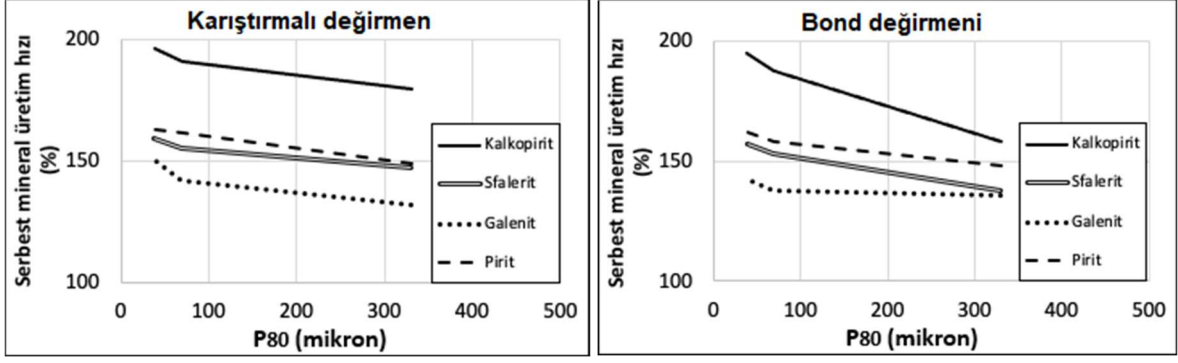
Çalışmalar kapsamında minerallere ait serbestleşme dereceleri kullanılarak, mineral ve öğütme teknolojisi temelli karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü bakır cevheri öğütmelerinin kendi içerisinde eşit olan 330 µm, 69 µm ve 38 µm değerine sahip P₈₀ değerleri üzerinden ortalamaları alınmıştır. Bir başka deyişle 38 µm'luk P₈₀ değerine sahip öğütme ürününün ortalama serbestleşen mineral miktarını belirlemek için en düşük elek boyutundan başlayarak 38 µm'a kadar karşılık gelen değerler dikkate alınmıştır. 330 µm ve 69 µm'luk P₈₀ değerlerine sahip ürünlerde ise sırasıyla 300 µm ve 75 µm elek boylarına kadarki

veriler kullanılmıştır (Ek 5). Çalışmalar neticesinde elde edilen tablolar incelendiğinde iki önemli sonuç göze çarpmaktadır. Birincisi, serbestleşme derecesi her iki değirmende de mineral fark etmeksizin ince elek boylarına gittikçe artmaktadır. Diğeri ise, ortalama serbestleşme derecesinin ürüne ait P_{80} değerine bağlı gösterimi ile ortaya çıkan öğütme teknolojisi temelli farklılıklardır (Şekil 4.44).



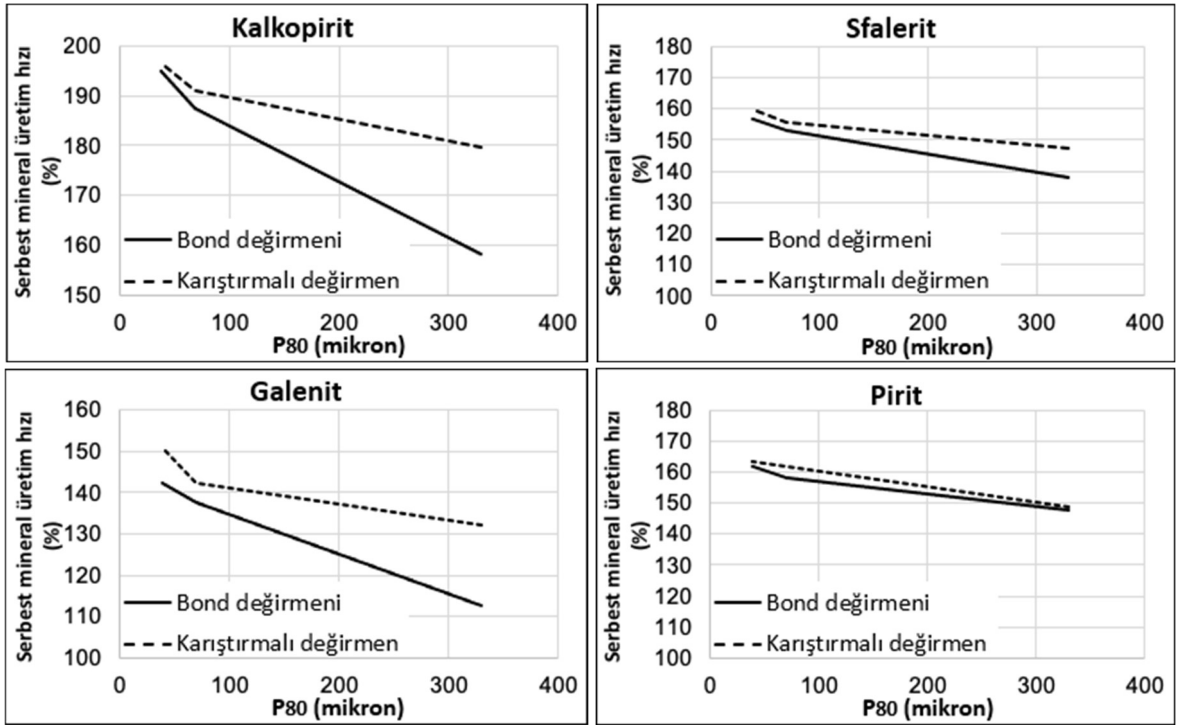
Şekil 4.44. Ürün boyutuna (P_{80}) göre ortalama serbestleşme derecesinin değişimi Şekilden hareketle, tüm mineraller için karıştırılmalı değirmene ait serbestleşme oranının bilyalı değirmendekilerine kıyasla daha yüksek olduğunu gözlemlenmektedir.

Yapılan diğer çalışmalarla bakır cevheri içerisindeki kalkopirit, pirit, sfalerit ve galenit minerallerine ait serbestleşme derecesi (%), tane boyu analizi (%) ve cevher içerisindeki mineral miktarı (%) verileri kullanılarak serbestleşen ağırlıkça mineral miktarı (%) da hesaplanmıştır (Ek 6). Elde edilen serbestleşen mineral miktarının (%) beslemeden olan farkı ile ürüne ait P_{80} değerlerine bağlı serbest mineral üretim hızları elde edilmiştir (Şekil 4.45).



Şekil 4.45. Serbest mineral üretim hızının mineral bazında karşılaştırılması

Şekilde görülebileceği üzere serbest mineral üretim hızı (%) ince tane boylarına inildikçe artmaktadır. Değerlendirmeler neticesinde kalkopirit mineralinin en fazla, galenit mineralinin ise en düşük üretim hızına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak farklı öğütme teknolojilerinin mineral bazlı karşılaştırılması da gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.46)

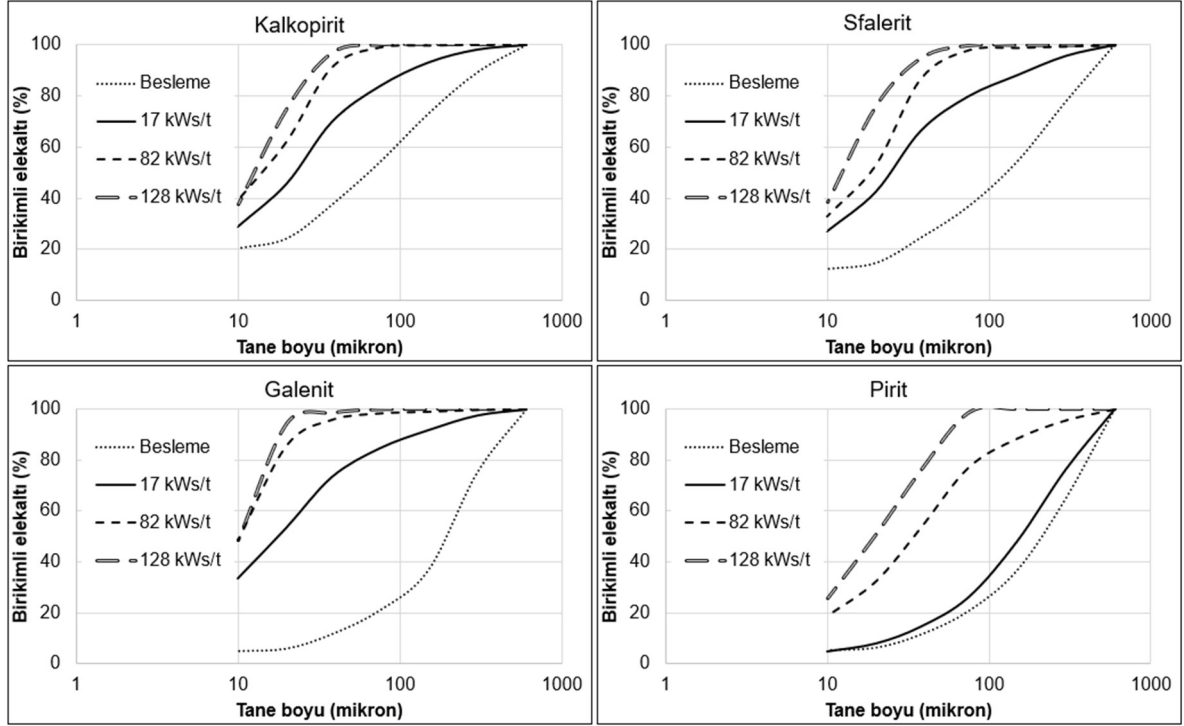


Şekil 4.46. Değirmenlerin serbestleştirilmiş mineral bazında karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlara göre farklı öğütme mekanizmalarının serbestleştirme derecesini etkilediği gibi serbest mineral miktarını da etkilediği açıkça görülmektedir. Bu bağlamda serbest mineral miktarları büyükten küçüğe kalkopirit, pirit, sfalerit ve galenit şeklinde sıralanmaktadır. Ayrıca karıştırmalı değirmen teknolojisinin, bilyalı değirmene kıyasla mineral fark etmeksizin daha yüksek serbest mineral değerine ulaştığı belirlenmiştir. Öğütme mekanizmalarındaki farklılıklar daha önce de

belirtildiği üzere; iri ve orta boylarda (-300+38 μm) daha belirgin iken, en ince boylarda (-38+10 μm) azalmaktadır.

Bakır cevherinin karıştırmalı değirmendeki öğütmesinde; serbestleşen ağırlıkça mineral dağılımları (Ek 6) kullanılarak, kümülatif (birikimli) dağılıma geçiş sağlamıştır (Ek 7). Bu veriler, karıştırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütmelerin enerji kullanımına bağlı değerlendirmelere olanak sağlamıştır (Şekil 4.47).



Şekil 4.47. Minerallerin kümülatif dağılımının enerji kullanımına bağlı değişimleri

Sonuç olarak, tüm mineraller için; enerji kullanımının artışına bağlı olarak serbest mineral miktarının daha ince elek aralıklarındaki artışı gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, bond bilyalı değirmende darbe, karıştırmalı bilyalı değirmende ise kesme ve basınç olmak üzere, farklı öğütme mekanizmalarını kullanan değirmenlerin, farklı işletme koşullarındaki denemeleri gerçekleştirilmiştir. Kalsit, manyetit, klinker ve bunların karışımları ile bakır cevheri kullanılarak gerçekleştirilen denemeler, aynı ürün boyu (P_{80}) üzerinden yapılan öğütme işlemlerinin boyut bazlı mineral davranımında farklılık yaratacağı hipotezi test edilmiştir. Bir diğer hipotezde ise karıştırmalı değirmende tekli öğütme ve çoklu bileşenli öğütme işlemlerinde farklılık görüleceğinin üzerinde durulmuştur. Böyle bir çalışma literatürde bulunmamaktadır.

Çalışmanın ilk adımını oluşturan, her iki değirmende kalsit, manyetit ve klinker malzemelerin tekli olarak gerçekleştirilen öğütmeleri incelendiğinde; karıştırmalı değirmendeki eşit öğütme sürelerinde, malzeme türü ve özellikleri fark etmeksizin, kullanılan bilya çapının küçülmesiyle ürün incelmektedir. Küçük çaplı bilyaların büyüklerine kıyasla oluşturduğu bu etkinin, yüksek çarpışma sayısına bağlı olduğu öngörülmektedir. Aynı çalışmaların yürütüldüğü bilyalı değirmendeki öğütme sonuçlarında ise, değirmen doluluğunun artışı ile paralel olarak artacak değirmen enerjisi gözlemlenmiştir. Buna rağmen söz konusu değişken bilya doluluk oranlarının benzer özgül enerji tüketimine sahip olacağından dolayı; aynı öğütme eğilimleri gözlemlenmiş ve aynı süreli öğütmelerde benzer ürün inceliklerine ulaşılmıştır. Bilyalı değirmende gerçekleştirilen öğütmelere ait tane boyu dağılımları incelendiğinde, en kolay öğütülebilen malzemenin kalsit, en zor öğütülen malzemenin ise manyetit olduğu görülmüştür. Aynı öğütme sürelerinde en ince tane boyu dağılımları, kalsit için %20 bilya doluluğunda elde edilirken, manyetit, klinker, kalsit-manyetit ve kalsit-klinker karışımları için %25 bilya doluluğunda elde edilmiştir. Bunlara ek olarak değirmenlerde aynı ürün özelliklerine ulaşmak için gerekli olan öğütme süreleri göz önüne alındığında, bilyalı değirmende karıştırmalı değirmene kıyasla daha yoğun bir özgül enerji tüketimi söz konusu olmuştur.

Çalışmanın kalsit, manyetit ve klinker malzemelerinin karışımları ile gerçekleştirilen öğütmelerin yer aldığı ikinci aşamasında; her iki değirmende de farklı öğütülebilirliklere sahip iki malzemenin bir arada öğütülmesinin seçici bir öğütme meydana getirdiğini, bu işlemin üründeki malzemelere ait tane boyu dağılımını

genişlettiği belirlenmiştir. Öte yandan öğünme özelliklerine bağlı olarak bileşen davranımının farklılaştığı; kalsit ile karışımlarında, kalsite kıyasla daha sert olan klinker ve manyetit malzemelerinin iri elek aralıklarında, diğerlerine kıyasla yüksek öğütülebilirliğe sahip, yumuşak olan kalsitin ise daha alt elek aralıklarında biriktiği ve karışımdaki kalsitin, tekli kalsit öğütmesine oranla daha iyi öğütölmüş olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yüksek sertliğe sahip mineral parçacıklarının bilya yüzeylerini temizleyerek daha verimli bir çarpışma ortamı sağlaması, yumuşak mineralin daha iyi öğütölmüne katkı sağladığı düşünölmektedir. Böylece sert malzemenin bir nevi öğütme yardımcısı gibi davrandığı öngörölmektedir. Bilyalı değirmende tek başına öğütölen klinker ve manyetitin tane boyu dağılımlarının kalsit ile beraber öğütöldüklerinden daha iri olduğu tespit edilmiştir. Farklı öğütülebilirliklere sahip iki malzemenin bir arada öğütölmüleriyle, değirmen içinde anlık olarak iri boyda zor öğütölen malzemenin, iri boyda kolay öğütölen malzemeye kıyasla daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Böylece bilyalar ile çarpışma olasılığı daha yüksek olan iri tanelerin ince tanelere kıyasla daha fazla öğütölmüş olmasıyla seçimli bir öğütme meydana gelmiştir. Karıştırmalı değirmende ise bilyalı değirmendekinin aksine, kalsitle beraber öğütölmelerinde; klinkerin tek başına öğütölmünün daha ince, manyetitin ise bilyalı değirmendekine benzer olarak daha iri olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan her iki değirmende bileşenlerin indirgeme oranları da hesaplanarak; tüm öğütme sürelerinde kalsite ait indirgeme oranlarının, kalsitten daha sert olan diğer bileşenlerin indirgeme oranlarına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak, kalsit-manyetit karışımı ile gerçeleştirilen çalışmalarda; karıştırmalı değirmen öğütmelerinde bilyalı değirmendeki öğütmelere kıyasla, 20 µm altı tane boyutlarındaki hem kalsit hem de manyetit yoğunluğu daha yüksek değerlere sahipken, daha üst boylardaki dağılımlarda bilyalı değirmene ait dağılım değerler daha yüksektir. Ayrıca karıştırmalı değirmen öğütmelerinin 20 µm altı fraksiyondaki kalsit ve manyetit miktarı, değirmende kullanılan bilya çapının azalmasıyla da artan bir eğilim göstermektedir. Kalsit-klinker karışımı ile gerçeleştirilen çalışmalarda ise, ikinci öğütme süreleri sonunda kalsit-manyetit karışımından elde edilen sonuçlar ile aynı olacak şekilde; kalsit dağılımının, 20 µm altı fraksiyonlarda karıştırmalı değirmene ait sonuçlarda, 20 µm üstü fraksiyonlarda ise bilyalı değirmene ait sonuçlarda daha yoğun olduğu sonucuna ulaşılmış, klinker dağılımında ise değirmenlerin değişken işletim parametrelerine göre ölçölebilen bir davranım gözlemlenememiştir. Öyle ki karıştırmalı değirmendeki ikinci öğütme

süresi sonunda, çalışmanın diğer sonuçlarının aksine; 20 µm altı fraksiyonda, nispeten daha iri bilya ile daha yüksek bir klinker dağılımına ulaşılrken, karıştırmalı değirmende 1,5 mm bilya ile gerçekleştirilen öğütmede bilyalı değirmenden elde edilene göre benzer bir dağılım elde edilmiştir. Bu durum, karışım içerisindeki kalsitin doğasına; daha ince boyut aralıklarında topaklaşma ve yüksek akışkanlık eğilimine atfedilebilir, bu da öğütme yardımcısı kullanılmasına karşın öğütme verimini bozmuştur. Klinker dağılımlarından çıkarımlarla 129 µm P₈₀ değerindeki ürün boyu üzerinde bond bilyalı değirmen, alt ürün boylarında ise karıştırmalı değirmen daha ince bir tane boyu dağılımı sağlamıştır. Bu sonuçlar göstermektedir ki, karışım içindeki sert bileşenleri (manyetit ve klinker) öğütmek için bilyalı değirmene ait öğütme mekanizması (darbe) daha etkiliyken, karışımlar içindeki kalsiti öğütmek için karıştırmalı değirmende kullanılan öğütme mekanizması (aşındırma ve sıkıştırma) daha etkilidir. Öte yandan kalsit-manyetit karışımı sonuçlarına bakıldığında kalsit dağılımının 20 µm altı fraksiyonundaki yoğunluğu aynı zamanda 300 µm üzerindeki fraksiyonda da kendini göstermektedir. Bu vesileyle bu enerji seviyesindeki karıştırmalı değirmen öğütme ortamının, daha iri malzemelerin öğütülmesi için iyileştirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Karıştırmalı ve bilyalı değirmende, bakır numunesinin öğütülmesiyle elde edilen ürünler üzerinde gerçekleştirilen MLA çalışmasına ait değerlendirmelerin yer aldığı, çalışmanın son aşamasında, bakır cevheri içerisindeki minerallerin fraksiyonel dağılımları incelenmiştir. Pirit mineralinin 38 µm üstü fraksiyonlardaki dağılımının, ilk öğütme süresi sonunda karıştırmalı değirmene ait sonuçlarda, son öğütme süresi sonunda ise bilyalı değirmene ait sonuçlarda daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. 38 µm altı fraksiyonlarda ise ilk öğütme süresi sonunda bilyalı değirmene ait sonuçlarda, ikinci öğütme süresi sonunda karıştırmalı değirmene ait sonuçlarda daha yoğun ve son öğütme süresi sonunda ise her iki değirmendeki sonuçlarda benzer olacak şekildeki görüntüsü ile, pirit dağılımının öğütme süresine bağlı değişkenliği ortaya çıkarılmıştır. Kalkopirit, sfalerit ve galenit mineralleri ise, her iki değirmende de kendi içerisinde benzer dağılım değerleri göstermekte ve öğütme süresinin artışına bağlı olarak iri fraksiyonlardan ince fraksiyona doğru artan bir tane boyu dağılım eğilimi ortaya koymaktadır. Ayrıca karıştırmalı değirmene ait sonuçlarda bilyalı değirmene ait sonuçlara kıyasla, özellikle kalkopirit ve galenit minerallerinin 38 µm üstü fraksiyonlarında gözlemlenen düşük serbestleşme

değerleri ve nispeten daha yüksek kenetli mineral dağılımları, karıştırmalı değirmenin üst fraksiyonlardaki düşük performansını ortaya koymaktadır. Bunlara ek olarak serbest mineral miktarları büyükten küçüğe kalkopirit, pirit, sfalerit ve galenit şekilde sıralanmaktadır. Ayrıca karıştırmalı değirmen teknolojisinin, bilyalı değirmene kıyasla mineral fark etmeksizin daha yüksek serbest mineral değerine ulaştığı belirlenmiştir.

Bu çalışmayla, kullandıkları farklı öğütme mekanizmaları ile birbirlerinden ayrılan karıştırmalı bilyalı ve bond bilyalı değirmenlerin, öğütme performansları ve beslemeyi oluşturan bileşenlerin üründeki fraksiyonel dağılımları incelenmiştir. Sonuç olarak aynı ürün boyu üzerinden yapılan öğütme çalışmaları ile, değirmenlerin; boyut bazlı mineral dağılımında farklı davranımlar sergilediği ortaya çıkarılmıştır. Böylece çalışmanın amacı ve hedefi olan öğütme teknolojisindeki farklılık da belirgin bir şekilde ortaya konulmuştur. Ayrıca farklı minerallerin bir arada öğütülmeleri ile ayrı ayrı öğütülmeleri arasında farklar olduğu ve minerallerin birbirleri üzerinde farklı etkiler yarattığı anlaşılmıştır. Bu durum öğütme ekipmanlarının model yapılarının oluşturulması için yapılan çalışmalarda; beslemenin homojen bir yapı olarak değerlendirilmektense, farklı mineralleri içerisinde barındıran bir yapı izlenimi ile yola çıkılarak çok bileşenli model yapılarının geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu tip bir model yapısı ile sadece öğütme ekipmanına ait verimlilik değil, aynı zamanda malzemenin tesis boyunca zenginleştirme davranımı da kontrol edilmiş olacaktır.

6. ÖNERİLER

Öğütme ekipmanlarının model yapıları oluşturulurken, besleme homojen tek bir yapıymış gibi düşünülmeden, cevherlerin farklı minerallerden oluştuğu göz önünde tutularak, çok bileşenli model yapılarının oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle öğütme devrelerinde, her bir mineralin davranımı özellikle tesis planlaması, dizaynı, fizibilitesi ve optimizasyonu aşamalarında takip edilerek ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Böylelikle, öğütme işlemlerinden sonra yapılacak olan zenginleştirme işlemleri için en uygun besleme hazırlanarak sadece öğütme devrelerinin değil aynı zamanda zenginleştirme devrelerinin de verimliliğini göz önünde bulunduracak çalışmalara odaklanılmalıdır. Ayrıca tüm bunların dikkate alınarak oluşturulduğu bir model yapısı, simülasyon çalışmalarının tutarlılığını iyileştirmede yardımcı olacak dolayısıyla gerçek operasyonlardaki dalgalanmaların öngörülebilirliğini arttıracaktır. Çalışma sonuçlarının zenginleştirme işlemi içerisindeki bileşen davranımının da eklenerek tamamlanması önerilmektedir.

Serbestleşme verileri önemli bilgiler sunmaktadır. Serbest ve serbest olmayan mineraller olarak yapılacak değerlendirmede mineral bazlı model yapısının geliştirilmesi önerilmektedir. Bu bağlamda, enerji ve serbestleşme dağılım fonksiyonu tanımlanabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Jeswiet, J., & Szekeres, A. (2016). Energy consumption in mining comminution. *Procedia CIRP*, 48, 140-145.
- [2] Batterham, R. (2011). Trends in comminution driven by energy. *Advanced Powder Technology*, 22(1), 138-140.
- [3] Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042-2060.
- [4] Değim, Z. (2009). Öğütme. *Modern Farmasötik Teknoloji*, TEB Eczacılık Akademisi Yayını No 1, 18.
- [5] Herbst, J., & Chairman, A. (1981). Comminution and energy conservation. Department of Energy, National Advisory Board, Committee.
- [6] Kapur, P. C., Verma, R., Velamakanni, B. V., & Fuerstenau, D. W. (1992). Simulation of locked-cycle grinding of multicomponent feeds and its implications for stability and control of industrial comminution circuits. *Powder technology*, 69(1), 77-84.
- [7] Bueno, M., Shi, F. N., Kojovic, T., & Powell, M. (2010). Investigation on multicomponent semi-autogenous grinding. XXV International Mineral Processing Congress 2010, IMPC 2010 (Vol. 1, pp. 611-618). Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- [8] Difen, L. U., Longzhong, T., Ning, L., & Haipeng, H. (2005). Grinding characteristics of multi-component cement-based material. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 20(1), 126-129.
- [9] Hosten, C., & Avsar, C. (1998). Grindability of mixtures of cement clinker and trass. *Cement and concrete research*, 28(11), 1519-1524.
- [10] Tsvilis, S., Voglis, N., & Photou, J. (1999). A study of the intergrinding of clinker and limestone. *Minerals Engineering*, 12(7), 837-840.
- [11] Tavares, L. M., & Kallembach, R. D. (2013). Grindability of binary ore blends in ball mills. *Minerals Engineering*, 41, 115-120.
- [12] Abouzeid, A. Z. M., & Fuerstenau, D. W. (2009). Grinding of mineral mixtures in high-pressure grinding rolls. *International Journal of Mineral Processing*, 93(1), 59-65.
- [13] Dündar, H., & Benzer, H. (2015). Investigating multicomponent breakage in cement grinding. *Minerals Engineering*, 77, 131-136.

- [14] Vari, A. (2004). Raw materials preparation and forming of ceramic tiles. Sala, Modena, Italy.
- [15] Gökçen, H. S. (2010). Sodyum feldispatın karıştırmalı bilyeli değirmende kuru olarak çok ince boyuta öğütülebilirliğinin araştırılması (Master's thesis, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [16] Wills, B. A., (1985), Mineral Processing Technology, 3rd Edition, Grinding Mills, 182-231.
- [17] Skinner, B. J. (1984). Second iron age ahead. The Scientific Research Society: New Haven, CT, United States, 258-269.
- [18] Yokoyama, T., & Inoue, Y. (2007). Selection of fine grinding mills. Handbook of powder technology, 12, 487-508.
- [19] Chelgani, S. C., Parian, M., Parapari, P. S., Ghorbani, Y., & Rosenkranz, J. (2019). A comparative study on the effects of dry and wet grinding on mineral flotation separation—a review. Journal of Materials Research and Technology, 8(5), 5004-5011.
- [20] Chen, X., Peng, Y., & Bradshaw, D. (2014). The effect of particle breakage mechanisms during regrinding on the subsequent cleaner flotation. Minerals Engineering, 66, 157-164.
- [21] King, R. P. (1994). Comminution and liberation of minerals. Minerals Engineering, 7(2-3), 129-140.
- [22] Mütze, T., & Husemann, K. (2008). Compressive stress: Effect of stress velocity on confined particle bed comminution. Chemical Engineering Research and Design, 86(4), 379-383.
- [23] Wills, B. A., & Atkinson, K. (1993). Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies. Minerals engineering, 6(7), 697-706.
- [24] Kursun I., Terzi M., (2018) Investigation of effects of different grinding systems in grinding of quartz, 16th International Mineral Processing Symposium, October 23-25 Antalya, ResearchGate.
- [25] Gao, M., & Forssberg, E. (1995). Prediction of product size distributions for a stirred ball mill. Powder Technology, 84(2), 101-106.
- [26] E.G. Kelly, D.J. (1982) Spottiswood, Introduction to mineral processing, John Wiley, The Australian Mineral Foundation, Chapters 2,3,4,5,6,7.
- [27] Epstein, B. (1948). Logarithmico-normal distribution in breakage of solids. Industrial & Engineering Chemistry, 40(12), 2289-2291.
- [28] Little, L., Mainza, A. N., Becker, M., & Wiese, J. (2017). Fine grinding: How mill type affects particle shape characteristics and mineral liberation. Minerals Engineering, 111, 148-157.

- [29] Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (Eds.). (2003). Principles of mineral processing, Chapters 2,4,6,7.
- [30] Hogg, R. (1999). Breakage mechanisms and mill performance in ultrafine grinding. Powder Technology, 105(1-3), 135-140.
- [31] Ye, X., Gredelj, S., Skinner, W., & Grano, S. R. (2010). Evidence for surface cleaning of sulphide minerals by attritioning in stirred mills. Minerals Engineering, 23(11-13), 937-944.
- [32] Palaniandy, S., Khairun A., Mohd A. (2009). Mechanochemical effects on talc during fine grinding process in a jet mill. International Journal of Mineral Processing 92.1-2, 22-33.
- [33] Suherman, P. M., van Riessen, A., O'Connor, B., Li, D., Bolton, D., & Fairhurst, H. (2002). Determination of amorphous phase levels in Portland cement clinker. Powder Diffraction, 17(3), 178-185.
- [34] Jørgensen, S. W. (2005). Cement grinding - A comparison between vertical roller mill and ball mill. Cement Int, 2, 54-63.
- [35] Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T. (1996). Mineral comminution circuits: their operation and optimisation. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- [36] Sheppard, L. M. (1999). Optimizing grinding media & milling performance. ceramic industry, 149(4), 51-60.
- [37] Dökme, F., & Güven, O. (2014). Bilyalı değirmenlerde hızın performansa olan etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. Engineer & the Machinery Magazine, 657.
- [38] Harris, C. C. (1965). On the rate of energy in comminution: a review of physical and mathematical principles. Transaction IMM, 37-57.
- [39] Harris, C. C. (1963). Comminution: a modified logistic growth function. nature, 197(4865), 371-371.
- [40] Moosakazemi, F., Mohammadi, M. T., Mohseni, M., Karamoozian, M., & Zakeri, M. (2017). Effect of design and operational parameters on particle morphology in ball mills. International Journal of Mineral Processing, 165, 41-49.
- [41] Erdem, A. S., Ergün, Ş. L., & Benzer, A. H. (2007). Modelleme ve simülasyon yardımıyla çimento öğütme devresi tasarımı ve kameralı bilyalı değirmen seçimi. Bilimsel Madencilik Dergisi, 46(4), 21-30.
- [42] Schnatz, R., & Knobloch, O. (2000). Influence of the ball filling factor on the power consumption and throughput of ball mills in combined grinding plants. ZKG international, 53(8), 438-512.

- [43] Duda, W. H., & Book, C. D. (1985). International Process Engineering in the cement industry. Cement-Data-Book, 1, 1997-157.
- [44] Hosseinzadehgharehgheshlagh, H. (2014). Bilyalı değirmenlerde ölçek büyütme üzerine bir inceleme. (Master's thesis, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [45] Austin, L. G., Klimpel, R. R., & Luckie, P. T. (1984). Process engineering of size reduction: ball milling, Soc. Min. Eng. AIME, New York, NY, 421-561.
- [46] Shoji, K., Austin, L. G., Smaila, F., Brame, K., & Luckie, P. T. (1982). Further studies of ball and powder filling effects in ball milling. Powder Technology, 31(1), 121-126.
- [47] Rothfuchs, M., Brunelle, M., Stoiber, W. Dumont, D., (1993). Lafarge Mill Grinding Reference, 2nd Edition, Volume 3: Process methods and Theories, Section C: Ball Charge Design, 46-121.
- [48] Ferrari, R. (1985). Handbook for Ball Mill Grinding. Editor; Faenza Editrice, 1-133.
- [49] Erdem, A. S., & Ergün, Ş. L. (2009). The effect of ball size on breakage rate parameter in a pilot scale ball mill. Minerals Engineering, 22(7-8), 660-664.
- [50] Jain, S. K. (1987), Ore Processing, A. A. Balkema, Rotterdam, 1-102.
- [51] Bond, F. C. (1960). Three principles of comminution. In Mining Congress Journal, 53-56.
- [52] Austin, L. G. (1984). Concepts in process design of mills. Mining engineering, 36(6), 628-635.
- [53] Klimpel, R.R. (1997). Introduction to the Principles of Size reduction of Particles by Mechanical Means, Instructional Module Series, Particle Science Technology, Florida, USA, 41.
- [54] Toprak, N. A., Altun, O., & Benzer, A. H. (2018). The effects of grinding aids on modelling of air classification of cement. Construction and Building Materials, 160, 564-573.
- [55] Stehr, N. (1988). Recent developments in stirred ball milling. International Journal of Mineral Processing 22 (1-4), pp. 431-444.
- [56] Norman, J. E., & Ralston, O. C. (1939). Conditioning surfaces for froth flotation. Trans. AIME, 134, 42-65.
- [57] Herbst, J. A., & Sepulveda, J. L. (1978). Fundamentals of fine and ultrafine grinding in a stirred ball mill. International Powder and Bulk Solids Handling and Processing: Proceedings held Rosemount Illinois, 16-18.

- [58] Jankovic, A. (2003). Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. *Minerals Engineering*, 16(4), 337-345.
- [59] Kemal, M., Çiçek, T. (1996). İnce ve çok ince öğütme. 21. Yüzyıla Girerken Türkiye Madencilik Sempozyumu, 20-22 Haziran, Sivas, Bildiri Kitabı, 97-111.
- [60] Kwade, A., & Schwedes, J. (2002). Breaking characteristics of different materials and their effect on stress intensity and stress number in stirred media mills. *Powder Technology*, 122(2-3), 109-121.
- [61] Mankosa, M. J., Adel, G. T., & Yoon, R. H. (1986). Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal. *Powder technology*, 49(1), 75-82.
- [62] Underle, U., Woodall, P., Duffy, M., & Johnson, N. W. (1997). Stirred mill technology for regrinding McArthur River and Mount Isa zinc/lead ores. *Proceedings of XX IMPC—Aachen*, 21-26.
- [63] Lorici, L., & Contoli, L. (1995). Raw materials preparation: new developments in wet grinding. *Ceramica Acta*, 7(4), 5-14.
- [64] Shi, F., Morrison, R., Cervellin, A., Burns, F., & Musa, F. (2009). Comparison of energy efficiency between ball mills and stirred mills in coarse grinding. *Minerals Engineering*, 22(7-8), 673-680.
- [65] Altun, O., Benzer, H., & Enderle, U. (2013). Effects of operating parameters on the efficiency of dry stirred milling. *Minerals Engineering*, 43, 58-66.
- [66] Pilevneli, C. C., Kızgut, S., Toroğlu, İ., Çuhadaroğlu, D., & Yiğit, E. (2004). Open and closed-circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical stirred mill. *Powder Technology*, 139(2), 165-174.
- [67] Lofthouse, C. H., & John, F. E. (1999). The Svedala detritor and the metals industry. *Minerals Engineering* 12 (2), 205-217.
- [68] Sepulveda, J., 1981. A detailed study of stirred ball milling. University of Utah, Salt Lake City, Utah, 121-255.
- [69] Altun, O. (2013). Investigation of dry horizontal stirred milling applications for cement grinding circuits. (Doctoral thesis, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [70] Pilevneli, C.C., Khairun A., & Mohd Azizli (1999). Semi-batch dry grinding tests of a pilot scale vertical stirred mill. *Proceedings of VIII Balkan Mineral Processing Conference*. Belgrade, Yugoslavia, 62,69.
- [71] Celep, O., Aslan, N., Alp, İ., & Taşdemir, G. (2011). Optimization of some parameters of stirred mill for ultra-fine grinding of refractory Au/Ag ores. *Powder Technology*, 208(1), 121-127.

- [72] Szegvari, A., Yang, M., & Szegvari, A. (1999). Attritor grinding and dispersing equipment. Union Process Inc., Akron, Ohio, 311-345.
- [73] Wang, Y., Forssberg, E., & Sachweh, J. (2004). Dry fine comminution in a stirred media mill - MaxxMill®. *International Journal of Mineral Processing*, 74, 65-74.
- [74] Dürr, H.M. (2002). Maxxmill® - The alternative to the drum mill. 10th European Symposium on Comminution, 2-5 September, Heidelberg, Germany, 2002, 12-31.
- [75] Tuzun, M. A. (1993). A study of comminution in a vertical stirred ball mill (Doctoral dissertation, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [76] Altun, O., Benzer, H., & Enderle, U. (2014). The effects of chamber diameter and stirrer design on dry horizontal stirred mill performance. *Minerals Engineering*, 69, 24-28.
- [77] Strasser, S., Somani, R. A., & Dembla, A. K. (1997). Improvements in the production of raw meal and cement by the combined use of roller press and V-separator. *Cement-Talc-Gips International*, 50(3), 140-147.
- [78] Zheng, J., Harris, C. C., & Somasundaran, P. (1996). A study on grinding and energy input in stirred media mills. *Powder Technology*, 86(2), 171-178.
- [79] Molls, H. H. & Hornel, R. (1972). DECHEMA - Monography 69 TI 2, 631-661.
- [80] Mankosa, M. J., Adel, G. T., & Yoon, R. H. (1989). Effect of operating parameters in stirred ball mill grinding of coal. *Powder Technology*, 59(4), 255-260.
- [81] Gao, M. W., & Forssberg, E. (1993). A study on the effect of parameters in stirred ball milling. *International Journal of Mineral Processing*, 37(1-2), 45-59.
- [82] Sadler III, L. Y., Stanley, D. A., & Brooks, D. R. (1975). Attrition mill operating characteristics. *Powder Technology*, 12(1), 19-28.
- [83] Yue, J., & Klein, B. (2006). Effects of bead size on ultrafine grinding in a stirred bead mill. *Advances in comminution*, 87-98.
- [84] Gökçen, H. S., Cayirli, S., Ucbas, Y., & Kayaci, K. (2012). Dry grinding of sodium feldspar in a stirred ball mill. XIIIth International Mineral Processing Symposium, Muğla, Turkey, 21-27.
- [85] Fadhel, H. B., & Frances, C. (2001). Wet batch grinding of alumina hydrate in a stirred bead mill. *Powder Technology*, 119(2-3), 257-268.
- [86] Conley, R.F., Malghan, S.G. & Somasundaran P. (1983). Ultrafine grinding and separation of industrial minerals. Society of Mechanical Engineers/American Institute of Chemical Engineers, New York, 37-48.

- [87] He, M., & Forssberg, E. (2007). Influence of slurry rheology on stirred media milling of quartzite. *International Journal of Mineral Processing*, 84(1-4), 240-251.
- [88] Toraman, O. Y., & Katircioglu, D. (2011). A study on the effect of process parameters in stirred ball mill. *Advanced Powder Technology*, 22(1), 26-30.
- [89] Gao, M. W., Holmes, R. J., & Pease, J. (2006). The latest developments in fine and ultrafine grinding technologies. XXIII. International Mineral Processing Congress, İstanbul, Turkey, 30-37.
- [90] Persson, H., & Forssberg, E. (1994). Fine grinding of a magnetite ore with a stirred ball mill. *Aufbereitungs-Technik (Germany)*, 35(6), 307-312.
- [91] Cho, H., & Hogg, R. (1995). Breakage parameters for ultrafine grinding in stirred-media mills. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, CO (United States), 53-57.
- [92] Altun, O., Benzer, H., Toprak, A., & Enderle, U. (2015). Utilization of grinding aids in dry horizontal stirred milling. *Powder Technology*, 286, 610-615.
- [93] Somasundaran, P., & El-Shall, H. (1983). Mechanochemical effects in ultrafine grinding. *Ultrafine Grinding and Separation of Industrial Minerals*. AIME Society of Mining Engineers, New York, 21-33.
- [94] Zheng, J., Harris, C. C., & Somasundaran, P. (1997). The effect of additives on stirred media milling of limestone. *Powder Technology*, 91(3), 173-179.
- [95] Choi, H., Lee, W., Kim, D. U., Kumar, S., Kim, S. S., Chung, H. S., ... & Ahn, Y. C. (2010). Effect of grinding aids on the grinding energy consumed during grinding of calcite in a stirred ball mill. *Minerals Engineering*, 23(1), 54-57.
- [96] Paramasivam, R., & Vedaraman, R. (1992). Effects of the physical properties of liquid additives on dry grinding. *Powder technology*, 70(1), 43-50.
- [97] Türk Standardı, TS EN 196-4, Katkı miktarı tayini.
- [98] Pérez-García, E. M., Bouchard, J., & Poulin, É. (2019). Simulation analysis of a mineral liberation estimator for control purposes. *IFAC-PapersOnLine*, 52(14), 123-128.
- [99] Çolak, S.S., Altun O., Benzer, A.H., Gencer, Z., Kocak, H., 2018. Development of a preliminary media wear measurement test procedure for cement ball milling applications. *Powder Technology* (325), 678-686.
- [100] Gates, J.D., Dargusch, M.S., Walsh, J.J., Field, S.L., Hermand, M.J., Delaup, B.G., Saad, J.R. 2008. Effect of abrasive mineral alloy performance in the ball mill abrasion test, *Wear* (265), 865-870.

EKLER

Ek 1. Bond değirmende gerçekleştirilen öğütme işlemleri sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları

(a) Tekli kalsit öğütmelerine ait tane boyu dağılımları

Boyut (μm)	%100 KALSİT												
	Doluluk	%20 Doluluk				%25 Doluluk				%30 Doluluk			
	Besleme	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	96.69	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	87.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
850	76.43	99.98	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.98	100.00	100.00	100.00
600	64.00	99.95	100.00	100.00	100.00	99.97	100.00	100.00	100.00	99.95	100.00	100.00	100.00
425	51.83	99.90	100.00	100.00	100.00	99.92	100.00	100.00	100.00	99.86	100.00	100.00	100.00
300	40.27	99.71	100.00	100.00	100.00	99.69	100.00	100.00	100.00	98.72	100.00	100.00	100.00
150	25.57	90.84	99.70	100.00	100.00	89.92	99.50	100.00	100.00	86.38	99.20	99.70	100.00
75	15.14	66.61	90.30	98.30	100.00	66.10	87.50	98.00	100.00	63.49	85.40	97.70	100.00
53	11.32	56.34	80.00	92.80	99.40	54.93	75.70	92.10	99.20	52.81	73.80	90.80	99.60
38	8.78	48.06	67.60	83.80	94.50	47.05	65.80	83.30	93.50	44.99	64.10	82.00	93.60
20	4.63	30.91	45.30	59.80	71.30	30.70	44.90	58.30	70.50	28.45	42.00	56.90	68.20

(b) Tekli manyetit öğütmelerine ait tane boyu dağılımları

Boyut (μm)	%100 MANYETİT												
	Doluluk	%20 Doluluk				%25 Doluluk				%30 Doluluk			
	Besleme	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	97.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	93.05	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
850	88.32	99.83	100.00	100.00	100.00	99.83	100.00	100.00	100.00	99.98	100.00	100.00	100.00
600	82.80	99.53	100.00	100.00	100.00	99.54	100.00	100.00	100.00	99.83	100.00	100.00	100.00
425	75.97	98.87	100.00	100.00	100.00	98.96	100.00	100.00	100.00	99.40	99.87	100.00	100.00
300	67.48	93.60	100.00	100.00	100.00	93.20	99.75	100.00	100.00	92.23	99.43	100.00	100.00
150	51.76	68.89	85.70	98.90	100.00	68.41	88.48	99.10	99.80	69.36	83.02	98.60	99.60
75	37.72	49.14	58.70	79.90	98.80	49.58	62.34	80.70	98.60	50.08	60.06	78.40	97.40
53	31.38	41.37	49.10	68.00	89.80	41.38	52.27	68.30	90.60	41.87	49.72	65.70	88.70
38	24.83	35.10	41.70	58.10	79.10	34.67	44.29	58.10	80.70	35.14	42.56	56.40	78.30
20	13.90	20.59	26.80	36.10	52.90	20.78	27.53	36.70	53.60	20.75	26.85	36.40	51.40

(c) Tekli klinker öğütmelerine ait tane boyu dağılımları

Boyut (μm)	%100 KLİNKER												
	Doluluk	%20 Doluluk				%25 Doluluk				%30 Doluluk			
	Besleme	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	95.47	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	84.77	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
850	74.37	99.94	100.00	100.00	100.00	99.98	100.00	100.00	100.00	99.98	100.00	100.00	100.00
600	65.28	99.90	100.00	100.00	100.00	99.94	100.00	100.00	100.00	99.95	100.00	100.00	100.00
425	57.43	99.50	100.00	100.00	100.00	99.67	100.00	100.00	100.00	99.46	100.00	100.00	100.00
300	50.10	96.82	100.00	100.00	100.00	97.30	100.00	100.00	100.00	95.12	100.00	100.00	100.00
150	40.43	75.42	96.80	100.00	100.00	75.31	96.80	100.00	100.00	72.48	95.80	100.00	100.00
75	30.31	55.77	74.10	97.30	100.00	55.27	75.00	97.00	100.00	53.36	73.70	96.10	100.00
53	24.75	46.67	62.30	87.80	99.40	46.51	63.50	88.70	99.10	44.80	62.40	86.50	98.80
38	20.09	38.44	52.60	76.00	95.80	38.82	54.10	78.40	95.00	37.38	52.30	74.80	94.50
20	10.17	22.56	30.50	46.10	66.40	22.09	32.30	47.40	64.70	21.59	32.60	46.90	65.00

(d) Kalsit ve manyetit karışımına ait tane boyu dağılımları

%50 KALSİT - %50 MANYETİT													
Boyut (μm)	Doluluk	%20 Doluluk				%25 Doluluk				%30 Doluluk			
	Besleme	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	96.71	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	89.21	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
850	80.17	99.96	100.00	100.00	100.00	99.98	100.00	100.00	100.00	99.98	100.00	100.00	100.00
600	71.47	99.90	100.00	100.00	100.00	99.94	100.00	100.00	100.00	99.92	100.00	100.00	100.00
425	61.91	99.52	100.00	100.00	100.00	99.68	100.00	100.00	100.00	99.06	100.00	100.00	100.00
300	52.14	96.92	100.00	100.00	100.00	97.37	100.00	100.00	100.00	95.74	100.00	100.00	100.00
150	37.80	74.63	95.30	100.00	100.00	77.22	96.20	100.00	100.00	76.31	91.90	100.00	100.00
75	26.18	52.63	73.10	93.80	100.00	55.31	74.50	94.10	100.00	54.00	69.40	92.60	100.00
53	21.64	43.32	61.30	83.70	96.40	45.77	63.40	84.40	95.50	45.10	58.60	83.00	95.80
38	17.42	36.15	52.60	73.40	90.30	38.75	54.20	74.80	89.40	37.15	50.40	74.20	90.00
20	9.49	23.07	33.80	47.70	63.60	23.95	34.80	49.40	63.70	22.60	31.90	47.90	62.90

(e) Kalsit ve klinker karışımına ait tane boyu dağılımları

Boyut (μm)	%50 KALSİT + %50 KLİNKER												
	Doluluk	%20 Doluluk				%25 Doluluk				%30 Doluluk			
	Besleme	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	95.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	85.33	99.98	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.94	100.00	100.00	100.00
850	74.09	99.93	100.00	100.00	100.00	99.98	100.00	100.00	100.00	99.90	100.00	100.00	100.00
600	63.26	99.90	100.00	100.00	100.00	99.94	100.00	100.00	100.00	99.85	100.00	100.00	100.00
425	53.10	99.83	100.00	100.00	100.00	99.85	100.00	100.00	100.00	99.67	100.00	100.00	100.00
300	43.95	99.34	100.00	100.00	100.00	99.31	100.00	100.00	100.00	98.77	100.00	100.00	100.00
150	32.26	84.38	99.60	100.00	100.00	85.54	99.50	100.00	100.00	79.61	98.90	100.00	100.00
75	22.41	61.36	85.10	98.50	100.00	63.37	86.30	98.60	100.00	57.19	82.40	97.90	100.00
53	18.11	50.58	73.10	92.00	98.60	52.94	75.20	93.10	98.90	47.61	70.90	90.80	98.60
38	14.24	41.62	62.00	81.70	94.10	43.83	63.50	83.20	94.60	39.21	60.40	80.50	93.30
20	7.34	25.95	40.70	56.10	70.50	27.03	42.50	57.00	71.40	24.50	38.50	54.40	68.60

(f) Bakır cevherine ait tane boyu dağılımları

BAKIR CEVHERİ					
%25 Doluluk					
Boyut (μm)	Besleme	15'	30'	60'	120'
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	88.95	99.91	100.00	100.00	100.00
1180	68.21	99.54	100.00	100.00	100.00
850	53.79	98.73	100.00	100.00	100.00
600	43.11	96.64	100.00	100.00	100.00
425	34.87	89.88	100.00	100.00	100.00
300	28.08	76.84	99.19	100.00	100.00
150	18.70	53.41	80.65	99.40	100.00
75	12.02	35.96	54.76	83.50	97.00
53	9.55	29.51	45.33	70.40	89.50
38	7.44	24.90	38.49	60.80	80.50
20	4.10	16.29	26.09	42.70	58.30

Ek 2. Karıştırırmalı değirmende gerçekleştirilen öğütme işlemleri sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları

(a) Tekli kalsit öğütmelerine ait tane boyu dağılımları

Boyut (μm)	%100 KALSİT													
	Bilya boyu	1.5 mm				2.5 mm					4.0 mm			
	Besleme	0.5 dk.	1 dk.	5 dk.	10 dk.	0.83 dk.	2 dk.	3.5 dk.	6 dk.	10 dk.	1 dk.	2 dk.	5dk.	10 dk.
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	96.69	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	87.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
850	76.43	98.60	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	64.00	96.40	100.00	100.00	100.00	98.40	100.00	100.00	100.00	100.00	97.80	100.00	100.00	100.00
425	51.83	93.40	98.80	100.00	100.00	95.20	98.20	100.00	100.00	100.00	92.80	97.00	100.00	100.00
300	40.27	89.80	97.00	100.00	100.00	91.00	94.80	100.00	100.00	100.00	87.00	93.20	100.00	100.00
150	25.57	83.20	92.20	100.00	100.00	81.20	85.60	95.80	100.00	100.00	72.20	80.80	97.20	100.00
75	15.14	75.40	83.80	96.80	100.00	70.80	74.00	90.00	97.60	100.00	57.80	65.20	92.20	100.00
53	11.32	69.40	75.20	89.80	100.00	63.00	66.60	81.60	93.40	100.00	50.40	55.40	82.60	96.00
38	8.78	61.60	66.00	81.40	96.40	54.60	57.20	69.40	84.00	95.40	43.80	47.00	73.40	84.80
20	4.63	43.40	47.00	59.00	73.20	37.00	37.60	49.60	58.20	69.20	28.60	30.80	53.60	63.00

(b) Tekli manyetit öğütmelerine ait tane boyu dağılımları

Boyut (μm)	%100 MANYETİT														
	Bilya boyu	1.5 mm				2.5 mm					4.0 mm				
	Besleme	1 dk.	4 dk.	5 dk.	10 dk.	0.67 dk.	0.83 dk.	5 dk.	6 dk.	10 dk.	2 dk.	5 dk.	6 dk.	10 dk.	12 dk.
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	97.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	93.05	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
850	88.32	100.00	100.00	100.00	100.00	98.20	99.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	82.80	99.00	99.00	100.00	100.00	95.20	96.60	100.00	100.00	100.00	97.80	100.00	100.00	100.00	100.00
425	75.97	96.80	97.39	98.80	100.00	90.60	92.60	100.00	100.00	100.00	92.80	98.80	100.00	100.00	100.00
300	67.48	92.80	95.19	97.00	100.00	86.20	88.20	97.60	99.20	100.00	86.60	95.00	98.20	100.00	100.00
150	51.76	82.40	90.38	93.20	100.00	74.80	76.80	91.40	95.60	100.00	74.80	87.40	91.20	99.60	100.00
75	37.72	69.00	80.96	84.60	100.00	59.80	61.80	81.00	87.00	100.00	60.40	75.00	80.80	98.00	100.00
53	31.38	59.80	71.34	75.00	94.20	50.80	52.40	69.80	74.40	91.40	52.00	64.60	68.60	86.60	94.40
38	24.83	49.00	61.12	64.00	81.20	40.40	41.40	58.20	62.80	77.00	43.80	52.80	56.20	72.80	80.80
20	13.90	29.60	40.88	42.40	55.60	24.40	25.00	39.00	40.40	50.80	26.40	33.80	36.40	47.40	52.20

(c) Tekli klinker öğütmelerine ait tane boyu dağılımları

		%100 KLİNKER													
		Bilya boyu			1.5 mm					2.5 mm			4.0 mm		
Boyut (μm)	Besleme	1 dk.	5 dk.	10 dk.	0.5 dk.	2 dk.	6 dk.	7 dk.	10 dk.	1 dk.	5dk.	10 dk.			
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
1700	95.47	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
1180	84.77	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
850	74.37	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
600	65.28	100.00	100.00	100.00	98.80	100.00	100.00	100.00	100.00	97.40	100.00	100.00			
425	57.43	98.20	100.00	100.00	93.40	100.00	100.00	100.00	100.00	93.20	100.00	100.00			
300	50.10	94.40	100.00	100.00	88.60	97.40	100.00	100.00	100.00	88.60	97.00	100.00			
150	40.43	87.60	100.00	100.00	77.80	91.00	100.00	100.00	100.00	78.40	89.80	100.00			
75	30.31	77.00	97.40	100.00	65.60	78.00	96.40	100.00	100.00	67.40	81.40	100.00			
53	24.75	67.60	89.80	100.00	58.20	69.60	90.00	94.60	98.60	59.20	72.20	97.00			
38	20.09	56.00	80.00	96.40	49.20	59.40	80.20	84.20	92.00	49.40	61.40	88.40			
20	10.17	33.60	56.40	68.80	31.60	38.40	56.60	59.00	66.80	32.20	41.40	64.80			

(d) Kalsit ve manyetit karışımına ait tane boyu dağılımları

%50 KALSİT - %50 MANYETİT										
Bilya boyu		1.5 mm			2.5 mm			4.0 mm		
Boyut (µm)	Besleme	1 dk.	5 dk.	10 dk.	0.83 dk.	6 dk.	10. dk	2 dk.	5 dk.	10 dk.
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	96.71	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	89.21	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
850	80.17	100.00	100.00	100.00	98.60	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	71.47	98.40	100.00	100.00	95.40	100.00	100.00	99.40	100.00	100.00
425	61.91	96.20	100.00	100.00	91.00	100.00	100.00	95.60	98.80	100.00
300	52.14	92.60	98.20	100.00	87.20	99.40	100.00	89.00	96.60	100.00
150	37.80	84.40	95.00	100.00	77.60	95.60	100.00	77.40	92.00	100.00
75	26.18	75.20	90.20	100.00	66.40	89.80	98.00	62.80	85.60	97.40
53	21.64	66.80	84.00	96.00	56.80	82.20	93.80	55.20	76.00	93.60
38	17.42	56.60	74.60	88.00	45.40	70.80	85.60	45.00	63.40	84.40
20	9.49	37.20	53.00	72.20	25.00	49.20	65.00	26.80	42.80	64.20

(e) Kalsit ve klinker karışımına ait tane boyu dağılımları

%50 KALSİT + %50 KLİNKER												
Boyut (μm)	Bilya boyu	1.5 mm			2.5 mm			4.0 mm				
	Besleme	1 dk.	5 dk.	10 dk.	2 dk.	6 dk.	10 dk.	1 dk.	3 dk.	5 dk.	7 dk.	10 dk.
2000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	95.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1180	85.33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
850	74.09	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
600	63.26	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	97.80	100.00	100.00	100.00	100.00
425	53.10	99.20	100.00	100.00	99.40	100.00	100.00	93.20	97.80	100.00	100.00	100.00
300	43.95	96.20	100.00	100.00	96.80	100.00	100.00	86.80	93.00	98.80	100.00	100.00
150	32.26	89.80	100.00	100.00	89.00	100.00	100.00	76.00	81.80	95.00	98.40	100.00
75	22.41	79.40	97.20	100.00	76.00	97.60	100.00	62.80	70.60	86.80	95.00	100.00
53	18.11	70.40	89.60	100.00	68.00	92.60	100.00	55.00	64.00	78.20	88.40	96.80
38	14.24	60.80	79.40	95.40	58.40	82.20	93.20	46.80	55.00	66.80	74.00	86.60
20	7.34	42.20	57.20	70.20	38.60	57.80	67.80	31.40	35.80	42.60	51.00	64.80

(f) Bakır cevherine ait tane boyu dağılımları

BAKIR CEVHERİ				
2.5 mm				
Boyut (μm)	Besleme	1.5 dk	7 dk	11 dk
2000	100.00	100.00	100.00	100.00
1700	88.95	100.00	100.00	100.00
1180	68.21	99.30	100.00	100.00
850	53.79	96.70	100.00	100.00
600	43.11	91.80	100.00	100.00
425	34.87	86.00	99.00	100.00
300	28.08	78.10	97.20	100.00
150	18.70	60.80	92.60	100.00
75	12.02	46.00	84.40	99.10
53	9.55	39.10	72.60	93.10
38	7.44	32.00	60.10	79.50
20	4.10	18.90	36.50	52.80

Ek 3. Bond değirmende öğütülen karışımlara ait kalsit analizi sonuçları

%50 KALSİT - %50 MANYETİT												
Doluluk	%20 Doluluk				%25 Doluluk				%30 Doluluk			
Süre	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.
Yığın	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
+300 µm	36.43	-	-	-	36.38	-	-	-	34.99	-	-	-
-300+150 µm	43.90	16.86	-	-	42.88	18.06	-	-	43.65	17.54	-	-
-150+75 µm	51.91	38.30	17.00	-	48.89	35.07	17.04	-	52.08	39.30	17.23	-
-75+150 µm	52.61	47.82	29.83	10.03	53.62	47.56	30.00	11.06	51.95	49.61	29.75	10.61
-53+38 µm	52.50	52.28	41.79	23.39	52.59	51.12	42.59	24.38	51.63	54.34	43.42	24.24
-38+20 µm	48.15	53.15	48.02	41.37	49.46	53.23	47.18	41.53	48.96	55.66	48.30	42.31
-20 µm	55.10	60.72	61.40	58.44	56.63	61.48	60.75	58.62	55.57	61.53	61.26	58.32

%50 KALSİT + %50 KLİNKER												
Doluluk	%20 Doluluk				%25 Doluluk				%30 Doluluk			
Süre	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.	15 dk.	30 dk.	60 dk.	120 dk.
Yığın	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
+300 µm	35.68	-	-	-	35.16	-	-	-	35.72	-	-	-
-300+150 µm	44.91	-	-	-	44.28	-	-	-	44.98	26.30	-	-
-150+75 µm	50.92	41.80	36.31	-	48.82	41.85	36.02	-	50.30	42.19	36.44	-
-75+150 µm	50.06	44.63	38.07	35.81	47.53	43.99	37.77	35.62	49.22	44.69	38.21	36.00
-53+38 µm	48.15	45.73	39.78	33.49	47.92	45.16	39.46	33.32	48.44	45.84	39.91	33.68
-38+20 µm	47.55	49.60	45.76	40.19	50.01	48.24	45.40	39.97	49.18	49.33	45.92	40.41
-20 µm	54.57	56.37	55.56	54.62	55.91	56.89	55.47	54.49	55.70	57.13	55.93	55.00

Ek 4. Karıştırmalı değirmende öğütülen karışımlara ait kalsit analizi sonuçları

%50 KALSİT - %50 MANYETİT									
Bilya boyu	1.5 mm			2.5 mm			4.0 mm		
Süre	1 dk.	5 dk.	10 dk.	0.83 dk.	6 dk.	10. dk	2 dk.	5 dk.	10 dk.
Yığın	46.42	47.37	46.68	47.98	45.43	46.62	46.94	46.21	47.56
+300 µm	54.20	-	-	52.01	-	-	53.47	-	-
-300+150 µm	31.68	19.58	-	27.42	19.73	-	30.26	19.67	-
-150+75 µm	23.72	10.43	-	27.84	12.77	3.79	25.10	11.84	3.94
-75+150 µm	29.90	11.65	5.63	34.25	13.81	5.00	31.35	12.94	5.11
-53+38 µm	28.64	32.84	34.42	38.88	38.95	37.77	32.05	36.50	38.46
-38+20 µm	36.02	32.99	23.63	40.94	32.76	23.86	37.66	32.85	24.33
-20 µm	52.31	55.81	51.13	53.60	56.88	52.48	52.74	56.45	53.51

%50 KALSİT + %50 KLİNKER											
Bilya boyu	1.5 mm			2.5 mm			4.0 mm				
Süre	1 dk.	5 dk.	10 dk.	2 dk.	6 dk.	10 dk.	1 dk.	3 dk.	5 dk.	7 dk.	10 dk.
Yığın	50.07	51.57	46.68	50.89	51.34	49.73	50.21	50.35	50.21	51.49	51.60
+300 µm	56.51	-	-	53.01	-	-	53.15	55.34	53.15	-	-
-300+150 µm	50.60	-	-	47.81	-	-	50.61	49.67	50.61	-	-
-150+75 µm	40.95	40.11	-	42.87	38.29	-	42.14	41.59	42.14	39.51	-
-75+150 µm	36.77	37.80	-	43.08	38.11	27.87	37.82	38.87	37.82	37.90	-
-53+38 µm	37.75	33.32	36.66	43.72	38.82	42.19	38.95	39.74	38.95	35.15	43.65
-38+20 µm	37.67	25.47	45.07	46.09	46.12	49.86	41.89	40.48	41.89	32.35	51.67
-20 µm	51.21	50.87	50.77	54.35	51.74	50.29	53.52	52.25	53.52	51.16	52.32

Ek 5. Bakır cevheri içerisindeki minerallerin serbestleşme dereceleri

(a) Kalkopirit minerali serbestleşme derecesi (%)

Fraksiyon (μm)	Besleme (%)	Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı değirmen		
		15 dakika (%)	60 dakika (%)	120 dakika (%)	1.5 dakika (%)	7 dakika (%)	11 dakika (%)
-600+300	23.73	-	-	-	-	-	-
-300+150	60.85	70.73	-	-	62.00	33.94	30.70
-150+75	76.27	79.27	77.63	71.52	84.00	63.88	53.67
-75+38	86.06	87.05	85.37	86.93	91.60	85.07	76.83
-38+20	87.82	91.42	89.35	94.30	92.46	93.74	97.23
-20+10	97.06	97.74	98.46	96.70	98.13	98.99	98.18
-10	97.06	97.74	98.46	96.70	98.13	98.99	98.18

P_{80} (μm)	1475	330	69	38	330	67	39
Ortalama serbestleşme derecesi (%)	75.55	87.33	92.91	95.90	87.72	94.20	97.86

(b) Sfalerit minerali serbestleşme derecesi (%)

Fraksiyon (μm)	Besleme (%)	Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı değirmen		
		15 dakika (%)	60 dakika (%)	120 dakika (%)	1.5 dakika (%)	7 dakika (%)	11 dakika (%)
-600+300	58.89	-	-	-	78.00	-	-
-300+150	80.03	80.00	-	-	81.00	76.58	37.65
-150+75	83.95	84.00	82.96	72.03	88.00	81.13	64.62
-75+38	89.52	93.21	92.98	89.57	92.00	91.35	92.00
-38+20	91.06	94.16	92.84	96.06	96.04	97.06	98.30
-20+10	98.91	98.83	98.88	98.35	98.60	99.65	98.89
-10	98.91	98.83	98.88	98.35	98.60	99.65	98.89

P_{80} (μm)	1475	330	69	38	330	67	39
Ortalama serbestleşme derecesi (%)	85.90	91.50	95.89	97.59	92.37	96.93	98.69

(c) Galenit minerali serbestleşme derecesi (%)

Fraksiyon (μm)	Besleme (%)	Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı değirmen		
		15 dakika (%)	60 dakika (%)	120 dakika (%)	1.5 dakika (%)	7 dakika (%)	11 dakika (%)
-600+300	61.15	70.00	-	-	79.00	72.21	-
-300+150	84.89	75.00	-	-	81.02	81.68	39.97
-150+75	81.61	92.63	87.20	71.51	85.00	67.45	56.88
-75+38	74.92	93.27	93.21	89.34	93.76	86.00	79.00
-38+20	88.25	94.24	93.86	92.00	96.45	93.72	94.00
-20+10	94.17	98.37	94.17	95.00	99.18	98.58	98.40
-10	94.17	98.37	94.17	97.00	99.18	98.58	98.40

P_{80} (μm)	1475	330	69	38	330	67	39
Ortalama serbestleşme derecesi (%)	82.74	91.98	93.85	94.67	92.43	94.72	96.93

(d) Pirit minerali serbestleşme derecesi (%)

Fraksiyon (μm)	Besleme (%)	Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı değirmen		
		15 dakika (%)	60 dakika (%)	120 dakika (%)	1.5 dakika (%)	7 dakika (%)	11 dakika (%)
-600+300	79.66	92.15	-	-	91.21	92.57	-
-300+150	90.05	92.15	-	-	92.88	95.67	95.09
-150+75	91.12	93.53	94.17	96.40	96.51	97.05	95.73
-75+38	92.04	94.49	95.52	96.94	96.01	98.05	97.95
-38+20	91.01	95.16	95.83	97.29	96.76	99.04	98.11
-20+10	98.40	98.53	98.50	99.30	98.94	99.23	99.57
-10	98.40	98.53	98.50	99.30	98.94	99.23	99.57

P_{80} (μm)	1475	330	69	38	330	67	39
Ortalama serbestleşme derecesi (%)	91.53	95.40	97.09	98.63	96.67	98.89	99.08

Ek 6. Bakır cevheri içerisindeki serbestleşen ağırlıkça mineral dağılımları

(a) Kalkopirit minerali için elek aralığı bazında serbestleşen mineral dağılımı (%)

Fraksiyon (μm)	Besleme (g)	Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı değirmen		
		15 dakika (g)	60 dakika (g)	120 dakika (g)	1.5 dakika (g)	7 dakika (g)	11 dakika (g)
-600+300	0.09	0.22	-	-	0.04	0.01	-
-300+150	0.14	0.28	-	-	0.12	0.01	0.00
-150+75	0.16	0.38	0.09	0.01	0.22	0.02	0.00
-75+38	0.14	0.32	0.35	0.13	0.33	0.19	0.08
-38+20	0.11	0.29	0.41	0.46	0.57	0.71	0.55
-20+10	0.03	0.36	0.68	0.70	0.40	0.56	0.94
-10	0.17	0.33	0.91	1.18	0.67	0.97	0.95
Toplam	0.84	2.18	2.44	2.48	2.35	2.46	2.52

P_{80} (μm)	1475	330	69	38	330	67	39
Serbestleşen mineral miktarı (%)		158.32	189.16	194.78	178.96	192.42	199.46

(b) Sflerit minerali için elek aralığı bazında serbestleşen mineral dağılımı (%)

Fraksiyon (μm)	Besleme (g)	Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı değirmen		
		15 dakika (g)	60 dakika (g)	120 dakika (g)	1.5 dakika (g)	7 dakika (g)	11 dakika (g)
-600+300	0.27	0.41	-	-	0.13	0.02	-
-300+150	0.29	0.50	-	-	0.23	0.02	0.00
-150+75	0.21	0.51	0.15	0.01	0.25	0.03	0.00
-75+38	0.15	0.41	0.45	0.17	0.41	0.35	0.16
-38+20	0.12	0.31	0.54	0.71	0.72	1.05	0.59
-20+10	0.03	0.38	0.81	0.82	0.46	0.62	1.20
-10	0.15	0.36	1.11	1.39	0.80	1.02	1.23
Toplam	1.21	2.88	3.07	3.11	2.99	3.11	3.17

P_{80} (μm)	1475	330	69	38	330	67	39
Serbestleşen mineral miktarı (%)		137.72	153.25	156.81	147.37	157.21	162.13

(c) Galenit minerali için elek aralığı bazında serbestleşen mineral dağılımı (%)

Fraksiyon (μm)	Besleme (g)	Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı değirmen		
		15 dakika (g)	60 dakika (g)	120 dakika (g)	1.5 dakika (g)	7 dakika (g)	11 dakika (g)
-600+300	0.24	0.39	-	-	0.05	0.00	-
-300+150	0.38	0.50	-	-	0.13	0.02	0.00
-150+75	0.16	0.43	0.05	0.01	0.16	0.02	0.00
-75+38	0.09	0.15	0.27	0.06	0.26	0.06	0.03
-38+20	0.06	0.23	0.45	0.24	0.45	0.24	0.10
-20+10	0.01	0.20	0.63	0.71	0.46	0.90	1.14
-10	0.05	0.19	0.94	1.37	0.76	1.15	1.20
Toplam	0.99	2.10	2.34	2.39	2.29	2.39	2.47

P_{80} (μm)	1475	330	69	38	330	67	39
Serbestleşen mineral miktarı (%)		112.67	137.49	142.12	132.04	142.32	150.79

(d) Pirit minerali için elek aralığı bazında serbestleşen mineral dağılımı (%)

Fraksiyon (μm)	Besleme (g)	Bilyalı Değirmen			Karıştırmalı değirmen		
		15 dakika (g)	60 dakika (g)	120 dakika (g)	1.5 dakika (g)	7 dakika (g)	11 dakika (g)
-600+300	4.11	9.02	-	-	6.87	1.32	-
-300+150	3.33	10.67	-	-	8.24	2.20	0.00
-150+75	1.89	5.55	7.19	1.43	6.42	3.50	0.38
-75+38	1.09	1.04	8.67	6.54	3.37	7.28	6.98
-38+20	0.61	1.01	4.63	6.54	1.93	6.49	7.81
-20+10	0.11	0.93	4.18	6.22	0.91	4.18	7.84
-10	0.60	0.89	5.62	10.01	1.45	5.73	7.90
Toplam	11.74	29.10	30.29	30.74	29.20	30.70	30.92

P_{80} (μm)	1475	330	69	38	330	67	39
Serbestleşen mineral miktarı (%)		147.85	158.01	161.85	148.71	161.50	163.34

Ek 7. Bakır cevheri içerisindeki minerallerin karıştırmalı değirmendeki enerji kullanımına bağlı kümülatif (birikimli) dağılımları

(a) Kalkopirit mineralinin enerji kullanımına bağlı kümülatif dağılımı

Tane boyu (μm)	Besleme (%)	Karıştırmalı değirmen		
		1.5 dakika (%)	7 dakika (%)	11 dakika (%)
600	100.00	100.00	100.00	100.00
300	89.30	98.21	99.72	100.00
150	73.17	93.16	99.48	100.00
75	54.05	83.82	98.68	99.89
38	37.40	69.80	90.96	96.73
20	24.16	45.55	62.09	75.12
10	20.29	28.68	39.19	37.77

P₈₀ (μm)	1475	330	67	39
Enerji (kWs/t)		17	82	128

(b) Sfalerit mineralinin enerji kullanımına bağlı kümülatif dağılımı

Tane boyu (μm)	Besleme (%)	Karıştırmalı değirmen		
		1.5 dakika (%)	7 dakika (%)	11 dakika (%)
600	100.00	100.00	100.00	100.00
300	77.86	95.72	99.38	100.00
150	54.29	88.13	98.86	100.00
75	36.76	79.87	97.92	99.87
38	24.46	66.32	86.73	94.98
20	14.53	42.34	52.89	76.36
10	12.20	26.86	32.81	38.64

P₈₀ (μm)	1475	330	67	39
Enerji (kWs/t)		17	82	128

(a) Galenit mineralinin enerji kullanımına bağı kümülatif dağılımı

Tane boyu (μm)	Besleme (%)	Karıştırmalı değirmen		
		1.5 dakika (%)	7 dakika (%)	11 dakika (%)
600	100.00	100.00	100.00	100.00
300	75.33	97.64	99.85	100.00
150	36.99	91.88	99.11	100.00
75	21.05	84.68	98.46	99.94
38	11.71	73.35	95.91	98.56
20	6.02	53.48	85.74	94.52
10	5.06	33.35	50.20	48.49

P₈₀ (μm)	1475	330	67	39
Enerji (kWs/t)		17	82	128

(b) Pirit mineralinin enerji kullanımına bağı kümülatif dağılımı

Tane boyu (μm)	Besleme (%)	Karıştırmalı değirmen		
		1.5 dakika (%)	7 dakika (%)	11 dakika (%)
600	100.00	100.00	100.00	100.00
300	64.97	76.46	95.69	100.00
150	36.59	48.24	88.53	100.00
75	20.50	26.26	77.12	98.76
38	11.24	14.71	53.41	76.19
20	6.04	8.08	32.29	50.92
10	5.07	4.95	18.68	25.55

P₈₀ (μm)	1475	330	67	39
Enerji (kWs/t)		17	82	128