

**ÇİMENTO ÖĞÜTME UYGULAMALARINDA BİLYA VE
MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BİLYA AŞINMA SONUÇLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATING THE EFFECTS OF BALL AND MATERIAL
PROPERTIES ON MEDIA WEAR RESULTS FOR CEMENT
GRINDING APPLICATIONS**

SERDAR SAİT ÇOLAK

**Dr. Öğr. Üyesi OKAY ALTUN
Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü


YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2018

Serdar Sait ÇOLAK'ın hazırladığı “Çimento Öğütme Uygulamalarında Bilya ve Malzeme Özelliklerinin Aşınma Sonuçları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

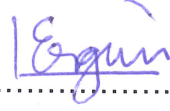
Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ
Başkan



Dr. Öğr. Üyesi Okay ALTUN
Danışman



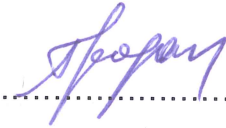
Prof. Dr. Şevket Levent ERGÜN
Üye



Prof. Dr. Ahmet Hakan BENZER
Üye



Doç. Dr. Namık Atakan Aydoğan
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

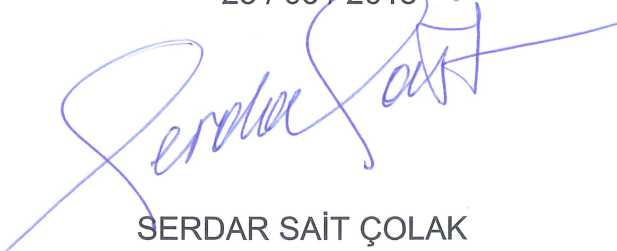
- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

25 / 06 / 2018

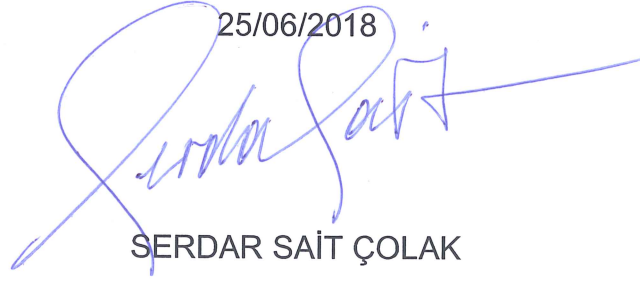

SERDAR SAİT ÇOLAK

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
 - atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
 - kullanılan verilere herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - ve bu tezin bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı
- beyan ederim.

25/06/2018



SERDAR SAİT ÇOLAK

ÖZET

ÇİMENTO ÖĞÜTME UYGULAMALARINDA BİLYA VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BİLYA AŞINMA SONUÇLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Serdar Sait ÇOLAK

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Okay ALTUN

Haziran 2018, 84 Sayfa

Bu çalışma kapsamında yüksek kromlu beyaz dökme demirden üretilmiş öğütücü bilyalarda kuru öğütme ortamında meydana gelen ortam aşınması bilyalı değirmenlerde gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli deneyler ile incelenmiştir. Bu çalışmada, farklı tipteki öğütücü ortamların aşınma dirençlerini karşılaştırmak ve endüstriyel kullanımlarından önce öğütücü ortamın aşınma özelliklerini yorumlamak amacıyla kuru öğütme uygulamasına yönelik bir test yönteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Laboratuvar ölçekli testler nispeten daha az iş gücü gerektirmekte ve endüstriyel uygulamalarda meydana gelen öğütücü ortam aşınmasının tutarlı bir şekilde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Öğütücü ortam aşınması ile ilgili maliyetlerin uygun ortam seçimi ile azaltılması mümkün olduğundan bu çalışmanın hem ortam üreticileri hem de kuru öğütmenin uygulandığı tesisler için faydalı olacağı düşünülmektedir.

Çoğunlukla kuru öğütmenin tercih edildiği çimento öğütme uygulamalarında bilya ve malzeme özelliklerinin ortam aşınması üzerindeki etkisi farklı deney gruplarında değerlendirilmiştir. Toplamda 35 farklı test koşulunda gerçekleştirilen deneylerde

öğütücü ortam özellikleri, öğütülen malzemenin türü, malzeme doluluğu oranı ve değirmen çapının ortam aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Öğütme ve tamburlama testlerinde alınan sonuçlar bilyaların mikro yapı özellikleri ile ilişkili olarak değerlendirilmiştir. Mikro yapıda bulunan karbürlerin hacimsel oranlarındaki artış aşınma direncini olumlu yönde etkilemektedir. Malzemenin Bond iş indeksiindeki artış ise aşınma miktarlarında artışa neden olmaktadır. Malzeme doluluğu orandaki artış ile aşınma miktarlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Değirmen çapının aşınma sonuçları üzerinde etkili olduğu, değirmen çapındaki artışın altı öğütücü ortam tipinin tamamında aşınma miktarlarının artmasına neden olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın önemli sonuçlarından bir diğeri, değirmen çapı veya malzemenin iş indeksi parametrelerinden bağımsız olarak farklı öğütücü bilya gruplarında ölçülen aşınma miktarlarının çoktan aza aynı düzende sıralanmasıdır.

Laboratuvar testlerinden elde edilen öğütücü bilya aşınması verileri ile endüstriyel ölçekli aşınma değerleri karşılaştırılarak aralarındaki ilişki incelenmiştir. Karşılaştırma sonucunda öğütücü bilyada aşınma performansının endüstriyel kullanımdan önce laboratuvar ölçekli testler ile tahmin edilmesinin mümkün olduğu anlaşılmıştır. Endüstriyel ve laboratuvar ölçekli aşınma verileri arasındaki ilişkinin geliştirilmesi ve daha doğru tahminler yapabilmek amacıyla gelecekte yapılacak çalışmalar ile veri dizisinin genişletilmesi önerilmektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, öğütücü bilya gruplarının kimyasal kompozisyonu, mikro yapı özellikleri ve aşınma direnci arasındaki ilişki hakkında literatürde verilen bilgiler ile uyum içerisindedir. Bilya ve malzeme özelliklerinin aşınma üzerindeki etkisini değerlendirilmesinde kullanılan test yönteminin çimento öğütme tesislerinde kalite kontrol sürecine dahil edilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çimento, Öğütme, Aşınma, Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen, Öğütücü bilya, Yüksek kromlu beyaz dökme demir.

ABSTRACT

INVESTIGATING THE EFFECTS OF BALL AND MATERIAL PROPERTIES ON MEDIA WEAR RESULTS FOR CEMENT GRINDING APPLICATIONS

Serdar Sait ÇOLAK

Master of Science, Department of Mining Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Okay ALTUN

June 2018, 84 Pages

Within the context of the study, the wear of media in dry grinding environment was investigated for high chromium cast iron grinding balls by conducting the laboratory scale experiments with the ball mills. The study aimed at developing a dry test method to compare wear resistance in different types of the grinding media, and to comment on the media wear properties before using it in the industry. Laboratory scale tests are relatively less labor intensive and may enable accurate assessment of the media wear that occurs in industrial applications. Such a study is believed to be beneficial for both the media manufacturers and the dry grinding plants since there is a potential to reduce the costs associated with the wear with the proper media selection.

The influences of the characteristics of grinding balls together with the processed materials on media wear were considered in different experimental groups for cement grinding applications where dry grinding prevails. Throughout the thesis study, 35 different test conditions were adjusted where the influences of the grinding

media properties, the type of the milled material, material filling inside the ball mill, the type of the milled product and the effects of mill diameter on media wear were discussed.

The results obtained in the grinding and tumbling tests were evaluated in relation with the microstructure properties of the grinding balls. The evaluations indicated that increasing the volumetric fractions of the carbides in the microstructure increases the resistance to wear. It was also observed that the amount of the wear increased with the increase in the work indices of the milled materials. In addition, it was found that increasing material filling ratio caused a decrease in the wear of the grinding balls. The mill diameter was found to be an influencing parameter on the wear results and proved that increasing mill diameter cause an increased wear in all six types of grinding media. One of the major outcomes of the study was; independent of the mill diameter and the work indices of the milled material, the measured media wear from the highest to the lowest was in the same order.

The wear data of the grinding balls obtained from the laboratory tests was then compared with the industrial scale grinding ball wear to investigate the correlations. As a result of the comparison, it was understood that it is possible to predict the wear performance of the grinding media from the laboratory scale tests before their industrial use. However the expansion of the data base is recommended as a future study for having improved correlation and predicting capabilities.

The data obtained as a result of the experimental studies coincides with the information reported in the literature where the influences of chemical composition, microstructure properties and wear resistance of the grinding balls were discussed. It is considered useful to incorporate the test method in the quality control process of cement grinding facilities in order to evaluate the effect of the ball and material properties on grinding media wear.

Keywords: Cement, Grinding, Wear, Laboratory scale ball mill, High chromium cast iron

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı görevinde bulunan Sayın Prof. Dr. Ahmet Hakan Benzer ve Sayın Prof. Dr. Zafir Ekmekçi'ye,

Lisans ve yüksek lisans çalışmalarım boyunca fikir ve bilgileriyle yol gösteren, motivasyon desteği ile bu çalışmayı mümkün kılan kıymetli danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Okay Altun'a,

Bilgi ve tecrübelerini paylaşarak çalışmalarına katkı sağlayan Sayın Doç. Dr. Namık Atakan Aydoğan ve Sayın Dr. Nurettin Alper Toprak'a,

Süreç içerisinde manevi desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Dr. Deniz Altun, Dr. Emre Yılmazkaya, ve Dr. Özgür Özcan'a,

Çalışmalarım sırasında gösterdikleri sabır, özen ve yardımlarından dolayı çalışma arkadaşlarım Ergin Sarp Zencirci ve Ecem Karahan'a,

Yardımlarından dolayı bölüm teknisyenleri Mustafa Aydemir, Işın Aslıyüksek'e ve bölüm sekreterleri Sıddık Yılmazoğlu ve Birgül Atay'a,

Sağladıkları maddi ve manevi destek için annem Sevgi Çolak, babam İshak Çolak, kardeşim Güven Çolak ve tüm dostlarıma en içten duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. ÇİMENTO ÖĞÜTME	4
2.1. Giriş	4
2.2. Tüp Değirmenler	7
3. AŞINMA	10
3.1. Giriş	10
3.2. Abrasiv Aşınma	12
3.3. Darbe Aşınması	14
3.4. Aşınma Direnci ve Önemi	14
3.5. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri	15
3.5.1. Karbürler	16
3.5.2. Metal Matris	16
3.6. Aşınma Karakterizasyonu	17
3.6.1. İşaretli Bilya Aşınma Testi	17
3.6.2. Bilyalı Değirmen Aşınma Testi (BMAT)	18
3.6.3. Newmont Testi	19
3.6.4. Bond Aşınma İndeksi	19
4. MATERYAL ve YÖNTEM	21
4.1. Öğütücü Bilya Tipleri	21
4.2. Malzeme Karakterizasyonu	24
4.3. Test Yöntemi	27
4.3.1. Tamburlama Testleri	27
4.3.2. Öğütme Testleri	29
4.3.2.1. Farklı Öğütücü Ortam Grupları ile Öğütme	29
4.3.2.2. Farklı Malzemeler ile Öğütme	30
4.3.2.3. Farklı Malzeme Doluluğu Oranlarında Öğütme	30
4.4. Bilya Aşınması ile İlgili Endüstriyel Gözlemler	32

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
5.1. Deney Yönteminin Tekrarlanabilirliği	39
5.2. Tamburlama Test Sonuçları	42
5.3. Öğütme Test Sonuçları.....	46
5.3.1. Öğütücü Ortam Özelliklerinin Etkisi	46
5.3.2. Malzeme Özelliklerinin Etkisi	49
5.3.3. Malzeme Doluluğunun Etkisi	51
5.4. Öğütücü Ortamın Mikro Yapı Özelliklerinin Aşınmaya Etkisi	56
5.5. Laboratuvar ve Endüstriyel Ölçekli Test Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	59
6. SONUÇLAR	61
KAYNAKLAR.....	63



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çimento üretim şeması	5
Şekil 2.2. Tüp değirmenin kesit görüntüsü	7
Şekil 2.3. Değirmenin dönüşü sırasında bilya şarjı profili	8
Şekil 3.1. Tribosistem Bileşenleri	10
Şekil 3.2. Aşınma Mekanizmaları	11
Şekil 3.3. İki gövdeli ve üç gövdeli abrasiv aşınma	12
Şekil 3.4. Bilya şarjı profili	13
Şekil 3.5. Yüksek kromlu dökme demirin kesit görüntüsü	15
Şekil 3.6. Laboratuvar ölçekli işaretli bilya test düzeneği	18
Şekil 3.7. Bond aşınma test düzeneği	20
Şekil 4.1. Nikon elipse MA-100 optik mikroskop	22
Şekil 4.2. Sertlik ölçümü alınan noktalar	23
Şekil 4.3. Mergo GmbH Minor-69 sertlik ölçüm cihazı	23
Şekil 4.4. Besleme malzemelerinin tane boyu dağılımları	25
Şekil 4.5. Lazerli tane boyu ölçüm cihazı	26
Şekil 4.6. Örnek aşınma grafiği	28
Şekil 4.7. Bond değirmeni	29
Şekil 4.8. Tesis A üretim şeması	33
Şekil 4.9. Tesis B üretim şeması	35
Şekil 4.10. Tesis C üretim şeması	36
Şekil 5.1. Farklı tarihlerde ölçülen birikimli ağırlık kaybı değerlerinin karşılaştırılması	40
Şekil 5.2. Tekrarlanabilirlik testinde ölçülen tane boyu dağılımları	41
Şekil 5.3. Değirmen-1 için ölçülen aşınma değerleri	43
Şekil 5.4. Değirmen-2 için ölçülen aşınma değerleri	44
Şekil 5.5. Değirmen-3 için ölçülen aşınma değerleri	44
Şekil 5.6. Tamburlama testleri sırasında kırılan öğütücü bilya	45
Şekil 5.7. Tamburlama test sonuçlarının karşılaştırılması	45
Şekil 5.8. Bilya şarjı aşınma miktarlarının karşılaştırılması	48
Şekil 5.9. Malzeme özelliklerinin aşınma miktarları üzerindeki etkisi	50
Şekil 5.10. Malzeme doluluğu ile birikimli aşınma miktarları arasındaki ilişki -1-	54
Şekil 5.11. Malzeme doluluğu ile birikimli aşınma miktarları arasındaki ilişki -2-	54
Şekil 5.12. Malzeme doluluğu ile birikimli aşınma miktarları arasındaki ilişki -3-	55
Şekil 5.13. Malzeme doluluğu oranı ile aşınma miktarları arasındaki korelasyon	55
Şekil 5.14. Molibden miktarının ikincil karbür oluşumu üzerindeki etkisi	58
Şekil 5.15. Eşdeğer karbon miktarları ile birincil karbür miktarları arasındaki ilişki	59

Şekil 5.16. Laboratuvar ve endüstriyel ölçekli aşınma sonuçlarının karşılaştırılması.....60



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Çimento üretim sürecinde enerji tüketim oranları	6
Çizelge 2.2. Dönel değirmende öğütme maliyetlerinin dağılımı	9
Çizelge 3.1. Karbürlerin sertlik değerleri	16
Çizelge 3.2. Farklı matris yapılarının sertlik değerleri.....	17
Çizelge 4.1. Test edilen öğütücü bilyaların kimyasal kompozisyonları	21
Çizelge 4.2. Mikro yapı bileşenlerinin hacimsel oranları.....	22
Çizelge 4.3. Rockwell-C sertlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlar	23
Çizelge 4.4. Granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu	24
Çizelge 4.5. Klinkerin kimyasal kompozisyonu.....	24
Çizelge 4.6. Malzemelerin Bond iş indeksi değerleri	25
Çizelge 4.7. Örnek hesaplama tablosu	27
Çizelge 4.8. Test çalışmalarında kullanılan değirmenlerin özellikleri	28
Çizelge 4.9. Malzeme doluluğu testlerinde kullanılan malzeme miktarları	31
Çizelge 4.10. Tekrarlanabilirlik deney matrisi.....	31
Çizelge 4.11. Çimento öğütme tesislerinin bilya doluluğu değerleri.....	32
Çizelge 4.12. Çimento değirmenlerinin boyutları.....	32
Çizelge 4.13. Tesislerin üretim miktarları ve devreden yük oranları	33
Çizelge 4.14. Tesis A akış kolları.....	33
Çizelge 4.15. Tesis A çimento değirmeni bilya boyu dağılımı.....	34
Çizelge 4.16. Tesis B akış kolları	35
Çizelge 4.17. Tesis B çimento değirmeni bilya boyu dağılımı.....	36
Çizelge 4.18. Tesis C akış kolları.....	37
Çizelge 4.19. Tesis C çimento değirmeni bilya boyu dağılımı	37
Çizelge 4.20. Ortalama bilya tüketim değerleri.....	38
Çizelge 5.1. Tekrarlanabilirlik deney sonuçları.....	39
Çizelge 5.2. z-testi parametreleri	40
Çizelge 5.3. z-testi sonuçları.....	41
Çizelge 5.4. Bond değirmeninde ölçülen aşınma miktarları.....	42
Çizelge 5.5. A1 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu	46
Çizelge 5.6. A2 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu	47
Çizelge 5.7. A3 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu	47
Çizelge 5.8. B1 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu	47
Çizelge 5.9. B2 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu	47
Çizelge 5.10. C1 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu.....	48
Çizelge 5.11. Granüle yüksek fırın cürufu için hesaplama tablosu	49

Çizelge 5.12. Klinker için hesaplama tablosu.....	50
Çizelge 5.13. %10 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler.....	51
Çizelge 5.14. %20 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler.....	52
Çizelge 5.15. %40 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler.....	52
Çizelge 5.16. %60 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler.....	52
Çizelge 5.17. %80 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler.....	53
Çizelge 5.18. %100 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler.....	53
Çizelge 5.19. %50 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler.....	56
Çizelge 5.20. Mikro yapı bileşenlerinin hacimsel oranları ve aşınma miktarları	57



1. GİRİŞ

Çimento, yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Çimento üretiminde, dayanım ve duraylılık hedeflerine ulaşılabilmesi için nihai ürünün inceliği büyük önem taşımaktadır. Metalik olmayan cevherlerin işlenmesinde kullanılan elektrik enerjisi dünya genelindeki elektrik enerjisi tüketimi içerisinde yaklaşık %12'lik bir paya sahiptir [1]. Bu enerjinin %8.5 ila %12'si ise çimento endüstrisinde kullanılmaktadır [1, 2].

Çimento öğütme devrelerinde yaygın olarak tercih edilen dönel değirmenlerde öğütücü ortam olarak farklı çaplarda bilyalar kullanılmaktadır. Değirmen içerisinde öğütülen malzeme ile öğütücü bilyalar sürekli bir etkileşim halindedir. Bu etkileşimin sonucu olarak malzeme öğütülmekte ve bilyalar zamanla aşınmaktadır. Astar ve öğütücü bilyanın aşınması nedeniyle oluşan maliyetler tüm madencilik maliyetleri içerisinde %15 ila 25 arasında değişen bir paya sahiptir [3]. Öğütme devreleri gibi aşındırıcı ortamlarda mikro yapı özellikleri sebebiyle yüksek aşınma direnci gösterebilen yüksek kromlu dökme demirden yapılmış öğütücü bilyalar tercih edilmektedir [4]. Özellikle bilyalı değirmenlerde uygun aşınma direncine sahip malzemedan yapılmış öğütücü ortamın kullanılması ile aşınma ve enerji tüketiminin %5 ila 10 oranında azaltılmasının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır [2]. Öğütme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan dönel değirmenler enerji tüketimi açısından verimsiz ekipmanlar olmalarına karşın, yüksek üretim kapasiteleri sebebiyle tercih edilmektedirler. Bu durum dönel değirmenlerde enerji verimliliğini artıracak optimizasyon çalışmalarının gerekliliğini öne çıkarmaktadır.

Literatürde sürtünme, darbe ve korozyon olarak isimlendirilen aşınma mekanizmaları öğütücü bilyalarda kütle kaybına neden olmaktadır [5]. Öğütme operasyonunun doğası gereği bu mekanizmalar hem birbiriyle hem de operasyonel parametreler ile etkileşim içerisindeyler. Örneğin bilyalı değirmenin dönüş hızının azaltılması durumunda değirmen içerisinde bilyalar daha çok kaskat hareketi yapacağından sürtünmeye bağlı aşınmada artış, darbe mekanizmasının etkisiyle gerçekleşen aşınmada ise düşüş gözlemlenebilir. Dolayısıyla verimliliğin artırılabilmesi amacıyla uygun operasyonel koşulların belirlenmesinin ardından öğütücü ortam seçimi de göz önünde bulundurulmalıdır.

Kuru öğütme sistemlerinde hedeflenen ürün kalitesine / inceliğine ulaşılabilmesi için şiddetli sürtünme ve darbe kuvvetlerinin etkisi altındaki öğütücü bilyanın küresel biçimini koruması gerekmektedir. Kütle kaybı nedeniyle küresel formundan uzaklaşan bilyalar öğütme işleminde verimin azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple değirmen içerisine operasyonel koşullara bağlı olarak belirli zamanlarda bilya yüklemesi yapılmaktadır. Ancak bilya yüklemesinin ne zaman yapılacağını belirlemek için gerekli olan bilgiye doğrudan aşınma ölçümleriyle değil, değirmenin enerji tüketimi gözlemlenerek dolaylı yoldan ulaşılmaktadır. Değirmenin çektiği güçte değişime neden olan başka etkenler de olabileceğinden aşınmanın miktarlarının ölçülmesi operasyonun denetlenmesi açısından daha doğru bir yaklaşım sunmaktadır.

Öğütücü ortamın aşınmasını incelemek amacıyla laboratuvar ortamında bazı çalışmalar yürütülmüştür. Natarajan tarafından yürütülen çalışmada bakır cevherinin öğütülmesi sırasında öğütme ortamındaki oksijen ve pH değerinin öğütücü ortam aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır [6]. Laboratuvar ölçekli yaş öğütme testlerinin gerçekleştirildiği bir diğer çalışmada ise uygun öğütücü ortam seçimiyle korozyona bağlı aşınmanın azaltılabileceği sonucuna varılmıştır [7]. Öğütülebilirliğin belirlenmesine yönelik Levin yaklaşımını temel alan bir çalışmada laboratuvar ölçekli deneylerden elde edilen sonuçların endüstriyel ölçekte aşınmayı öngörmek amacıyla kullanılmasının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır [8, 9].

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, öğütücü ortamın aşınması ile ilgili çalışmaların yaş mineral öğütme uygulamaları özelinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Kuru öğütmenin hakim olduğu çimento öğütme uygulamaları özelinde ise aşınmanın incelenmesine yönelik laboratuvar ölçekli bir deney yönteminin eksikliği göze çarpmaktadır. Bu çalışmada literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, kuru öğütme uygulamasının tercih edildiği çimento üretim devrelerinde yüksek krom içerikli dökme demirden üretilmiş öğütücü bilyalardaki aşınma miktarlarının laboratuvar ortamında yürütülen çalışmalarla incelenmesi ve öğütücü ortamın karakteristik özellikleri ile aşınma değerleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Buna ek olarak endüstriyel ölçekli aşınma miktarlarının laboratuvar ortamında elde edilen aşınma miktarları ile karşılaştırılması ve test yönteminin doğrulanması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda öğütücü bilyadaki aşınma miktarları laboratuvar ortamında uygulanan bir deney yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yöntemde belirli özellikteki bilyalar tamburlama işlemine tabi tutulmuştur. Tamburlama işlemi üç farklı değirmende ve farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Öğütücü ortamın kimyasal içeriği, mikro yapısı, öğütülen malzemenin özellikleri gibi koşullardaki değişimlere aşınma miktarları da değişiklik göstermektedir. Bu nedenle uygulanan yöntemin değişen aşınma miktarlarını ölçmeye yetecek hassasiyete sahip olması gerekmektedir. Deney yönteminin hassasiyetini araştırmak amacıyla operasyonel parametreler kontrollü bir şekilde değiştirilerek aşınma miktarları takip edilmiştir. Ayrıca deney sonuçları istatistiksel yöntemle değerlendirilerek deney yönteminin tekrarlanabilirliği test edilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında üç farklı çimento öğütme devresinde uzun süreli gözlemler yapılmıştır. Bu tesislerden alınan öğütücü bilya tüketimi değerleri ile aynı bilya tipi için laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen aşınma değerleri karşılaştırılmıştır.

Öğütülen malzemenin özelliklerinde veya öğütücü ortamın kalitesinde meydana gelebilecek değişiklikler öğütme işleminin verimini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Öğütücü ortam aşınmasının laboratuvar ortamında yapılan testlerle hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesi neticesinde, öğütme işleminin performansının iyileştirilmesine yönelik yorumlarda bulunulması sağlanabilecektir. Dolayısıyla bu çalışma sonucunda edinilen bilginin hem öğütücü ortam üreticileri hem de çimento üretim tesisleri açısından faydalı olabileceği düşünülmektedir.

2. ÇİMENTO ÖĞÜTME

2.1. Giriş

Çimento, su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları sonucunda priz alarak sertleşen bir hamur (pasta) oluşturan ve sertleşme dayanım ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır [10]. Çimentonun hidrolik sertleşme ve dayanım özellikleri içerdiği kalsiyum oksit (CaO), silisyum oksit (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) bileşenleri ile sağlanmaktadır [11]. Çimento üretiminde ham madde seçimi bu bileşenler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Kireç (CaCO₃) eldesi için kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalar tercih edilirken, silis (SiO₂), alümin (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) ise kil içerisinde bulunurlar [12].

Çimento üretimi çok aşamalı bir süreç olmakla birlikte temel olarak ham madde üretimi ve hazırlama, pişirme ve çimento öğütme adımlarından oluşmaktadır. Bu adımlar süresince uygulanan işlemler sırasıyla;

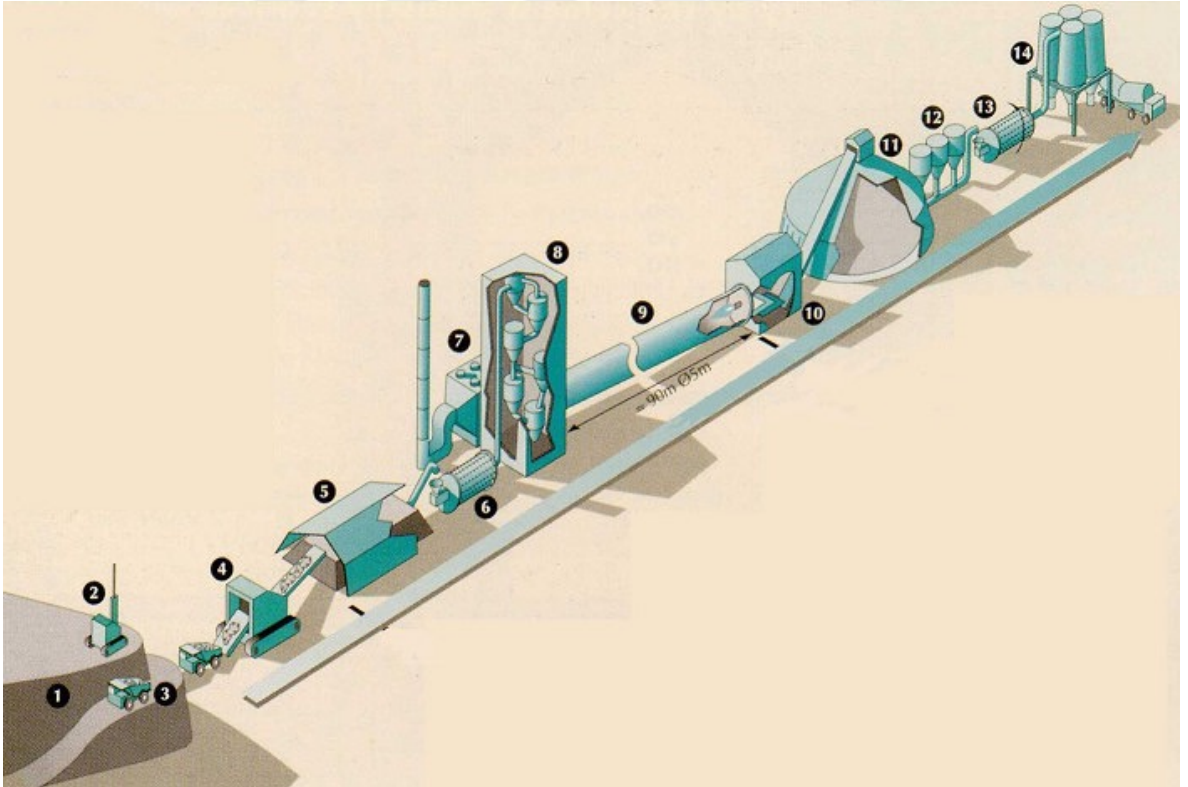
- Uygun ham madde seçimi,
- Ham maddelerin belirli oranlarda harmanlanıp öğütülmesi ile farin üretimi,
- Farinin döner fırınlarda sinterleşme sıcaklığına kadar (1350-1450°C) pişirilmesi,
- Pişmeyi takip eden soğutma işlemi ile çimento üretiminde ara ürün olarak nitelendirilen klinker üretimi,
- Klinkerin bir miktar alçı taşı ve üretilen çimento tipine bağlı olarak -eğer varsa- katkı malzemeleri ile birlikte öğütülerek nihai ürünün elde edilmesi

olarak özetlenebilir [13].

Madencilik faaliyetleri ile başlayan ham madde hazırlama sürecinde amaç, kimyasal ve mineralojik açıdan homojen özellik gösteren ham madde karışımının elde edilmesidir [14]. Bu kapsamda tüvenan malzeme boyut küçültme ve ön harmanlama işlemlerine tabi tutulur. Ön harmanlama işlemi klinker için uygun ham madde kompozisyonu (ortalama %70 kalker ve %30 kil) göz önünde bulundurularak yapılmalıdır [11]. Harmanlama işlemi takip eden öğütme işlemi ile %80 ila 85 oranında 90 µm inceliğe sahip farin elde edilir [11]. Farin öğütme işlemi ile tanelerin

özgül yüzey alanı artırılarak döner fırın içerisinde gerçekleşen tepkime hızlarının artması sağlanmaktadır [15].

Çimento üretiminde ara ürün olarak nitelendirilen klinker, farinin sinterleşme sıcaklığına kadar pişirilmesi ile elde edilir [11]. Bu işlem 50-75 m uzunluk ve 3-7 m çapa sahip olan, kendi eksenini etrafında 1.5-4 devir/dakika hızla dönen, yataydan %3-4 eğimle yerleştirilmiş döner fırın içerisinde gerçekleştirilmektedir [16]. Farin döner fırına giriş yapmadan önce ön ısıtma kulelerinde bir dizi siklon içerisinde geçirilerek sıcak egzoz gazları ile temas etmesi sağlanır. Bu işlem ile malzeme kısmen kalsine olmakta ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır [12]. Fırın çıkışında klinker basınçlı hava ile soğutulurken depolanmak üzere klinker silosuna aktarılır. Çimento üretiminin son aşamasında priz süresini kontrol etmek amacıyla klinker ağırlıkça %3-5 oranında alçıtaşı ile birlikte öğütülmektedir. Öğütmeyi takip eden sınıflandırma işlemi ile hedeflenen ürün inceliğe ulaşan malzeme depolanmak üzere çimento silolarına aktarılmaktadır. Çimento üretim şeması Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Çimento üretim şeması: Ocak (1), Madencilik Faaliyetleri (2)(3), Kırıcı (4), Ön Harmanlama (5), Farin Değirmeni (6), Filtre (7), Ön Isıtıcı (8), Döner Fırın (9), Soğutucu (10), Klinker Stoklama (11), Katkılar (12), Çimento Değirmeni (13), Depolama ve Sevkiyat (14) [15]

Çimento bileşimine ağırlıkça %5'ten daha fazla oranda mineral katkı ilave edilmesi ile özel kullanım amaçlarına uygun katkılı çimentolar elde edilmektedir [14]. Katkılı çimentolarda kullanılan ana ve minör bileşenlerin tip ve özellikleri TS EN 197-1 standardında belirtilmektedir [10]. Katkılı çimentolar, yüksek erken dayanım ve sülfata dayanıklılık gibi teknik özellikler sunmalarının yanı sıra ekonomik olmaları nedeniyle de tercih edilmektedirler [17].

Çimento üretiminde nihai ürünün kalitesi kimyasal, mineralojik ve fiziksel özellikler temelinde değerlendirilmektedir. Ham madde seçimi, farin öğütme ve pişirme aşamaları ile üretilen klinkerin kimyasal bileşimi, çimentonun dayanımı, priz süresi ve hidratasyon ısı gibi kullanım özelliklerini etkileyebilmektedir [11]. Çimento öğütme aşamasının ardından elde edilen nihai ürünün tane şekli, tane boyu dağılımı ve özgül yüzey alanı parametreleri ise çimento kalitesini etkileyen fiziksel özellikler arasında gösterilmektedir [14].

Çimento üretim süreci enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, çimento ve ham madde öğütme aşamalarında harcanan enerjinin toplam enerji tüketimi içerisinde önemli bir paya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Çimento üretimi sırasında harcanan elektrik enerjisi 89 ila 130 kWs/ton aralığında değişmektedir [18]. Tipik bir çimento üretim tesisine ait özgül enerji tüketim değerleri Çizelge 2.1'de özetlenmektedir.

Çizelge 2.1. Çimento üretim sürecinde enerji tüketim oranları [13]

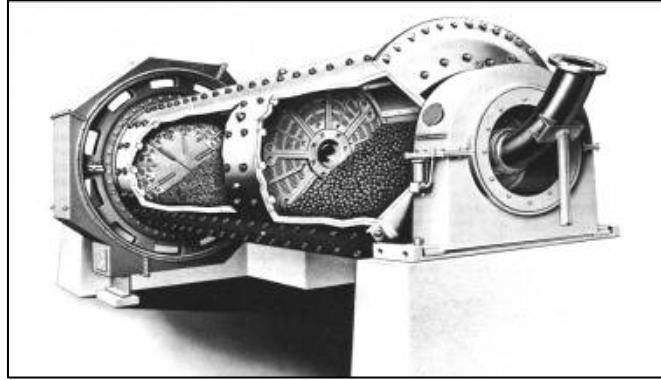
	kWsa/ton	%
Ocak İşleri ve Ön Harmanlama	6	5
Ham Madde Öğütme	28	24
Harmanlama	7	6
Pişirme ve Soğutma	25	22
Çimento Öğütme	44	38
Taşıma, Paketleme ve Yükleme	6	5
Toplam	116	100

Bu bölümde aktarılan bilgiler çimento öğütme uygulamasının ürün kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve enerji tüketiminin yüksek oranda öğütme işlemi ile ilişkili olduğunu işaret etmektedir. Çimento öğütme uygulamalarından yaygın olarak kullanılan tüp değirmenler hakkında detaylı bilgiler aşağıda verilmektedir.

2.2. Tüp Değirmenler

Bilyalı değirmenler boyut küçültme işleminin son aşaması olan öğütme uygulamalarında kullanılan ekipmanlardır [19]. Bilyalı değirmenlerin yapısı temel olarak silindirik biçimli gövde, gövdenin iç tarafına sabitlenmiş astarlar ve değirmen içerisinde serbest hareket edebilen öğütücü ortamdır oluşmaktadır. Bilyalı değirmenlerde öğütücü ortam olarak farklı çaplarda küresel şekilli bilyalar kullanılmaktadır. Çimento üretim sürecinin farin ve klinker öğütme aşamalarında kullanılan çok kamaralı bilyalı değirmenler tüp değirmenler olarak adlandırılmaktadır [13].

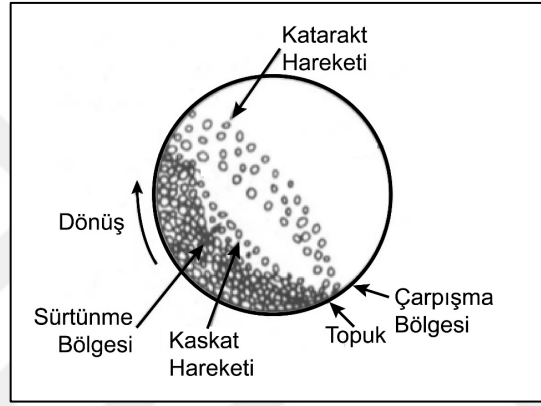
Tüp değirmenler genellikle ürün inceliğinin ön planda olduğu kuru öğütme uygulamalarında tercih edilmektedirler. Bilyalı değirmenlerde boy/çap oranı 1-1.5 arasında iken tüp değirmenlerde bu oran malzemenin öğütülebilirliğine ve hedeflenen ürün inceliğine bağlı olarak 3 ila 6 arasında değişebilmektedir [11]. İki kamaralı bir tüp değirmenin kesit görüntüsü Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2. Tüp değirmenin kesit görüntüsü

Bilyalı değirmenlerde öğütme işlemi, bir motor düzeneği ile değirmene aktarılan hareket enerjisinin öğütülen malzeme üzerine etkiyen sıkıştırma (darbe), yontma ve sürtünme mekanizmalarına dönüşümü ile gerçekleştirilmektedir [19]. Bu dönüşüm öğütücü bilya şarjının değirmen içerisindeki hareketi ile sağlanmaktadır. Bilya şarjının hareketi ise değirmenin dönüş hızı ve astar tasarımına bağlı olarak bilya

şarjı üzerine etkiyen santrifüj, sürtünme ve yer çekimi kuvvetlerinin etkisi ile oluşmaktadır [11]. Bu üç kuvvetin etkisi ile dönüş yönünde belirli bir noktaya kadar yükselen bilyalar katarakt veya kaskat hareketi yapmaktadır. Katarakt hareketi ile öğütme, bilyanın sahip olduğu potansiyel enerjinin değirmen şarjının topuğunda kinetik enerjiye dönüşmesi sonucu darbe mekanizmasının etkisi ile gerçekleşmektedir. Kaskat hareketi ile öğütme ise, bilya şarjı içerisinde sıkışmış halde bulunan bilyaların değirmen şarjının topuğu yönünde kayarak yuvarlanma hareketi yapması sonucu meydana gelen sürtünme ve yontma mekanizmalarının etkisi ile gerçekleşmektedir. Değirmenin dönüşü sırasında oluşan bilya şarjı profili Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Değirmenin dönüşü sırasında bilya şarjı profili

İki kamaralı değirmenlerin birinci kamarasında katarakt hareketi ve dolayısıyla darbe mekanizması ile öğütmenin, ikinci kamarada ise kaskat hareketine bağlı olarak sürtünme mekanizması ile öğütmenin daha etkin olduğu belirtilmiştir [11].

Tüp değirmenler açık veya kapalı devre çalıştırılabilirler. Açık devre öğütme tasarımında malzeme değirmende tek bir kez geçiş yapmakta ve değirmen çıkışında nihai ürün elde edilmektedir. Kapalı devre tasarımında ise değirmen çıkışı seperatöre beslenmekte, seperatör irisi yeniden öğütülmek üzere değirmene beslenmektedir. Kapalı devre çalışan sistemde nihai ürün seperatör üst akımı ile alınmaktadır. Bu yöntem ürün tane boyu dağılımının kontrol edilmesine imkan sağlamaktadır. Kapalı devre öğütme sistemlerinde kullanılan yardımcı ekipmanların devrenin toplam enerji tüketiminde %10 ila 20 oranında artışa neden olmasına karşın bu sistemlerdeki özgül enerji tüketimi açık devre tasarımına göre daha düşüktür [11]. Çimento öğütme işlemi genellikle yüksek verimli havalı seperatör ile kapalı devre çalışan tüp değirmenlerde gerçekleştirilmektedir.

Öğütme işleminde maliyetler temel olarak enerji tüketimi ile astar ve öğütücü ortamda meydana gelen aşınmalar nedeniyle gerçekleşmektedir [20]. Bu maliyetlerin toplam öğütme giderleri içerisindeki oranları öğütme uygulamasının türüne göre değişkenlik gösterebilmektedir. Tipik bir dönel değirmende bu maliyetlerin dağılımı Çizelge 2.2’de listelenmektedir.

Çizelge 2.2. Dönel değirmende öğütme maliyetlerinin dağılımı [21]

Enerji Tüketimi	%49-58
Öğütücü Ortam Aşınması	%21-45
Astar Aşınması	%6-21

Çimento öğütme aşamasında meydana gelen aşınmalar hem neden oldukları maliyetler hem de ürün kalitesi üzerindeki etkileri nedeniyle sistem veriminin azalmasına neden olmaktadır. Astar aşınması değirmen mantosunun hasar görmesine veya öğütücü ortamın değirmen içerisindeki hareket yörüngesinin bozulmasına neden olabilir [14]. Öğütücü medyada meydana gelen aşınma ise nihai ürünün kalitesi, enerji tüketimi ve dolayısıyla öğütme maliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir [21].

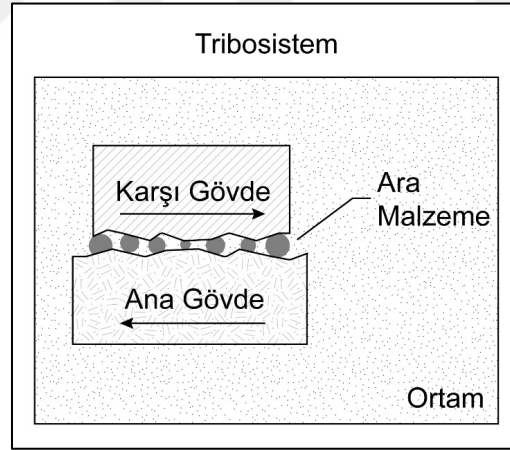
Öğütme uygulamalarının ekonomisi açısından enerji tüketimi ve aşınma maliyetlerinin azaltılması önem taşımaktadır [22]. Öğütücü ortam aşınmasının azaltılması ise öğütme sırasında etkin aşınma mekanizmalarının anlaşılmasını gerektirmektedir. Öğütücü ortamda meydana gelen aşınma konusu takip eden başlıklarda detaylı bir şekilde incelenmektedir.

3. AŞINMA

3.1. Giriş

Aşınma; DIN 50320 standardına göre, mekanik etkiler neticesinde malzeme yüzeylerinden parçaların ayrılması ve buna bağlı olarak da ağırlık kaybının gerçekleşmesi olarak tanımlanmaktadır [23]. Aşınma ayrıca temas eden yüzeylerde gerçekleşen hasar veya malzeme transferi olarak nitelendirilebilmektedir [24]. Mühendislik uygulamaları özelinde ise aşınma, maddelerin göreceli hareketi sonucunda yüzeylerde kademeli olarak gerçekleşen hasar olarak tanımlanmaktadır [25].

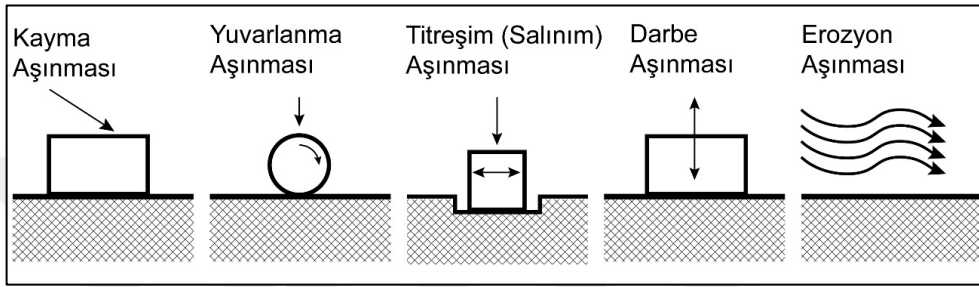
Literatürde aşınmanın bir malzeme özelliği değil bir sistem tepkisi olduğu belirtilmektedir [26]. Bu sistem ana gövde, karşı gövde, ara malzeme ve ortam bileşenlerinden oluşmakta ve “tribosistem” olarak isimlendirilmektedir (Şekil 3.1). Tribosistemin yapısı, içerdiği bileşenlerin özellikleri ve bileşenler arasındaki etkileşimlere göre belirlenmektedir. Sürtünmeler ve aşınmanın etkisiyle tribosistem yapısında meydana gelen değişiklikler sistem davranışında değişikliklere neden olabilmektedir [24].



Şekil 3.1. Tribosistem Bileşenleri [24]

Tribosistemde aşınma temel olarak ana ve karşı gövde bileşenleri (aşınma çifti) üzerinden değerlendirilmektedir. Ara malzeme sahip olduğu özelliklere bağlı olarak aşınmanın azalmasına (örneğin yağlayıcı bir madde) ya da artmasına (örneğin mineral taneleri) neden olabilir. Yüzey temasının gerçekleştiği ortam da aşınma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [27].

Aşınma endüstriyel uygulamalarda sıkça karşılaşılan bir kavram olduğundan, her bir uygulama özelinde aşınmaya neden olan belirgin etkinin araştırılması amacıyla farklı sınıflandırma yöntemleri kullanılmaktadır. Kato [28], aşınma mekanizmalarını yüzeyler arasındaki temasın türü ve aşınma şiddeti parametrelerini göz önünde bulundurarak sınıflandırmıştır. Sistem kinematiği baz alınarak yapılan bir çalışmada ise aşınma mekanizmaları kayma aşınması, yuvarlanma aşınması, titreşim (ya da salınım) aşınması, darbe aşınması ve erozyon aşınması olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 3.2) [24].



Şekil 3.2. Aşınma Mekanizmaları [24]

Aşınma, genellikle iki veya daha fazla mekanizmanın bileşke etkisi sonucunda gerçekleşen bir karmaşık bir süreçtir. Aşınma nedeniyle meydana gelen sorunların önem teşkil etmesi durumunda operasyonel koşullar göz önünde bulundurularak sistemdeki etkin aşınma mekanizması belirlenmelidir [29].

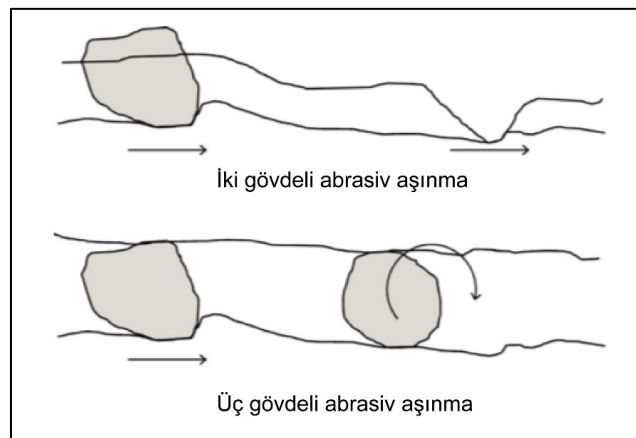
Madencilik ve cevher hazırlama endüstrilerinde aşınan parça ve ekipmanların yenilenmesi, bakım işlemleri sırasında ekipmanın duruşuna bağlı olarak gerçekleşen üretim kaybı ve harcanan iş gücü maliyetler açısından önemli bir paya sahiptir [30]. Özellikle kırma ve öğütme birimlerinde aşınma, şut astarları, elekler ve sınıflandırıcılara göre çok daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Cevher hazırlama operasyonlarında meydana gelen toplam aşınmanın yaklaşık %95'i kırma ve öğütme işlemleri sırasında oluşmaktadır [31]. Kırma ve öğütme operasyonlarının enerji yönünden yoğun olması, bu birimlerde kullanılan ekipmanların şiddetli darbe ve abrasiv aşınmaya maruz kalması aşınma hızlarında artışa neden olmaktadır. Kırma ve öğütme işlemlerine ait maliyetler arasında öğütücü ortam ve değirmen astarlarında meydana gelen aşınmanın payı ise %40 ila %45 arasında değişmektedir [5].

Aşınma ile ilgili maliyetlerin öğütme işlemi üzerinde yoğunlaşmış olması araştırmacıları bu işlem sırasında görülen etkin aşınma mekanizmalarının araştırılmasına yönlendirmiştir. Bhushan [32], madencilik ve cevher hazırlama uygulamalarında karşılaşılan en önemli aşınma tiplerinin abrasiv aşınma ve darbe aşınması olduğu belirtmektedir. Iwasaki [33] ve Blickensderfer [34], yaş öğütme işleminde öğütücü bilya aşınmasının koroziv, abrasiv ve darbe aşınması ile meydana geldiğini belirtmektedir. Radziszewski [3], bilyalı değirmende gerçekleşen toplam aşınmayı modellemek amacıyla bu üç aşınma tipini temel alan çalışmalarda bulunmuştur.

Abrasiv ve koroziv aşınma tiplerinin yaş ve kuru öğütme uygulamaları üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalışmalar, kuru öğütme sistemlerinde koroziv aşınmanın gerçekleşmediğini işaret etmektedir [34, 35]. Bu çalışma kapsamında kuru öğütme sistemlerinde belirgin etkiye sahip olan abrasiv aşınma ve darbe aşınması detaylı bir şekilde incelenmektedir.

3.2. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma tribosistem içerisindeki sert taneler ile gövde yüzeylerindeki çıkıntıların etkileşimi sonucunda gerçekleşmektedir [25]. Temas halinde olan her iki yüzeydeki mevcut çıkıntılar veya yüzeylerden biri üzerine tutunmuş ara malzemenin diğer yüzey ile etkileşimi sonucunda iki gövdeli abrasiv aşınma, bu yüzeyler arasında sert tanelerin bir ara katman halinde bulunması veya serbest halde hareket ediyor olması durumunda ise üç gövdeli abrasiv aşınma meydana gelmektedir [36].

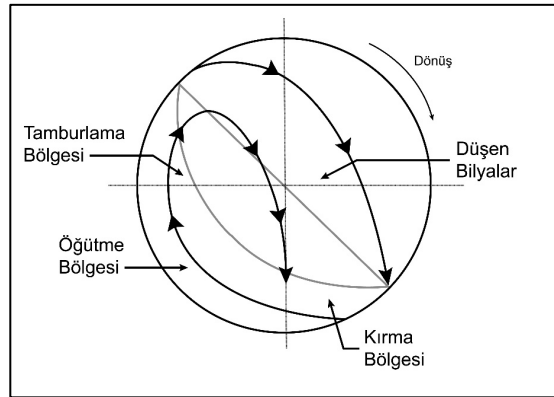


Şekil 3.3. iki gövdeli ve üç gövdeli abrasiv aşınma [37]

Üç gövdeli abrasiv aşınma, tribosistem bileşenlerinden ana gövde ve karşı gövdenin arasındaki mesafe ve ara malzemenin sistemdeki konumuna göre iki farklı şekilde gerçekleşebilir. Ara malzemenin birbirine oldukça yakın konumlarda bulunan yüzeyler arasında sıkışması sonucunda üç gövdeli kapalı abrasiv aşınma, temas eden yüzeylerin birbirinden ayrık olması ya da aşınmanın yalnızca yüzeylerden biri üzerinde gerçekleşmesi durumunda ise üç gövdeli açık abrasiv aşınma meydana gelmektedir [38].

Üç gövdeli açık abrasiv aşınma, sistemdeki ara malzemeye uygulanan kuvvetin büyüklüğüne göre yüksek gerilimli ve düşük gerilimli olarak sınıflandırılmaktadır [37]. Yüksek gerilimli abrasiv aşınmada ara malzeme üzerine uygulanan kuvvet yeterince yüksek olduğundan malzeme ufalanırken, düşük gerilimli abrasiv aşınmada ara malzemenin yapısında herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir [24].

Rao ve Natarajan [39] abrasiv aşınma sürecini bilya şarjının değirmen içerisindeki hareketi ile ilişkilendirerek bilya aşınması bağlamında değerlendirmiştir. Üç gövdeli, açık ve yüksek gerilimli abrasiv aşınma yoğunlukla kırma bölgesinde gerçekleşmekte iken, öğütme bölgesinde birbiri üzerinde kayan öğütücü bilyalar düşük gerilimli abrasiv aşınmaya neden olmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Bilya şarjı profili [40]

3.3. Darbe Aşınması

Darbe aşınması katı maddelerin tekrarlı bir şekilde temas etmesi sonucu gerçekleşmektedir. Darbe aşınmasının şiddeti, çarpışan maddelerin kütlesi ve malzeme özelliklerinin yanı sıra çarpışmanın doğrultusu ve hızına göre değişmektedir [37].

Eş zamanlı olarak gerçekleşen çarpışma ve kayma hareketleri ile oluşan yüksek gerilmeler katı yüzeylerde plastik deformasyon mekanizması ile aşınmaya neden olmaktadır [41, 42]. Yüksek yüzey sertliğine sahip metaller veya gevrek malzemelerin periyodik olarak darbeye maruz kalması ile yüzey yorgunluğu mekanizması belirgin duruma gelmektedir [43]. Bu mekanizmanın etkisiyle yüzeye yakın bölgelerde oluşan çatlaklar kademeli olarak ilerleyerek pullanmaya neden olmaktadır [24]. Çatlak oluşumu ve pullanma nedenleriyle oluşan aşınmayı önlemek amacıyla darbeye maruz kalan yüzeylerin yeterli sertliğe ve darbe dayanıklılığına sahip olması gerekmektedir [44].

3.4. Aşınma Direnci ve Önemi

Mekanik ekipmanlarda hareketli parçaların temas eden yüzeylerinde meydana gelen aşınma ekipmanların kullanım ömrünü kısaltmaktadır. Sürtünmeler nedeniyle sisteme sağlanan enerjinin bir kısmı ısıya dönüşerek ekipman verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan aşınma ve enerji kayıpları öngörülebilir nitelikte olmakla birlikte bu etkilerin tamamen engellenmeleri mümkün değildir. Bu durum her bir uygulama özelinde aşınma direncine sahip malzemelerin tasarımını gerekli kılmaktadır.

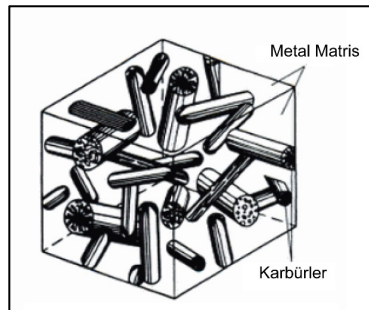
Öğütme işleminde kullanılan bilyalı değirmenlerde enerjinin büyük bir kısmı ses, titreşim ve ısı formunda kaybedilmektedir. Bilyalı değirmende öğütme işleminde yeni yüzeylerin oluşması sırasında harcanan enerjinin bilyalı değirmene sağlanan elektrik enerjisine oranı %1 ya da daha az olabilmektedir [45]. Bu durum bilyalı değirmenlerde öğütme işleminin oldukça verimsiz olduğunu işaret etmekle beraber sistem veriminin artırılması için yapılacak iyileştirme çalışmaları için geniş bir alan sunmaktadır. Öğütücü bilyaların üretiminde kullanılacak malzeme özelliklerinin uygun bir şekilde belirlenmesi ile yüksek aşınma direncinin sağlanması ve dolayısıyla operasyonel maliyetlerin azaltılması mümkün olabilmektedir.

Kuru öğütme uygulamasının gerçekleştirildiği bilyalı değirmenlerde etkili aşınma mekanizmaları daha önceki bölümlerde abrasiv aşınma ve darbe aşınması olarak verilmiştir. Bu mekanizmaların etkisi altındaki bir yüzeyde aşınma direncinin sağlanabilmesi için malzemenin görece yüksek sertliğe ve yeterli düzeyde darbe dayanıklılığına sahip olması istenmektedir [37]. Yüksek sertlik abrasiv aşınma direnci sağlarken darbe dayanıklılığı malzeme gövdesinde biriken gerilmelerin plastik deformasyona neden olmasını engellemektedir [22].

3.5. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri

Öğütücü ortam üretiminde sertlik ve darbe dayanıklılığı gibi malzeme özelliklerini sağlamak amacıyla alaşımlı beyaz demirler tercih edilmektedir [46, 47]. Yüksek krom alaşımlı beyaz dökme demirler ham döküm halinde yüksek aşınma direncine sahip olmakla beraber bu malzemelere uygun ısıl işlem uygulamaları ile darbe dayanımı kazandırılabilir. Yüksek kromlu beyaz dökme demirler, bu özellikleri nedeniyle cevher hazırlama, çimento üretimi, çamur pompalama işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

Yüksek kromlu beyaz dökme demir (YKBD) ağırlıkça %11 ila 30 aralığında krom ve %1.8 ila 3.6 aralığında karbon içeren özel bir tür demir-krom-karbon alaşımıdır [48]. Bu malzemenin aşınma direnci temel olarak mikro yapı özellikleri ile ilişkilendirilmektedir [49]. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikro yapısı karbürler ve metal matris olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır (Şekil 3.5) [50]. Bu malzemenin aşınma direnci ile mikro yapısında bulunan karbürler ve metal matrisin özellikleri arasındaki ilişki bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir [4, 51, 52].



Şekil 3.5. Yüksek kromlu dökme demirin kesit görüntüsü

3.5.1. Karbürler

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma direnci temel olarak mikro yapıda bulunan sert karbürler tarafından sağlanmaktadır [53]. Karbürler malzemenin sertliğine ve dolayısıyla aşınma direncine katkı sağlamaktadır. YKBDD mikro yapısında birincil (veya ötektik) ve ikincil karbürler olmak üzere iki tip karbür bulunmaktadır [54]. Birincil karbürler ergiyik haldeki alaşımın katılaşması sırasında oluşurken, kromca zengin ikincil karbürler ise ısıtma işlemlerinin ardından matris içerisinde çökelmektedir [55]. Bazı karbür tiplerinin sertlik değerleri Çizelge 3.1’de listelenmektedir.

Çizelge 3.1. Karbürlerin sertlik değerleri [56]

Karbür Tipi	Sertlik (HV)
M_3C	1060-1240
M_7C_3	1200-1800
$M_{23}C_6$	976-1650

Kimyasal kompozisyona eklenen karbür yapıcı elementler ve karbon miktarının artırılması ile karbür miktarında artış sağlanabilmektedir [55]. Karbürlerin hacimsel fraksiyonundaki artış ile mikro yapının aşınma direncinin artırılması mümkün olmaktadır [57].

3.5.2. Metal Matris

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin darbe dayanıklılığı temel olarak metal matrisin yapısı ile ilişkilidir. YKBDD’in aşınma direnci yalnızca metal matrisin karbürleri yeterli seviyede desteklemesi ile gerçekleşir. Tersine bir durumda aşındırıcı tanelerin etkisi ile karbürler kırılarak matristen ayrılırlar [22]. En yüksek sertlik ve abrasiv aşınma direncine ulaşmak için metal matrisin tamamıyla martenzitik yapıda olması istenmektedir [57].

Martenzit temel olarak karbon ile aşırı doymuş hale getirilmiş bir katı demir çözeltisi olarak tanımlanabilir [52]. Karbon tutma yeteneğinin daha yüksek olması nedeniyle östenitik ve perlitik matrislere göre daha yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahiptir (Çizelge 3.2)[58].

Çizelge 3.2. Farklı matris yapılarının sertlik değerleri

Matris Tipi	Sertlik (HV)
Östenit	210
Perlit	265
Martenzit	940

3.6. Aşınma Karakterizasyonu

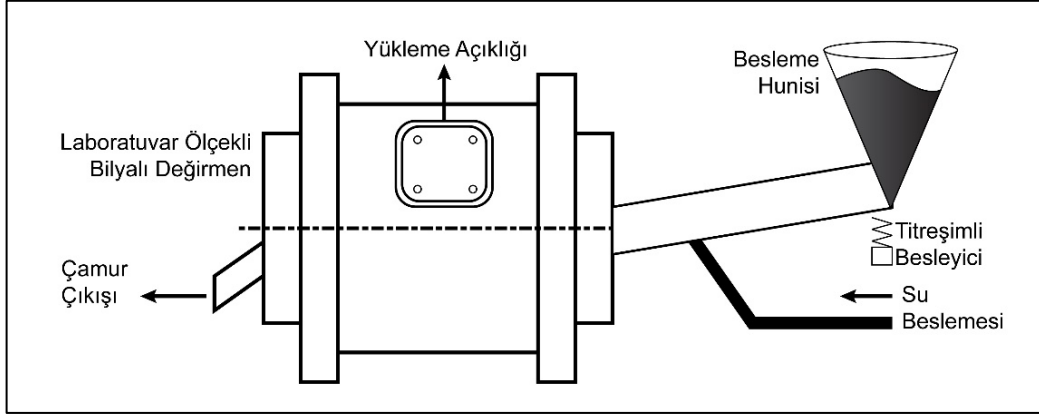
Literatürde farklı araştırmacılar tarafından, bilya özelliklerinin karakterize edilmesine yönelik çeşitli test teknikleri geliştirilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde test yöntemlerine ilişkin detaylar verilmektedir.

3.6.1. İşaretli Bilya Aşınma Testi

İşaretli bilya aşınma testi, öğütücü bilya aşınmasının belirlenmesine yönelik standartlaştırılmış bir test yöntemidir. Endüstriyel ölçekte eşit koşullar altında farklı malzemelerden üretilmiş öğütücü bilyaların aşınma oranlarını karşılaştırmak için güvenilir bir yaklaşım sunmaktadır. Test edilecek ortam, tesis değirmenine şarj edilmeden önce işaretlenir ve tartılır. Numune işaretleme işlemi farklı numaralarda, boyutlarda ve geometride birkaç delik ya da yarık açarak yapılabilir [5].

İşaretleme işlemi, ısı nedeniyle mikro yapıda veya mekanik özelliklerde ortaya çıkabilecek değişikliklerden kaçınmak için dikkatle yapılmalıdır. Tesis değirmeninin duruşu sırasında ekipman içerisinden alınan işaretli bilyalar yeniden tartılarak aşınma miktarları belirlenir. Bu yöntem ayrıca laboratuvar ortamında da gerçekleştirilebilmektedir.

Laboratuvar ölçekli işaretli bilya testinde farklı bilya grupları kullanılarak 46 devir/dakika hızla dönen 0.6 x 0.6 m boyundaki laboratuvar değirmeninde yaş öğütme işlemi gerçekleştirilir. Gerçek saha cevheri kullanılarak hazırlanan %75 katı içeriğine sahip besleme çamuru 300 gr/dakika hız ile değirmene beslenmektedir. Toplamda 100 saat süren öğütme işlemi süresince eşit zaman aralıkları ile alınan beş ölçüm ile işaretli bilyalardaki ağırlık kaybı belirlenir [59]. Test düzeneği Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Laboratuvar ölçekli işaretli bilya test düzeneği

3.6.2. Bilyalı Değirmen Aşınma Testi (BMAT)

Bilyalı değirmen aşınma testi, bilyalı değirmenlerde meydana gelen yüksek gerilimli abrasiv aşınma koşullarının laboratuvar ortamında yeniden oluşturulması amacıyla geliştirilmiştir [60]. BMAT, endüstriyel değirmenlerdeki ortam koşullarını yansıtmakla birlikte gerçek saha cevherlerinin kullanımına imkan sağlamaktadır. Bu özellikleri sebebiyle farklı alaşımlardan üretilmiş malzemelerin aşınma performanslarının sayısal veriler temelinde karşılaştırılması mümkün olmaktadır.

Testler 0.3x0.3 m boyutlu değirmende, %40 kritik hızda, 30 kg ağırlığa sahip bilya şarjı kullanılarak yapılmaktadır. Değirmen içerisine bilya şarjı arasındaki boşluk hacmini dolduracak miktarda aşındırıcı malzeme ve bir miktar su eklenerek %70 katı içeren çamur elde edilmektedir. Bilya şarjı ve aşındırıcı malzemeye ek olarak aşınma performansları değerlendirilen farklı özelliklere sahip örnekler (düşük alaşımlı yüksek karbonlu perlitik çelik, yüksek krom-molibdenli beyaz dökme demir vb.) de değirmene eklenmektedir.

Bu test yönteminde aşınma miktarları bilya şarjı elemanlarından görünür biçimde farklı olan örnekler üzerinden ölçülmektedir. Bu örnekler değirmen içerisinde öğütücü ortam gibi davranmakta veya değirmen cidarına sabitlenerek testler süresince astar görevi görmektedir. Cüruf, kuvars, kum gibi aşındırıcı malzemeler her biri 45 dakikalık en az iki test süresince öğütülür. Her bir malzeme tipinin ortalama aşınma miktarları yapılan test ve testlerde kullanılan özdeş örneklerin sayısı göz önünde bulundurularak belirlenir.

3.6.3. Newmont Testi

Newmont Madencilik firması işbirliğinde laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen testleri temel alınarak endüstriyel ölçekli bilyalı değirmende öğütücü ortam aşınmasını tahmin edebilmek amacıyla bir prosedür geliştirilmiştir [9]. Bu testlerde laboratuvar ölçekli değirmen düzeneğinde besleme, bilya şarjı ve çalışma parametreleri ayarlanarak tesis değirmeninden alınan ürün inceliğine ulaşılması hedeflenir.

Testler 41 mm çaplı bilyalardan oluşan 18.2 kg ağırlığında bilya şarjı kullanılarak 52 devir/dakika hızla dönen 305 x 305 mm boyutlu değirmende gerçekleştirilir. Değirmen içerisinde 12.7 x 12.7 mm boyutlarında altı adet kaldırıcı raf bulunmaktadır. Tamamı 3.4 mm göz açıklığına sahip elekten geçecek şekilde ufalanan 2.72 kg ağırlığındaki besleme malzemesine 1.4 litre su eklenir. Öğütme sırasında harcanan enerji miktarı her test için Bond ve Levin yöntemleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Aşınma miktarı her testten önce ve sonra bilyaların tartılmasının ile belirlenir. Öğütücü ortamın aşınma hızı, öğütme sırasında harcanan enerji tüketimi temel alınarak ifade edilir. Test çalışmaları sonucunda laboratuvar değirmeninde yürütülen testlerin tesiste meydana gelen öğütücü ortam aşınma oranını % 20 hata payı içinde tahmin edebileceğini göstermiştir.

3.6.4. Bond Aşınma İndeksi

Aşınma oranlarının karakterize edilmesine yönelik bir diğer test Bond aşınma indeksi testidir. Bu test tekniği ile belirli bir malzeme için ölçülen indeks değeri bir formül ile değerlendirilerek harcanan öğütme enerjisine karşılık aşınan metal miktarına ulaşılmaktadır. Öğütücü ortam ve astarların aşınması ile ilişkili formüller aşağıda verilmektedir.

Bilyalı değirmende yaş öğütme uygulamasında;

$$\text{Bilya aşınması (lb / kWh)} = 0.35 \times (A_i - 0.015)^{0.33}$$

$$\text{Astar aşınması (lb / kWh)} = 0.026 \times (A_i - 0.015)^{0.3}$$

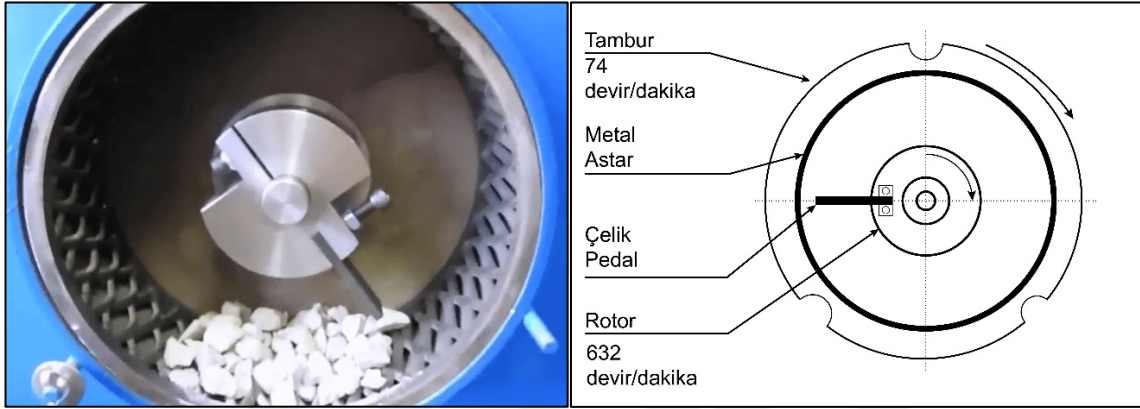
Bilyalı değirmende kuru öğütme uygulamasında;

$$\text{Bilya aşınması (lb / kWh)} = 0.05 \times A_i^{0.5}$$

$$\text{Astar aşınması (lb / kWh)} = 0.005 \times A_i^{0.5}$$

Bond aşınma testinde standart bir test koşulunda bir saat boyunca sürekli olarak cevher taneleri ile çarpışan çelik bir pedalin ağırlık kaybı ölçülmektedir [61]. Pedal

3x1x0.25 inç boyutlarında ve 500 Brinell sertliğinde olup SAE krom-nikel-molibden alaşımı bir tür çelikten üretilmiştir. Yatay eksenli bir mil üzerine bulunan 4.5 inç çapındaki rotora bağlanan çelik pedal 632 devir/dakika hızında dönerek cevher taneleri ile çarpışmaktadır. Rotor ile aynı eksende bulunan, 12 inç çap ve 4.5 inç derinliğe sahip bir tambur rotoru çevrelemektedir. Bu tambur 74 devir/dakika hızla çelik pedal ile aynı yönde dönmektedir. Tamburun iç cidarında bulunan delikli çelik plakalar cevher tanelerini yükselterek test edilen çelik pedal ile çarpışmalarını sağlar. Test düzeneği Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Bond aşınma test düzeneği [61]

Besleme malzemesi olarak -19+12.7 mm tane boyu aralığında 1.6 kg cevher hazırlanır. Her biri 15 dakika süren dört test ile bir saatlik test süresine ulaşılır. Her bir testte 400 gramlık taze besleme kullanılır ve testin ardından bu malzeme dışarıya alınır. Pedaldaki ağırlık kaybı gram cinsinden ifade edilerek malzemenin aşınma indeksine (A_i) ulaşılır [61]. Bond aşınma testi standart bir aşındırıcı cevher tipinin kullanılması ile farklı malzeme veya ısıl işlemlerin aşınma üzerindeki etkisinin araştırılmasını mümkün kılmaktadır.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu başlık altında tez kapsamında kullanılan materyaller ve yöntemler aktarılmakta olup, değerlendirilmesi yapılan öğütücü bilya tiplerinin sırasıyla kimyasal içerikleri, mikro yapı bileşenleri ve sertlik ölçümleri hakkında bilgiler verilmektedir. Ayrıca öğütme testlerinde kullanılan malzemelerin ve test düzeneğinin özellikleri ile öğütücü bilya aşınması ile ilgili endüstriyel gözlemler bu başlık altında özetlenmektedir.

4.1. Öğütücü Bilya Tipleri

Bu çalışma kapsamında teknik özellikleri birbirinden farklı, yüksek krom içerikli dökme demirden üretilmiş 6 öğütücü bilya grubu kullanılmıştır. Her bir öğütücü ortam grubu 30 mm çapa sahip bilyalardan oluşmakta olup, Çemaş Döküm Sanayi tarafından özel olarak üretilmiştir. A1, A2, A3, B1, B2 ve C1 olarak isimlendirilen bilya gruplarının kimyasal kompozisyonları Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Test edilen öğütücü bilyaların kimyasal kompozisyonları

Bilya Tipi	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%P	%S
A1	2.15	0.78	0.88	12.90	-	0.05	0.02
A2	2.21	0.73	0.87	12.80	0.54	0.04	0.02
A3	2.27	0.53	0.67	12.10	1.98	0.03	0.02
B1	3.04	0.74	0.80	12.93	0.52	0.04	0.02
B2	2.94	0.55	0.65	12.72	1.90	0.05	0.02
C1	2.20	0.83	0.83	17.54	-	0.05	0.02

Çizelge 4.1'de ağırlıkça oranları verilen karbon, silisyum, manganez, krom, molibden, fosfor ve kükürt elementlerine ek olarak kimyasal kompozisyonun geri kalanında demir elementi bulunmaktadır. Kimyasal kompozisyon bilgisine ek olarak her bir öğütücü bilya tipinin mikro yapısı Nikon marka Elipse MA-100 optik mikroskop ile incelenmiştir (Şekil 4.1). Ölçülen martenzitik matris, birincil ve ikincil karbürlerin hacimsel oranları Çizelge 4.2'de sunulmaktadır.



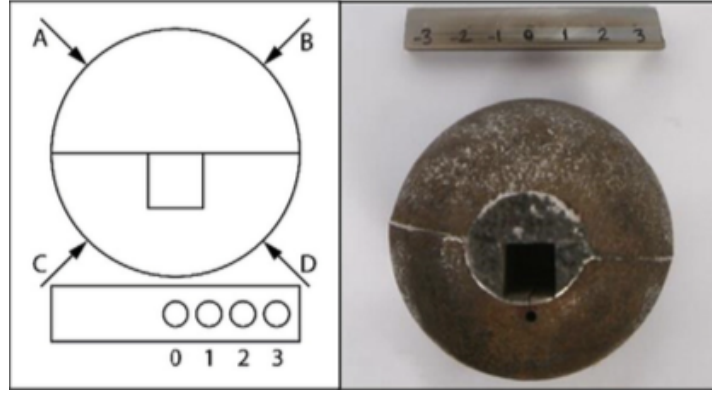
Şekil 4.1. Nikon elipse MA-100 optik mikroskop

Çizelge 4.2. Mikro yapı bileşenlerinin hacimsel oranları

Bilya Tipi	Martenzitik Matris (%)	Birincil Karbürler (%)	İkincil Karbürler (%)
A1	60	40	6
A2	50	50	5
A3	60	40	15
B1	40	60	6
B2	40	60	12
C1	50	50	10

Çizelgeden de anlaşılacağı üzere, hacimsel olarak martenzitik matris ile birincil karbürler genel yapıyı oluşturmakta olup, literatürde belirtildiği üzere ikincil karbürler ısıtılma işlemi sonrasında metal matris içerisine çökelmektedirler [62].

Öğütücü bilyaların sertlik değerleri bilya yüzeyi ve bilya merkezinden alınan numune üzerinde yapılan ölçümler ile tayin edilmiştir. Yüzey sertliği (A, B, C, D) ve hacimsel sertlik (0, 1, 2, 3) ölçümlerinin alındığı noktalar Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Ölçümler Mergo GmbH marka Minor-69 tipi sertlik cihazı kullanılarak Rockwell-C yöntemiyle elde edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.2. Sertlik ölçümü alınan noktalar



Şekil 4.3. Mergo GmbH Minor-69 sertlik ölçüm cihazı

Sertlik ölçümleri Çizelge 4.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 4.3. Rockwell-C sertlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlar

Bilya Tipi	Yüzey Sertliği				Hacimsel Sertlik			
	A	B	C	D	0	1	2	3
A1	61	62	61	61	57	58	59	61
A2	61	61	60	61	58	58	59	60
A3	61	62	60	61	57	58	59	60
B1	60	61	61	61	59	59	60	61
B2	60	61	61	61	58	59	60	60
C1	61	62	61	61	57	57	58	60

Sertlik ölçümleri incelendiğinde yüzey sertliği değerlerinin büyük oranda benzerlik gösterdiği ve hacimsel sertlik değerlerinin dar bir aralıkta değiştiği anlaşılmaktadır. Bu veriler martenzitik matrisine sahip, 30-40 mm çaplı öğütücü bilyalara ait literatürde verilen ortalama sertlik değerleri ile uyum içerisindedir [11].

4.2. Malzeme Karakterizasyonu

Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmende yapılan aşınma testlerinde farklı malzemelerin bilya aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aşınma deneylerinde, granüle yüksek fırın cürufu ve klinker kullanılmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu, çimento üretiminde kullanılan oldukça aşındırıcı bir malzeme olması nedeniyle, klinker ise çimentonun yarı-mamülü olmasından dolayı tercih edilmiştir. Bu malzemelerin kimyasal kompozisyonları aşağıda gösterilmektedir (Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5).

Çizelge 4.4. Granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu

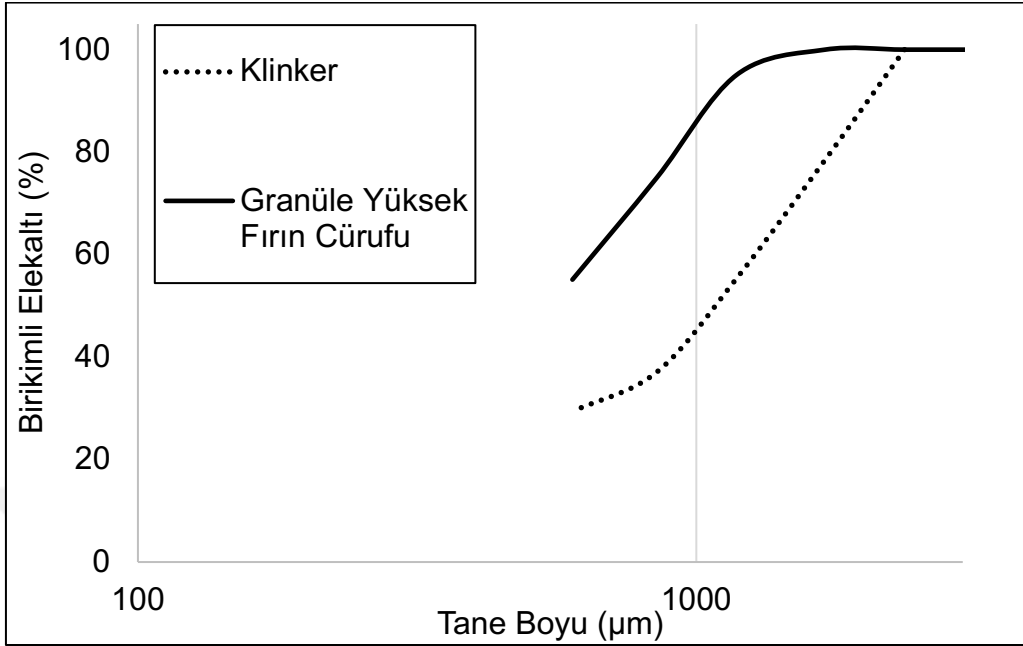
Bileşen	%	Bileşen	%
Fe	0.93	Na ₂ O	0.37
SiO ₂	33.98	K ₂ O	0.84
Al ₂ O ₃	13.03	TiO ₂	0.90
CaO	29.87	P ₂ O ₅	<0.01
MnO	2.37		
MgO	12.18		

Çizelge 4.5. Klinkerin kimyasal kompozisyonu

Bileşen	%	Bileşen	%
Fe ₂ O ₃	2.67	Na ₂ O	0.41
SiO ₂	21.59	K ₂ O	0.98
Al ₂ O ₃	6.16	Cl	0.01
CaO	66.05	Serbest CaO	1.11
MgO	1.48	Kızdırma kaybı	0.24
SO ₃	0.42	Çözünmeyen Kalıntı	0.08

Klinker ve granüle yüksek fırın cürufu laboratuvar ölçekli çeneli ve merdaneli kırıcılar kullanılarak boyut küçültme işlemine tabi tutulmuştur. Tamamı 2.36 mm göz açıklıklı elekten geçecek şekilde ufalanan besleme malzemelerinin tane boyu dağılımları

elek analizi yöntemi ile belirlenmiştir. Besleme malzemelerinin tane boyu dağılımları Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Besleme malzemelerinin tane boyu dağılımları

Malzeme karakterizasyonu çalışması kapsamında malzemelerin öğütülebilirlik indeksleri Bond test prosedürü uygulanarak belirlenmiştir [63]. Çizelge 4.6'da gösterilen Bond iş indeksi değerleri malzemelerin öğütülmeye karşı gösterdikleri direnci ifade etmektedir.

Çizelge 4.6. Malzemelerin Bond iş indeksi değerleri

Malzeme	İş İndeksi (kWsa/ton)
Klinker	14
Granüle yüksek fırın cürufu	20

Endüstriyel ölçekli bilyalı değirmenlerde aşınma, yüklemesi yapılan bilya miktarının iki bilya yüklemesi arasındaki süre boyunca öğütülen malzemeye oranı (kg/ton) veya aynı sürede harcanan enerjiye oranı (kg/kWsa) cinsinden ifade edilmektedir. Laboratuvar ortamında elde edilen sonuçların da aynı birimler kullanılarak ifade edilmesinin laboratuvar ve endüstriyel ölçekli aşınmaların ilişkilendirilmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir.

Bu amaçla Bond tarafından geliştirilen enerji eşitliği kullanılarak öğütme sırasında harcanan enerji hesaplanmıştır (Eşitlik 1).

$$W = 10 \times W_i \times (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}}) \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

W : Öğütmede harcanan enerji (kWsa/ton)

W_i : Malzemenin iş indeksi (kWsa/ton)

P_{80} : Ürünün %80'inin geçtiği elek açıklığı (μm)

F_{80} : Beslemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı (μm)

Öğütme sırasında harcanan enerjinin hesaplanabilmesi için malzemenin iş indeksinin yanı sıra besleme ve ürün malzemesinin yüzde 80'inin geçtiği elek açıklıklarının da belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla değirmen beslemesi ve ürünün tane boyu dağılımları elek analizi ve lazer kırınım yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Elek analizi yöntemiyle beslemedeki en iri boydan 150 μm değerine kadar yapılan ölçümlere ek olarak, Sympatec marka lazerli tane boyu ölçüm cihazı ile 1.8 μm boyutuna kadar tane boyu ölçümleri alınabilmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Lazerli tane boyu ölçüm cihazı

4.3. Test Yöntemi

Bu tez çalışmasında, öğütücü bilyanın malzeme özellikleri ile aşınma ilişkisini inceleyen tamburlama testlerinin yanı sıra öğütülen malzemenin cinsi ve öğütücü bilya tiplerinin aşınma üzerindeki etkilerini inceleyen öğütme testleri uygulanmıştır. Malzeme doluluğu testleri olarak isimlendirilen deney grubunda ise değirmen içerisindeki malzeme miktarı ile aşınma arasındaki ilişki incelenmiştir.

Bu başlık altında kullanılan test düzenekleri ve yöntemler hakkında bilgiler aktarılmaktadır.

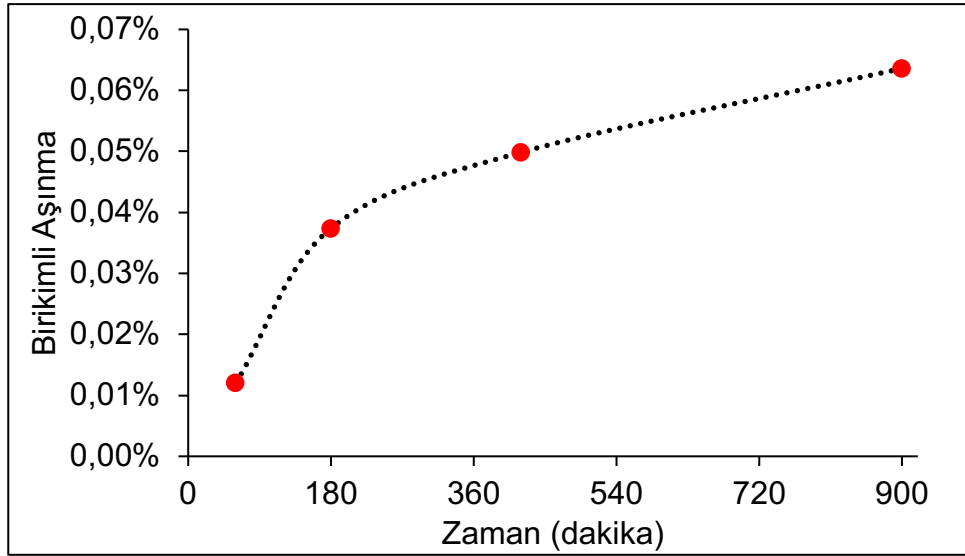
4.3.1. Tamburlama Testleri

Bilyalar arası etkileşimin aşınma üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlayan tamburlama testlerinde değirmen içerisinde yalnızca öğütücü bilyalar bulunmaktadır. Bu yöntemle öğütülen malzemenin aşınma üzerindeki etkisi ortadan kaldırılarak, öğütücü bilyanın malzeme özelliklerinin aşınma sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Kimyasal kompozisyonları “4.1. Öğütücü Bilya Tipleri” başlığı altında verilen 6 farklı tipteki öğütücü ortam grubunun her biri belirli zaman aralıkları (60, 120, 240 ve 480 dakika) boyunca tamburlanmıştır. Her bir tamburlama işleminin ardından bilya şarjının tamamı değirmenin dışına alınmış ve temizlenmiştir. Değirmen içerisindeki her bir öğütücü bilyanın ağırlıkları hassas ölçümlerle belirlenmiş ve bilya şarjındaki toplam ağırlık kaybı değerine ulaşılmıştır. Öğütücü ortamın ağırlık kaybı oranı zamanın fonksiyonu olarak birikimli bir şekilde ifade edilmiştir. Örnek bir hesaplama tablosu ve aşınma grafiği Çizelge 4.7 ve Şekil 4.6’da sunulmaktadır.

Çizelge 4.7. Örnek hesaplama tablosu

Test Süresi		Bilya Şarjı Ağırlığı		Ağırlık Kaybı	
dakika	birikimli dakika	gr	gr	%	birikimli %
0	0	9991.18	-	-	-
60	60	9989.98	1.20	0.012	0.012
120	180	9987.45	2.53	0.025	0.037
240	420	9986.20	1.25	0.013	0.050
480	900	9984.83	1.37	0.014	0.064



Şekil 4.6. Örnek aşınma grafiği

Elde edilen sonuçların karşılaştırılabilir nitelikte olmasını sağlamak amacıyla tüm testlerde tamamı 30 mm çaplı bilyalardan oluşan ve yaklaşık 10 kg ağırlığa sahip bilya şarjı kullanılmıştır.

Bu prosedür üç farklı değirmende uygulanarak değirmen geometrisi ile aşınma miktarları arasındaki ilişki de incelenmiştir. Test çalışmalarında kullanılan değirmenlere ait teknik özellikler Çizelge 4.8'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.8. Test çalışmalarında kullanılan değirmenlerin özellikleri

	Değirmen 1	Değirmen 2	Değirmen 3
Çap (mm)	305	711	950
Uzunluk (mm)	305	508	1450
Kritik Hız %	91	66	28
Dönüş Hızı (devir/dakika)	70	33	12

Tamburlama testlerinde altı farklı öğütücü bilya grubunun (A1, A2, A3, B1, B2, C1) her biri, üç farklı değirmende (Değirmen 1, Değirmen 2 ve Değirmen 3) uygulanan testlerle incelenmiştir. Her bir test grubunda 60, 120, 240 ve 480 dakikalık tamburlama işlemlerinin ardından ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Toplamda 900 dakikaya ulaşan tamburlama testleri, öğütücü ortamın karakteristik özellikleri ve değirmen boyutlarının aşınmayı hangi şekilde etkilediği konusunda veri sağlamaktadır.

4.3.2. Öğütme Testleri

Bu test grubunda yapılan çalışmalarda, değirmen içerisine öğütücü bilyaların yanı sıra malzeme eklemesi de yapılmış ve böylelikle bilyalar arası etkileşimlere ek olarak bilya-malzeme arası etkileşimlerin aşınma sonuçları üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Öğütme testlerinde laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen (Bond değirmeni) kullanılmıştır (Şekil 4.7)



Şekil 4.7. Bond değirmeni

Öğütme testlerinde uygulanan deney prosedürü temel olarak kesikli öğütme işlemlerinin ardından bilya şarjındaki ağırlık kaybının ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Öğütme testleri malzeme ve öğütücü bilya özelliklerinin incelendiği çalışmaları kapsamaktadır.

4.3.2.1. Farklı Öğütücü Ortam Grupları ile Öğütme

Öğütücü bilya özelliklerinin etkisini incelemek amacıyla aynı özelliklere sahip besleme malzemesi altı farklı öğütücü bilya şarjı kullanılarak öğütülmüştür. Her bir öğütücü bilya şarjı için 30, 60, 120 ve 240 dakikalık kesikli öğütme işlemleri uygulanmıştır. Besleme malzemesi olarak granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bu malzeme, tane boyu dağılımının belirlenmesinin ardından her bir öğütme periyodunun başlangıcında değirmene beslenmiş ve öğütme işleminin ardından öğütücü bilyaların ağırlıkları ile ürün malzemesinin tane boyu dağılımı belirlenmiştir. Her bir öğütücü bilya grubundaki aşınma miktarları toplamda 450 dakikaya ulaşan öğütme testleriyle belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4.3.2.2. Farklı Malzemeler ile Öğütme

Malzeme özelliklerinin aşınma üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yürütülen çalışmalarda özellikleri "4.2. Malzeme Karakterizasyonu" başlığında verilen granüle yüksek fırın cürufu ve klinker kullanılmıştır. Bu malzemeler A1 tipi öğütücü bilya şarjı kullanılarak öğütülmüş ve öğütücü bilyalardaki ağırlık kayıpları takip edilmiştir. Testler 30, 60, 120 ve 240 dakikalık kesikli öğütme işlemleri şeklinde uygulanmıştır. Klinker ve granüle yüksek fırın cürufunun besleme tane boyu dağılımlarına ek olarak her bir öğütme periyodunun ardından değirmen içerisinden alınan numunelerin tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Tane boyu ölçümleri ile elde edilen F_{80} ve P_{80} değerleri kullanılarak Bond eşitliği (Eşitlik 1) aracılığıyla öğütmede harcanan enerji hesaplanmıştır. Bu test grubunda elde edilen verilerin malzemenin öğütülmeye karşı gösterdiği direnç ile öğütücü bilyalardaki aşınma miktarları arasındaki ilişkinin incelenmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir.

4.3.2.3. Farklı Malzeme Doluluğu Oranlarında Öğütme

Öğütme işlemi sırasında değirmen içerisindeki malzeme elektriksel kuvvetlerin etkisiyle bilya yüzeylerine tutunarak öğütücü bilya yüzeylerini sarmakta ve bilyalar arası etkileşimin azalmasına neden olmaktadır. Yastıklama etkisi olarak isimlendirilen bu durum aşınmanın azalmasına neden olmaktadır [22]. Öğütülen malzemenin miktarına bağlı olarak yastıklama etkisinin derecesi ve dolayısıyla aşınma miktarları değişiklik gösterebilmektedir. Değirmen içerisindeki malzeme miktarının aşınma sonuçları üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla farklı malzeme doluluğu oranlarında test çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Malzeme doluluğu testlerinde kullanılan granüle yüksek fırın cürufunun yığın yoğunluğu belirlenmesinin ardından, hedeflenen malzeme doluluğu koşullarını sağlamak için değirmene eklenmesi gereken malzeme miktarları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda bilyalar arası boşluk hacminin bilya şarjının yığın hacmine oranı %40 kabul edilmiştir [63]. Her bir test koşulu için öğütme periyotlarının öncesinde değirmene eklenen malzeme miktarları Çizelge 4.9'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.9. Malzeme doluluğu testlerinde kullanılan malzeme miktarları

Malzeme Doluluğu	Malzeme Miktarı (gr)
%10	125
%20	250
%40	500
%60	750
%80	1000
%100	1250

Bu testlerde A1 tipi öğütücü bilya kullanılmış ve farklı malzeme doluluğu oranlarında (%10, %20, %40, %60, %80 ve %100) granüle yüksek fırın cürufu öğütülmüştür. Her bir malzeme doluluğu koşulunda 150 dakikalık 4 kesikli öğütme işlemi uygulanmış, her bir öğütme işleminin ardından ürün numunesinin tane boyu dağılımı ile öğütücü bilyaların ağırlık ölçümleri alınmıştır.

Bu test grubunda malzeme doluluğu ile aşınma arasındaki ilişkinin incelenmesine ek olarak aşınma ölçümlerinin tekrarlanabilirliğini test etmek amacıyla bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde farklı tarihlerde, Bond değirmeninde aynı tip öğütücü bilya şarjı (A1) kullanılarak, aynı malzeme doluluğu koşulunda (%10) ve eşit sürelerde granüle yüksek fırın cürufu öğütülmüş ve bilyalardaki aşınma miktarları 150 dakikalık her bir öğütme periyodunun ardından alınan hassas ölçümlerle belirlenmiştir. Bu ölçümler istatistiksel yöntemle incelenerek toplamda 600 dakikaya ulaşan test gruplarında aşınma miktarları arasında anlamlı bir fark olup olmadığı araştırılmıştır. Tekrarlanabilirlik deney matrisi Çizelge 4.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.10. Tekrarlanabilirlik deney matrisi

Tarih	10.10.2016				28.11.2016			
	1A	1B	1C	1D	2A	2B	2C	2D
Deney Adı								
Öğütme Süresi (birikimli dakika)	150	300	450	600	150	300	450	600

4.4. Bilya Aşınması ile İlgili Endüstriyel Gözlemler

Tez kapsamında yürütülen laboratuvar çalışmalarının yanı sıra üç farklı çimento tesisinde öğütücü bilya aşınması ile ilgili gözlemler yapılmıştır. Bilya boyu ve dağılımı, değirmen geometrisi, üretim miktarı ve bilya doluluğu öğütücü bilya aşınması üzerinde doğrudan etkili olan parametrelerdir. Aşınma değerlerinin kıyaslanması ve ölçeklenmesi yapılırken bu parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kapsamda Tesis A, B ve C olarak isimlendirilen çimento üretim tesislerindeki üretim miktarları üç aylık dönemde gözlemlenmiş, değirmen boyutları, bilya doluluğu ve bilya boyu dağılımı verileri elde edilmiştir. Bu tesislere ait bilya doluluğu değerleri Çizelge 4.11’de verilmektedir.

Çizelge 4.11. Çimento öğütme tesislerinin bilya doluluğu değerleri

	Tesis A	Tesis B	Tesis C
1. Kamara	%30.07	%25.50	%24.85
2. Kamara	%31.54	%26.00	%26.65

Bilya doluluğu oranı değirmen içerisindeki öğütücü ortamın sahip olduğu yığın hacminin değirmen hacmine oranını ifade eder. Literatürde bu oranın %25 ile %45 arasında değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir [64]. Bilya doluluğu oranının bu değer aralığının dışında olması öğütücü bilyaların değirmen içerisindeki hareket yörüngelerinin bozulmasına neden olmaktadır [11]. Böyle bir durum öğütücü bilyaların aşınma hızlarının artmasına veya dengesiz aşınma nedeniyle bilyaların küresel biçimini kaybetmesine neden olabilmektedir.

Çimento değirmenlerinin boyutları Çizelge 4.12’de, tesislerin üretim miktarları ve devreden yük oranları Çizelge 4.13’te verilmektedir.

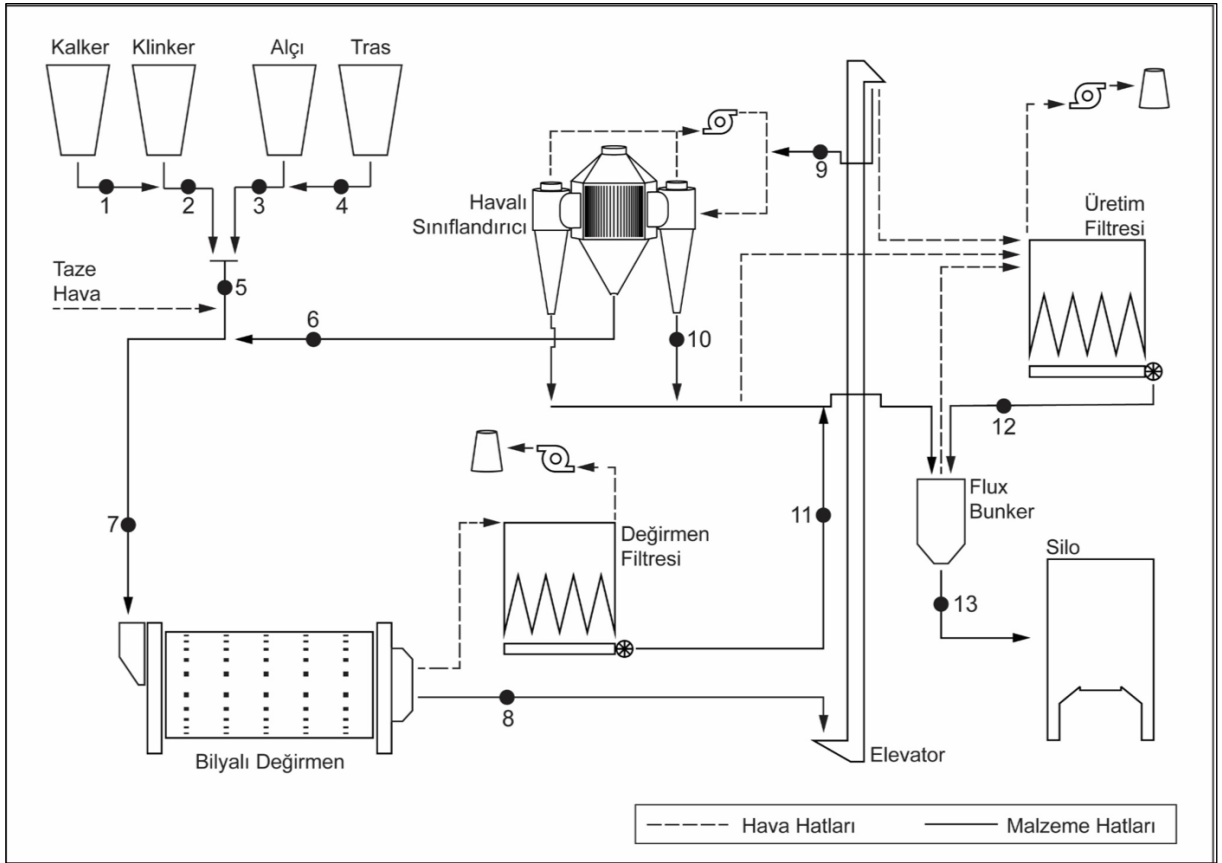
Çizelge 4.12. Çimento değirmenlerinin boyutları

	Tesis A		Tesis B		Tesis C	
	Boy	İç Çap	Boy	İç Çap	Boy	İç Çap
1. Kamara	2.86 m	3.31 m	4.28 m	4.55 m	3.90 m	4.00 m
2. Kamara	6.58 m	3.43 m	10.85 m	4.55 m	8.40 m	4.00 m

Çizelge 4.13. Tesislerin üretim miktarları ve devreden yük oranları

	Tesis A	Tesis B	Tesis C
Üretim (ton/saat)	42	125	92
Devreden yük (%)	297	196	201

Tesis A üretim şemasında (Şekil 4.8) numaralandırılan akış kolları Çizelge 4.14'te listelenmektedir.



Şekil 4.8. Tesis A üretim şeması

Çizelge 4.14. Tesis A akış kolları

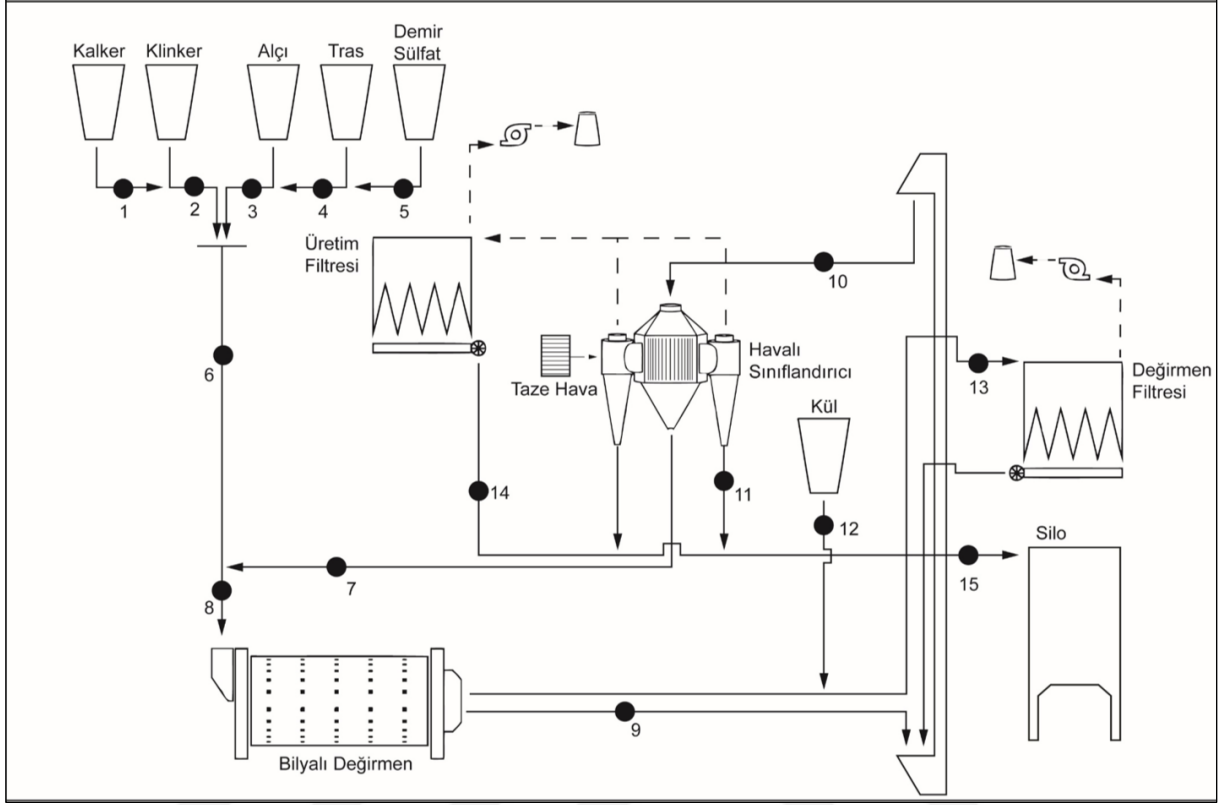
1 Kalker Beslemesi	8 Değirmen Taşanı
2 Klinker Beslemesi	9 Sınıflandırıcı Beslemesi
3 Alçı Beslemesi	10 Sınıflandırıcı İncesi
4 Tras Beslemesi	11 Değirmen Filtresi Çıkışı
5 Taze Besleme	12 Üretim Filtresi Çıkışı
6 Sınıflandırıcı Geri Dönüşü	13 Nihai Ürün
7 Değirmen Beslemesi	

Tesis A 'ya ait üretim şeması genel hatlarıyla havalı sınıflandırıcıyla kapalı devre çalışan taşmalı bilyalı değirmen ve üretim filtresinden oluşmaktadır. Değirmen taşanı elevator aracılığıyla sınıflandırıcıya yönlendirilmekte, havalı sınıflandırıcı incesi değirmen filtresi ve üretim filtresinin çıkış akışıyla birleşerek nihai ürünü oluşturmaktadır. Devrenin farklı noktalarındaki çok ince malzeme üretim filtresine yönlendirilip buradan ürün silosuna aktarılarak ürün inceliği ve üretim kapasitesi gibi önemli parametrelerin optimum düzeyde tutulması amaçlanmaktadır. Bu tesisteki çimento değirmenine ait bilya boyu dağılımı ise Çizelge 4.15'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.15. Tesis A çimento değirmeni bilya boyu dağılımı

Bilya Çapı	1. Kamara		2. Kamara	
	ton	%	ton	%
90 mm	9.38	27.08	-	-
80 mm	12.51	36.11	-	-
70 mm	9.38	27.08	-	-
60 mm	3.37	9.72	2.99	3.33
50 mm	-	-	7.48	8.33
40 mm	-	-	14.96	16.67
30 mm	-	-	38.49	42.89
25 mm	-	-	10.87	12.11
20 mm	-	-	8.13	9.06
17 mm	-	-	6.83	7.61

Tesis B üretim şemasında (Şekil 4.9) numaralandırılan akış kolları Çizelge 4.16'da listelenmektedir.



Şekil 4.9. Tesis B üretim şeması

Çizelge 4.16. Tesis B akış kolları

1 Kalker Beslemesi	9 Değirmen Taşanı
2 Klinker Beslemesi	10 Sınıflandırıcı Beslemesi
3 Alçı Beslemesi	11 Sınıflandırıcı İncesi
4 Tras Beslemesi	12 Kül Beslemesi
5 Demir Sülfat Beslemesi	13 Değirmen Filtresi Girişi
6 Taze Besleme	14 Üretim Filtresi Çıkışı
7 Sınıflandırıcı Geri Dönüşü	15 Nihai Ürün
8 Değirmen Beslemesi	

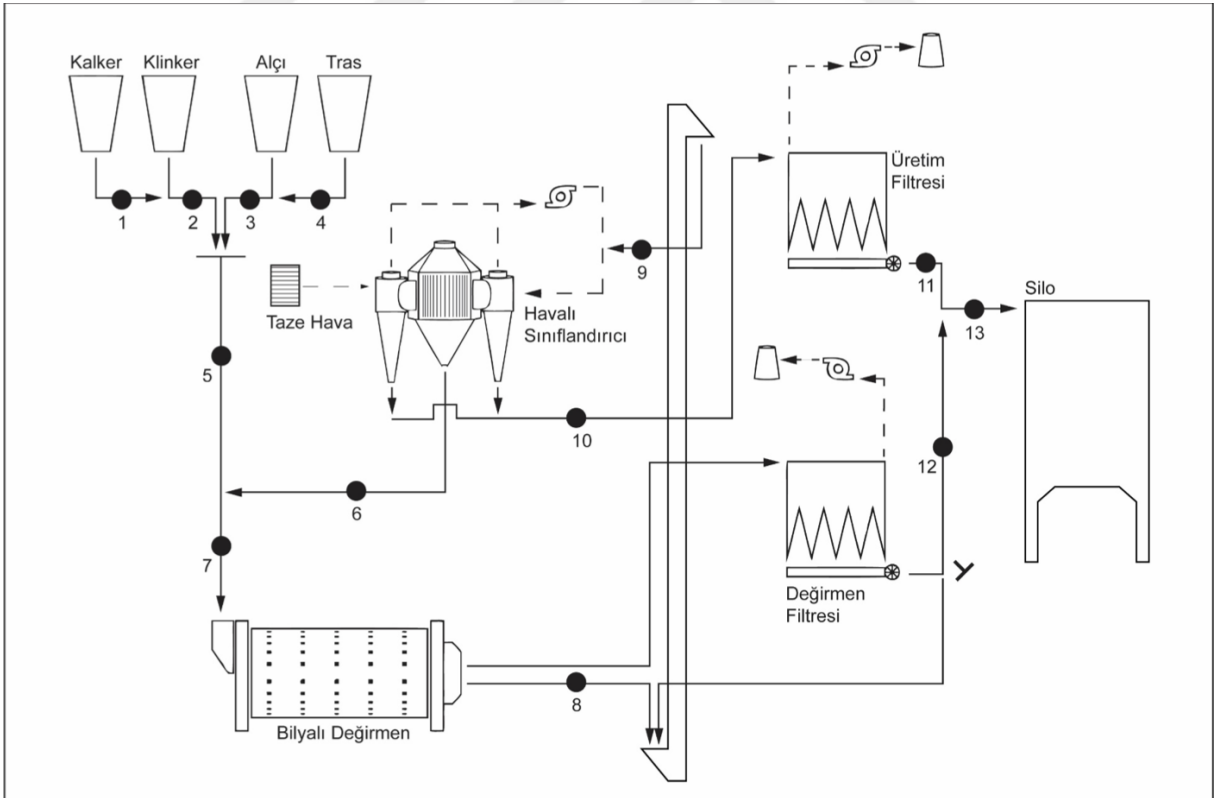
Tesis B 'ye ait üretim şemasında bulunan çimento değirmeni havalı sınıflandırıcı ile kapalı devre çalışmaktadır. Hammaddeler sınıflandırıcı irisiyle birleşerek değirmen beslemesini oluşturmaktadır. Değirmen filtresine süpürülen malzemeye kül ilavesi yapılmasının ardından bu akış havalı sınıflandırıcıya yönlendirilmektedir. Sınıflandırıcı içindeki çok ince boyutlu malzeme sınıflandırıcı filtresi yoluyla

sınıflandırıcıdan dışarı alınmakta ve sınıflandırıcı incesiyle birleşerek nihai ürünü oluşturmaktadır. Bu tesisteki çimento değirmenine ait bilya boyu dağılımı Çizelge 4.17’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.17. Tesis B çimento değirmeni bilya boyu dağılımı

Bilya Çapı	1. Kamara		2. Kamara	
	ton	%	ton	%
90 mm	38.33	27.69	-	-
80 mm	42.59	30.77	-	-
70 mm	27.68	20.00	-	-
60 mm	29.81	21.54	-	-
25 mm	-	-	126.27	35.29
20 mm	-	-	136.8	38.24
15 mm	-	-	94.71	26.47

Tesis C’ ye ait üretim şemasında (Şekil 4.10) numaralandırılan akış kolları Çizelge 4.18’de listelenmektedir.



Şekil 4.10. Tesis C üretim şeması

Çizelge 4.18. Tesis C akış kolları

1 Kalker Beslemesi	8 Değirmen Taşanı
2 Klinker Beslemesi	9 Sınıflandırıcı Beslemesi
3 Alçı Beslemesi	10 Sınıflandırıcı İncesi
4 Tras Beslemesi	11 Üretim Filtresi Çıkışı
5 Taze Besleme	12 Değirmen Filtresi Çıkışı
6 Sınıflandırıcı Geri Dönüşü	13 Nihai Ürün
7 Değirmen Beslemesi	

Tesis C üretim şemasında havalı sınıflandırıcı irisi taze malzemeyle birleşerek bilyalı değirmen beslemesini oluşturmaktadır. Değirmen filtresine süpürülen malzeme sınıflandırıcıya yönlendirilebilmekte ya da ürün silosuna aktarılabilir. Bu uygulama yeterli inceliğe ulaşan malzemenin en çabuk şekilde sistem dışına aktarılmasını sağlamaktadır. Bu üretim yöntemi sınıflandırıcının ayırım performansını iyileştirilmesine ve üretim miktarı artırılmasıyla enerjiden enerji tasarruf edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu tesisteki çimento değirmenine ait bilya boyu dağılımı Çizelge 4.19'da verilmektedir.

Çizelge 4.19. Tesis C çimento değirmeni bilya boyu dağılımı

Bilya Çapı	1. Kamara		2. Kamara	
	ton	%	ton	%
90 mm	36.1	38.00	-	-
80 mm	25.65	27.00	-	-
70 mm	16.15	17.00	-	-
60 mm	12.35	13.00	-	-
50 mm	4.75	5.00	-	-
40 mm	-	-	8.78	4.00
30 mm	-	-	21.94	10.00
25 mm	-	-	43.88	20.00
20 mm	-	-	112.94	51.47
17 mm	-	-	31.88	14.53

Bu çalışma kapsamında Tesis A, B ve C'nin operasyonel parametrelerinin yanı sıra, çimento değirmenlerinde ölçülen bilya tüketim değerleri de araştırılmıştır. Tesis çalışanları ile yapılan görüşmeler sonucunda üç aylık dönemde gerçekleşen çimento üretimi ve bilya yüklemesi verileri temel alınarak belirlenen ortalama bilya tüketim değerleri Çizelge 4.20'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.20. Ortalama bilya tüketim değerleri

Tesis	Bilya Tüketimi (gr/ton)
A	23
B	50
C	13

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu başlık altında tez çalışması kapsamında yürütülen deneylerden elde edilen bulgular sunulmakta ve tartışılmaktadır. Özetle, Materyal ve Yöntem başlığı altında verilen deney yöntemleri uygulanarak ölçülen aşınma miktarları, öğütücü ortam ve öğütülen malzemeye ait özellikler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Bu bölümde ayrıca test yönteminin tekrarlanabilirliği istatistiksel yöntemle değerlendirilmiş, malzeme doluluğu ile aşınma miktarları arasındaki korelasyon incelenmiştir. Laboratuvar ortamında yürütülen çalışmalardan alınan sonuçlar öğütücü ortamın mikro yapı özellikleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiş ve bu sonuçlar endüstriyel ölçekli aşınma miktarları ile karşılaştırılmıştır.

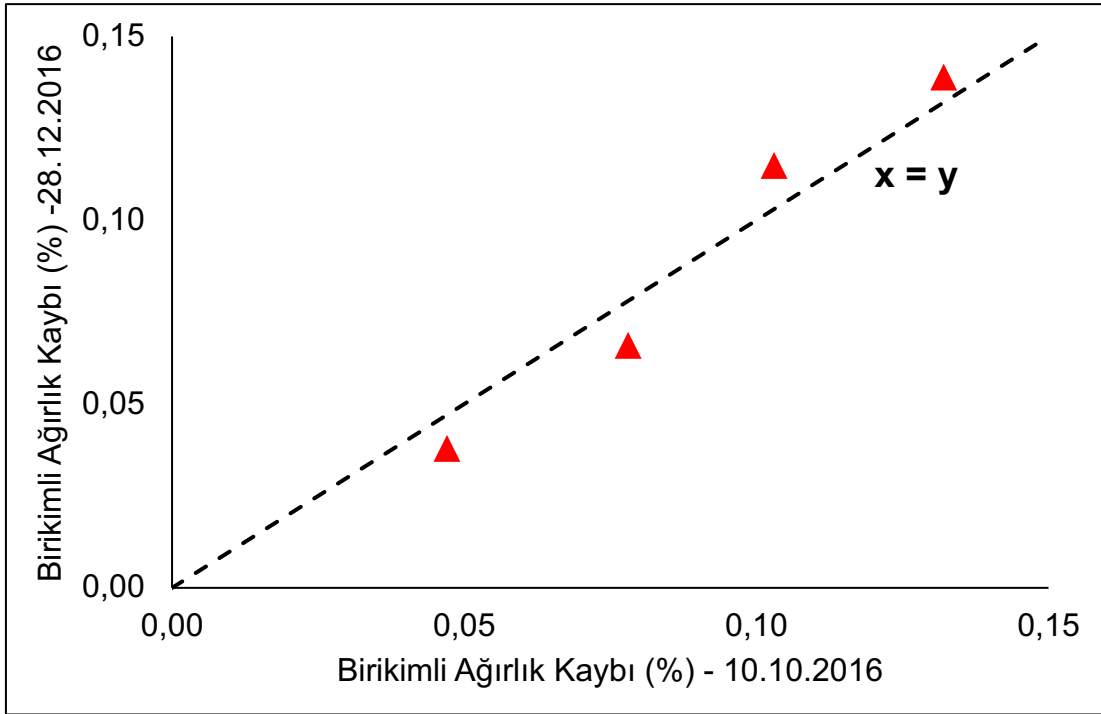
5.1. Deney Yönteminin Tekrarlanabilirliği

Tekrarlanabilirlik, aynı koşullar altında, aynı test elemanlarının farklı zamanlarda aynı yöntemler kullanılarak değerlendirilmesi sonucu elde edilen bağımsız test sonuçlarının tutarlılığı olarak tanımlanmaktadır [65].

Deney yönteminin tekrarlanabilirliğini araştırmak amacıyla yapılan deneylerde A1 tipi öğütücü medya kullanılarak, Bond değirmeninde %10 bilya doluluğu ve %10 malzeme doluluğu koşullarında granüle yüksek fırın cürufu öğütülmüştür. Her biri 150 dakika süren dört öğütme periyodundan oluşan deneysel çalışmalar iki farklı tarihte özdeş koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Öğütme periyotlarının ardından bilya şarjı ağırlığının hassas ölçümlerle belirlenmesi sonucunda elde edilen aşınma miktarları Çizelge 5.1’de listelenmekte, her iki deney serisi için hesaplanan birikimli aşınma miktarları ise Şekil 5.1’de karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 5.1. Tekrarlanabilirlik deney sonuçları

Öğütme Süresi	(dakika)	150	150	150	150
	(birikimli dakika)	150	300	450	600
Ağırlık Kaybı	(%)	0.047	0.031	0.025	0.029
(10.10.2016)	(birikimli %)	0.047	0.078	0.103	0.132
Ağırlık Kaybı	(%)	0.038	0.028	0.049	0.024
(28.11.2016)	(birikimli %)	0.038	0.066	0.115	0.139



Şekil 5.1. Farklı tarihlerde ölçülen birikimli ağırlık kaybı değerlerinin karşılaştırılması

Sonuçlar incelendiğinde özdeş koşullarda gerçekleştirilen iki deney serisinden alınan aşınma ölçümlerinin arasında kuvvetli bir korelasyon olduğu anlaşılmaktadır. Bu ilişkinin rastlantısal bir şekilde oluşup oluşmadığını araştırmak amacıyla elde edilen veriler istatistiksel yöntemle incelenmiştir.

Kullanılan istatistiksel yöntemde her iki test grubunda bilya şarjını oluşturan 90 adet bilyanın başlangıç ağırlıkları ile 600 dakikalık öğütme işlemi sonucunda ölçülen ağırlıkları temel alınmıştır. İki deney grubunda ölçülen başlangıç ve nihai ağırlıklar arasındaki farklar z-testi ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan test parametreleri Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. z-testi parametreleri

	10.10.2016	28.12.2016
Ölçüm sayısı (n_1, n_2)	90	90
Ortalama aşınma (\bar{x}_1, \bar{x}_2)	0.144	0.150
Standart sapma (σ_1, σ_2)	2.328	2.350

Bu veriler incelendiğinde iki farklı tarihte tekrar edilen testlerden alınan ortalama aşınma değerinin farklı olduğu görülmektedir. Aradaki bu farkın belirli bir önem düzeyinde anlamlı olup olmadığını test etmek amacıyla, test istatistiği değeri

hesaplanarak aşınma ölçümleri arasındaki farkın sıfır olduğunu varsayımlayan yokluk hipotezi ($H_0; \mu_1 - \mu_2 = 0$) test edilmiştir (Eşitlik 2).

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)_0}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

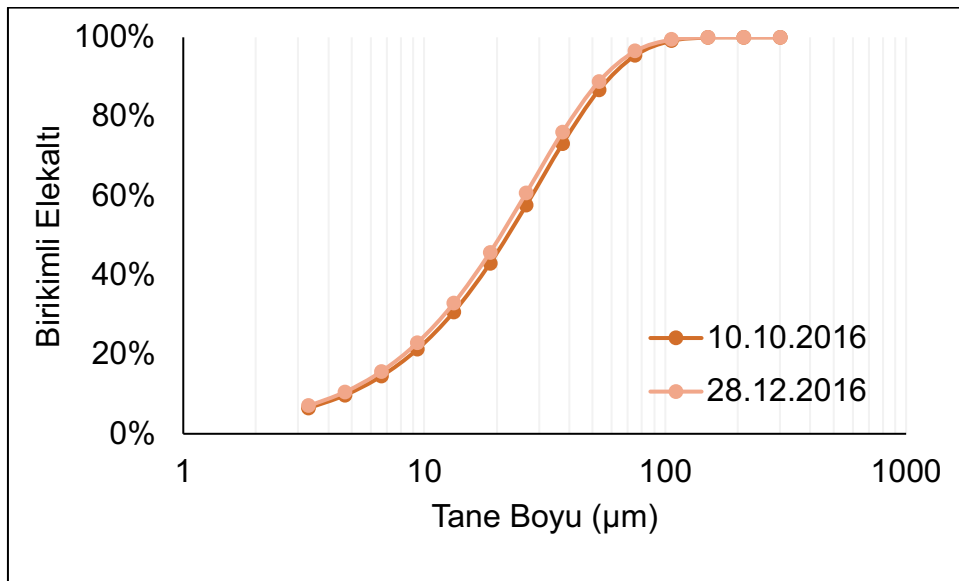
Eşitlik 2 aracılığıyla elde edilen test istatistiği değeri (z) ile önem düzeyi (α) ve kritik z değeri Çizelge 5.3'te listelenmektedir.

Çizelge 5.3. z-testi sonuçları

z	α	$Z_{\alpha/2}$
0.017	0.05	1.96

Hesaplanan z mutlak değeri, kritik z değerinden daha küçük olduğundan yokluk hipotezi kabul edilmiştir. Farklı tarihlerde ölçülen aşınma değerlerinin anlamlı bir farklılık göstermediği, deney yönteminin tekrarlanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Aşınma miktarlarındaki tekrarlanabilirlik incelemelerine ek olarak 150 dakikalık öğütme periyotlarının ardından değirmen içerisinden alınan malzemelerin tane boyu dağılımları da karşılaştırılmıştır. Özdeş koşullarda yürütülen deney dizilerinin ardından elde edilen tane boyu dağılımları da benzerlik göstermektedir (Şekil 5.2). Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda deney yönteminin tekrarlanabilir sonuçlar üretmede başarılı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.2. Tekrarlanabilirlik testinde ölçülen tane boyu dağılımları

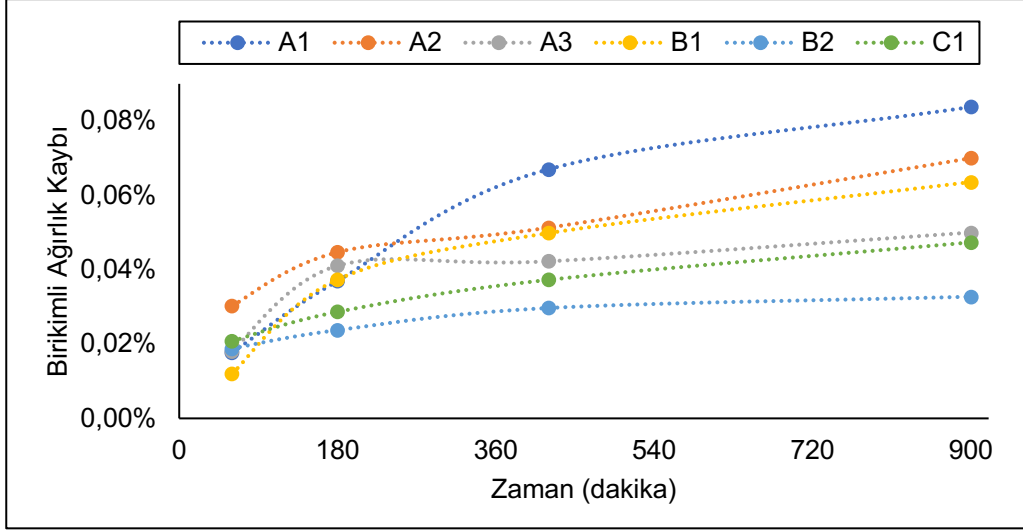
5.2. Tamburlama Test Sonuçları

Öğütücü ortamın teknik özellikleri ile aşınma miktarları arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla tamburlama testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda farklı kimyasal kompozisyonlara sahip, yaklaşık 10 kg ağırlığa sahip bilya şarjları test edilmiştir. Bu test yönteminin farklı geometrik özelliklere sahip değirmenlerde uygulanmasıyla değirmen boyutu ile aşınma miktarları arasındaki ilişkinin ortaya konması hedeflenmiştir. Bond değirmeninde (Değirmen 1) yapılan testler sonucunda ölçülen aşınma miktarları Çizelge 5.4'te sunulmaktadır.

Çizelge 5.4. Bond değirmeninde ölçülen aşınma miktarları

	Zaman (dakika)	0	60	120	240	480
A1	Ağırlık (gr)	9645.079	9643.370	9641.513	9638.615	9637.002
	Aşınma (gr)		1.709	1.857	2.898	1.613
	Aşınma (%)		0.018	0.019	0.030	0.017
A2	Ağırlık (gr)	9947.582	9944.570	9943.135	9942.478	9940.620
	Aşınma (gr)		3.012	1.435	0.657	1.858
	Aşınma (%)		0.030	0.014	0.007	0.019
A3	Ağırlık (gr)	9947.719	9945.915	9943.634	9943.520	9942.746
	Aşınma (gr)		1.804	2.281	0.114	0.774
	Aşınma (%)		0.018	0.023	0.001	0.008
B1	Ağırlık (gr)	9991.183	9989.984	9987.450	9986.203	9984.831
	Aşınma (gr)		1.199	2.534	1.247	1.372
	Aşınma (%)		0.012	0.025	0.012	0.014
B2	Ağırlık (gr)	10009.492	10007.611	10007.115	10006.520	10006.215
	Aşınma (gr)		1.881	0.496	0.595	0.305
	Aşınma (%)		0.019	0.005	0.006	0.003
C1	Ağırlık (gr)	10002.004	9999.926	9999.138	9998.276	9997.268
	Aşınma (gr)		2.078	0.788	0.862	1.008
	Aşınma (%)		0.021	0.008	0.009	0.010

Her bir tamburlama periyodunun öncesi ve sonrasında 1 mg hassasiyet ile ölçülen bilya şarjı ağırlıkları arasındaki fark, o periyotta ölçülen aşınma miktarını (gr) ifade etmektedir. Tamburlama işlemi sırasında gerçekleşen ağırlık kaybının, bilya şarjının başlangıç ağırlığına oranlanması ile aşınma yüzdesi belirlenmektedir. Örneğin A1 tipi bilya şarjının 240 dakikalık tamburlama periyodunun ardından ölçülen ağırlığı (9638.62 gr) ile aynı periyodun başlangıcında ölçülen bilya şarjı ağırlığı (9641.51 gr) arasındaki farkın (2.90), başlangıçtaki bilya şarjı ağırlığına oranlanmasıyla (2.90/9641.51) bu periyotta ölçülen aşınma değeri %0.030 olarak belirlenmiştir. Farklı bilya şarjlarının aşınma davranışlarını incelemek amacıyla test süreleri ve yüzde cinsinden hesaplanan aşınma oranları birikimli bir şekilde ifade edilmiştir. Toplamda 900 dakikalık tamburlama işlemi sonucunda elde edilen aşınma değerleri Şekil 5.3'te karşılaştırılmaktadır.

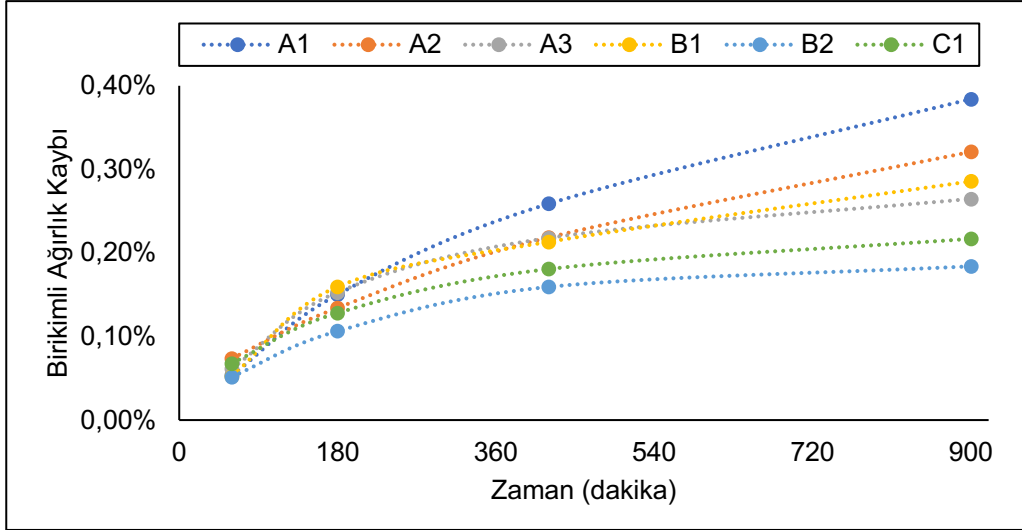


Şekil 5.3. Değirmen-1 için ölçülen aşınma değerleri

Şekil 5.3 incelendiğinde tüm bilya şarjı tiplerinde ölçülen birikimli ağırlık kaybı değerlerinin 30 ve 60 dakikalık tamburlama işlemlerinde görece hızlı bir artış gösterdiği, 240 ve 480 dakikalık işlem sürelerinde ise gözlemlenen aşınma miktarlarının 30 ve 60 dakikalık tamburlama periyotlarına göre azalma gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak aşınma davranışı değerlendirilirken aşınma nedeniyle bilya yüzeylerinden ayrılan tanelerin (ya da döküntülerin) davranışı da göz önüne alınmalıdır.

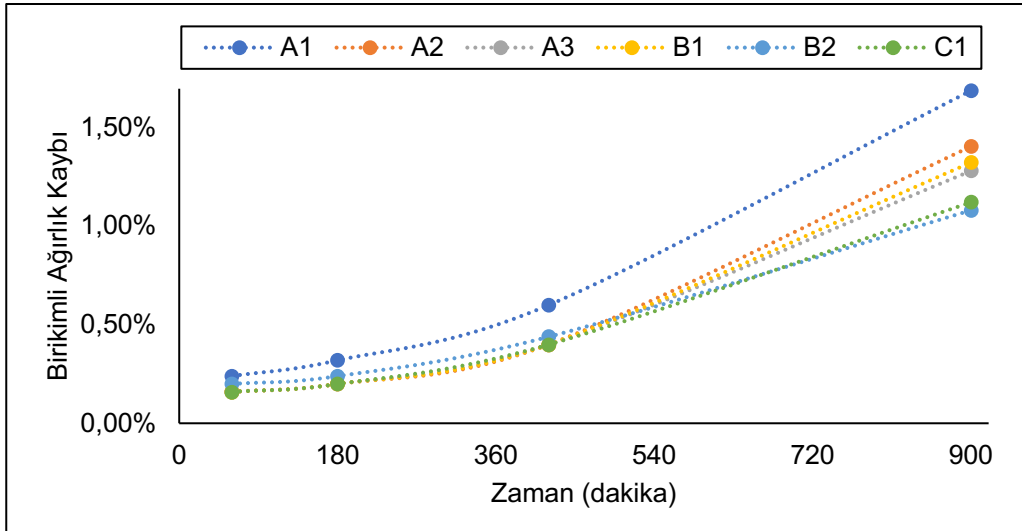
Tekrarlı deformasyon sonucunda öğütücü bilya yüzeyinden ayrılan döküntüler adezyon kuvvetinin etkisiyle etkileşim halinde olan yüzeylere yeniden tutunabilmektedir. Aşınma döküntülerinin öğütücü ortam ile sürekli etkileşim halinde olması yüzey pürüzlülüğü, sürtünme katsayısı ve ölçülen aşınma miktarlarında değişimlere neden olmaktadır. Deneysel çalışmalar birbiri üzerinde kayan yüzeyler arasında bir döküntü katmanının oluştuğunu işaret etmektedir [66]. Artan tamburlama sürelerinin bir sonucu olarak aşınma döküntüsü ile bilya şarjındaki etkileşimin de yoğunlaştığı düşünülmektedir. Döküntülerin bilya yüzeyleri arasında transfer edilmesi nedeniyle bilya şarjının toplam ağırlığındaki değişimler üzerinden belirlenen aşınma miktarlarının azalmasına neden olmaktadır. Bu durum laboratuvar ölçekli aşınma deneylerden alınan sonuçların bilya şarjına ait mutlak aşınma değerlerinin gözlemlenmesini zorlaştırmaktadır.

Bond değirmeninde yapılan testlerin ardından aynı öğütücü bilya tipleri Los Angeles değirmeninde (Değirmen-2) tamburlanarak aşınma davranışları gözlemlenmiştir. Test sonuçları Şekil 5.4'te verilmektedir.



Şekil 5.4. Değirmen-2 için ölçülen aşınma değerleri

Los Angeles değirmeninde (Değirmen-2) yapılan testler sonucunda tüm öğütücü bilya tiplerinin aşınma miktarlarında, Bond değirmeninden alınan sonuçlara göre belirgin bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu test grubunda tamburlama işlemi yüzde 1 bilya doluluğunda yapılmıştır. Bu koşulda bilyalar değirmen içerisinde sürüklenmesi ve ayrıca değirmen içerisindeki kaldırıcı rafın bilya şarjına periyodik olarak yükseklik kazandırması sonucu oluşan sürtünme ve darbe etkilerinin aşınma miktarlarında artışa neden olduğu düşünülmektedir. Tamburlama testlerinin son aşamasında öğütücü bilya tipleri Çemaş değirmeninde (Değirmen 3) yapılan testlerle incelenmiştir. Test sonuçları Şekil 5.5'te verilmektedir.



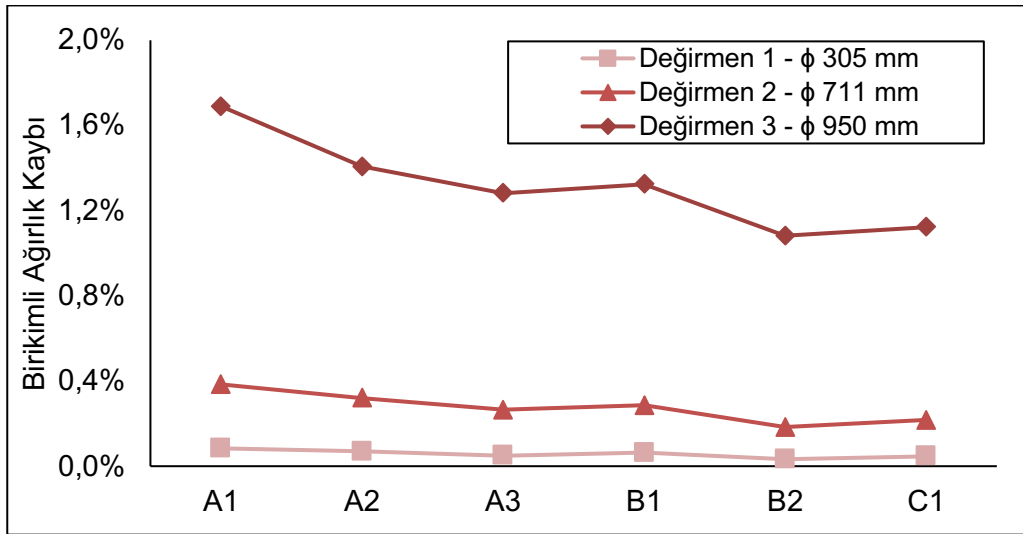
Şekil 5.5. Değirmen-3 için ölçülen aşınma değerleri

İşlem sürelerindeki artışla birlikte Bond değirmeninde ölçülen aşınma miktarlarındaki azalmaya karşın Los Angeles ve Çemaş değirmenlerinde aşınma miktarları artış göstermektedir. Çemaş değirmeninde (Değirmen 3) yapılan testlerde ölçülen birikimli aşınma miktarları Los Angeles değirmeninde yürütülen testlere göre daha belirgin bir artış eğilimi göstermektedir. Çemaş değirmeninin daha büyük bir çapa sahip olması bilyaların daha yüksek potansiyel enerji seviyelerine ulaşmasını ve dolayısıyla bilya şarjına etki eden darbe kuvvetlerinin artmasını sağlamaktadır. Bu durumun sonucunda A3 ve B1 tipi bilya şarjlarıyla yapılan deneylerde bilya şarjının %2'sinde kırılmalar gözlemlenmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Tamburlama testleri sırasında kırılan öğütücü bilya

Bu test grubunda toplamda 900 dakikaya ulaşan tamburlama işlemleri sonucunda her üç değirmende ölçülen toplam aşınma miktarları Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Tamburlama testlerinden elde edilen sonuçlar aşınma miktarları ile kullanılan değirmenlerin çapları arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Değirmen çapındaki artışa bağlı olarak aşınma miktarlarında artış gözlemlenmiştir.



Şekil 5.7. Tamburlama test sonuçlarının karşılaştırılması

Tamburlama testlerinden elde edilen bir diğer sonuç ise, değirmen çapından bağımsız olarak, yüksek aşınandan düşük aşınana doğru bilyaların aynı şekilde sıralanmış olmalarıdır. Değirmen çapındaki değişim aşınma miktarlarının değişmesine neden olmakta ancak tüm tamburlama testlerinde öğütücü bilya tipleri aşınma miktarlarına göre $A1 > A2 > B1 > A3 > C1 > B2$ düzeninde sıralanmaktadır. Bu sonuç bilyaların yapı özelliklerinin aşınma üzerindeki etkisini farklı operasyonel koşullarda dahi koruduğunu ve laboratuvar ortamında yapılan testler ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmenin mümkün olduğunu işaret etmektedir.

5.3. Öğütme Test Sonuçları

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen öğütme testleri ile öğütücü bilya ve öğütülen malzeme özelliklerinin aşınma sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu test grubunda yapılan çalışmalar kapsamında Bond değirmeninde gerçekleştirilen kesikli öğütme işlemlerinin öncesi ve sonrasında bilya şarjının toplam ağırlığı ölçülmüş, değirmene beslenen malzeme miktarı ile besleme ve ürün malzemelerinin tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Bilya şarjı ağırlığındaki değişimlerin gözlemlenmesiyle aşınma miktarlarına ulaşılmış ve tane boyu dağılımları esas alınarak öğütmede harcanan enerji miktarları hesaplanmıştır.

5.3.1. Öğütücü Ortam Özelliklerinin Etkisi

Bu çalışma grubunda, altı farklı öğütücü bilya grubu kullanılarak granüle yüksek fırın cürufu öğütülmüş ve bilya şarjındaki aşınmalar gözlemlenmiştir. Her bir öğütme periyodunun öncesinde değirmene eklenen malzeme miktarı 700 ml'dir. Testler sonucunda farklı öğütücü bilya tipleri için ölçülen aşınma değerleri Çizelge 5.5 - 5.10'da sunulmaktadır.

Çizelge 5.5. A1 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu

Zaman	(dakika)	30	60	120	240
Bilya Şarjı Ağırlığı	(gr)	9838.369	9837.389	9836.137	9834.709
F ₈₀	(µm)	975	975	975	975
P ₈₀	(µm)	77	68	56	27
Enerji tüketimi	(kWsa/t)	16	18	20	32
Aşınma	(gr)	1.459	0.980	1.252	1.428
	(%)	0.015	0.010	0.013	0.015

Çizelge 5.6. A2 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu

Zaman (dakika)		30	60	120	240
Bilya Şarjı Ağırlığı (gr)		9939.369	9937.861	9937.013	9936.580
F ₈₀ (µm)		975	975	975	975
P ₈₀ (µm)		81	56	37	26
Enerji tüketimi (kWsa/t)		16	20	26	33
Aşınma	(gr)	1.251	1.508	0.848	0.434
	(%)	0.013	0.015	0.009	0.004

Çizelge 5.7. A3 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu

Zaman (dakika)		30	60	120	240
Bilya Şarjı Ağırlığı (gr)		9942.855	9941.922	9940.819	9939.819
F ₈₀ (µm)		975	975	975	975
P ₈₀ (µm)		80	63	42	25
Enerji tüketimi (kWsa/t)		16	19	25	34
Aşınma	(gr)	0.550	0.933	1.102	1.000
	(%)	0.006	0.009	0.011	0.010

Çizelge 5.8. B1 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu

Zaman (dakika)		30	60	120	240
Bilya Şarjı Ağırlığı (gr)		9984.069	9983.355	9982.017	9981.009
F ₈₀ (µm)		975	975	975	975
P ₈₀ (µm)		78	64	52	24
Enerji tüketimi (kWsa/t)		16	19	21	34
Aşınma	(gr)	0.745	0.714	1.338	1.008
	(%)	0.007	0.007	0.013	0.010

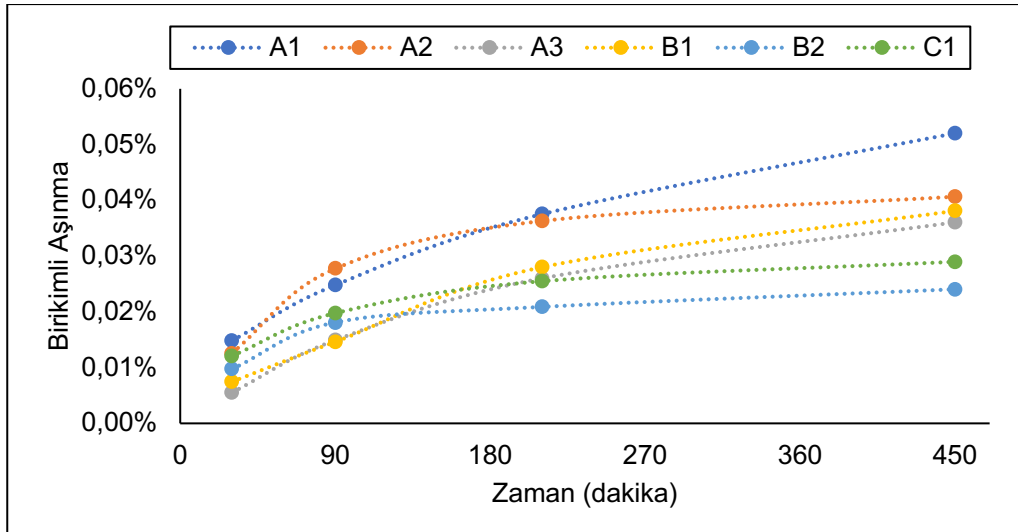
Çizelge 5.9. B2 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu

Zaman (dakika)		30	60	120	240
Bilya Şarjı Ağırlığı (gr)		10005.278	10004.441	10004.162	10003.845
F ₈₀ (µm)		975	975	975	975
P ₈₀ (µm)		79	71	22	20
Enerji tüketimi (kWsa/t)		16	17	36	38
Aşınma	(gr)	0.974	0.836	0.279	0.317
	(%)	0.010	0.008	0.003	0.003

Çizelge 5.10. C1 tipi bilya şarjı için hesaplama tablosu

Zaman (dakika)		30	60	120	240
Bilya Şarjı Ağırlığı (gr)		9996.015	9995.249	9994.677	9994.328
F ₈₀ (µm)		975	975	975	975
P ₈₀ (µm)		86	76	21	15
Enerji tüketimi (kWsa/t)		15	17	37	45
Aşınma (gr)		1.210	0.766	0.573	0.349
	(%)	0.012	0.008	0.006	0.003

Aynı besleme malzemesine kesikli öğütme işlemlerinin uygulandığı testler sonucunda elde edilen veriler, öğütme süreleri ile aşınma miktarları arasındaki ilişkinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Daha uzun öğütme sürelerinin ardından daha ince boyutlu bir ürün elde edildiğinden, Bond eşitliği aracılığıyla hesaplanan enerji tüketimi değerleri de artmaktadır. Ancak öğütme sürelerindeki artışa karşın birikimli aşınma miktarları aynı oranda artış göstermemektedir. Bu yönüyle öğütme testleri ve tamburlama testlerinden elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir. Kesikli öğütme işlemlerinde öğütme süresinin uzatılmasına bağlı olarak incelen malzemenin aşındırıcı özelliğini kaybettiği literatürde belirtilmektedir [67]. Bu nedenle öğütme süresi artarken, öğütücü ortam tiplerinde birikimli aşınma oranlarının artış hızı değişkenlik göstermektedir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Bilya şarjı aşınma miktarlarının karşılaştırılması

Şekil 5.8’de öğütme süresi ile aşınma miktarları arasındaki ilişki gösterilmektedir. A2, A3, C1 ve B2 tipi öğütücü bilyalarda aşınma 120 dakikalık öğütme süresinin sonrasında çok düşük bir hızla artmaktadır. Diğer taraftan A1 ve B1 tipi bilyalarda aşınma, 300 dakikalık öğütme süresinin sonrasında dahi görece daha hızlı artış sergilemektedir. Öğütücü bilya tipleri aşınma miktarlarına göre çoktan aza A1>A2>B1>A3>C1>B2 düzeninde sıralanmaktadır. Bu sıralamanın daha önce tamburlama testlerinden elde edilen sıralama ile benzer olduğu anlaşılmaktadır. Öğütme testlerinde tamburlama testlerine göre aşınma miktarları azalmış ancak bilyalar aşınma miktarlarına göre aynı düzende sıralanmışlardır.

5.3.2. Malzeme Özelliklerinin Etkisi

Malzeme özelliklerinin aşınma miktarları üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla farklı iş indeksi değerlerine sahip klinker ve granüle yüksek fırın cürufu malzemeleri aynı tip öğütücü bilya şarjı (A1) kullanılarak öğütülmüştür. Bond değirmeninde (Değirmen 1) gerçekleştirilen bu testlerde yaklaşık 20 kg ağırlığında bilya şarjı kullanılmış ve malzeme doluluğu oranı %40 olarak belirlenmiştir. Test sonucunda elde edilen veriler Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12’de gösterilmektedir.

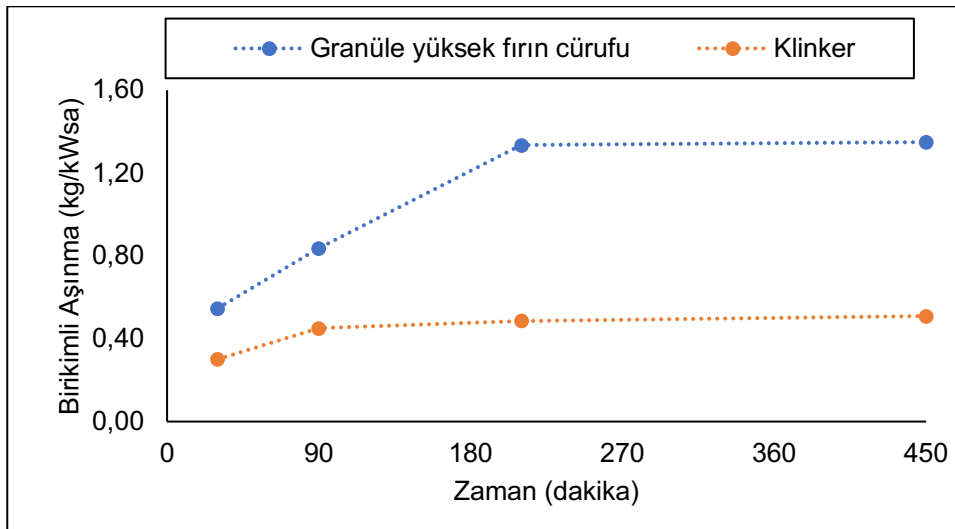
Çizelge 5.11. Granüle yüksek fırın cürufu için hesaplama tablosu

Öğütme Süresi	(dakika)	0	30	60	120	240
Bilya Şarjı Ağırlığı	(gr)	19936.77	19927.35	19922.17	19911.58	19911.08
Malzeme Miktarı	(gr)	-	1000	1000	1000	1000
F ₈₀	(µm)	-	975	975	975	975
P ₈₀	(µm)	-	72	68	52	27
Enerji Tüketimi	(kWsa/t)	-	17	18	21	32
	(gr)	-	9.42	5.18	10.59	0.50
Aşınma	(%)	-	0.047	0.026	0.053	0.003
	(kg/t)	-	9.420	5.180	10.590	0.500
	(kg/kWsa)	-	0.547	0.291	0.497	0.015

Çizelge 5.12. Klinker için hesaplama tablosu

Öğütme Süresi (dakika)	0	30	60	120	240
Bilya Şarjı Ağırlığı (gr)	19902.66	19894.00	19888.88	19887.53	19886.57
Malzeme Miktarı (gr)	-	1623	1623	1623	1623
F ₈₀ (µm)	-	1803	1803	1803	1803
P ₈₀ (µm)	-	44	33	28	24
Enerji Tüketimi (kWsa/t)	-	18	21	23	25
(gr)	-	8.66	5.12	1.35	0.96
Aşınma (%)	-	0.044	0.026	0.007	0.005
(kg/t)	-	5.401	3.138	0.837	0.584
(kg/kWsa)	-	0.304	0.149	0.036	0.023

Uygulanan kesikli öğütme testlerinin sonucunda toplamda 450 dakikalık işlem süresine ulaşılmıştır. Bu testlerde ölçülen aşınma değerleri, öğütmede harcanan enerji ve öğütülen malzeme miktarı parametreleri de göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Öncelikle, birim ağırlıklı malzemenin öğütülmesi sırasında meydana gelen aşınma miktarı (kg/t) hesaplanmıştır. Aynı öğütme işlemi sırasında harcanan enerji miktarının (kWsa/t) besleme ve ürünün tane boyu dağılımına ait d₈₀ değerleri kullanılarak hesaplanmasının ardından bu iki değer oranlanmasıyla birim enerji tüketimi ile aşınma miktarı ilişkilendirilmiştir (kg/kWsa). Hesaplanan birikimli aşınma miktarları Şekil 5.9'da karşılaştırılmaktadır.



Şekil 5.9. Malzeme özelliklerinin aşınma miktarları üzerindeki etkisi

Granüle yüksek fırın cürufu ve klinker malzemelerinin birikimli aşınma eğrileri incelendiğinde, iş indeksi daha fazla olan yüksek fırın cürufuna ait birikimli aşınma değerlerinin öğütme sürelerindeki artışa paralel olarak hızlı bir artış gösterdiği ve 240 dakikalık öğütme periyodu boyunca aşınma hızının belirgin bir şekilde azaldığı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan klinkerin ufalanma direncinin daha düşük olması nedeniyle bu malzemenin bilya şarjında daha az aşınmaya neden olduğu düşünülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar malzemenin öğütülebilirlik derecesinin bilya şarjında meydana gelen aşınma üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca uygulanan deney yönteminin, öğütülen malzemeye ait özelliklerin aşınma miktarları üzerindeki etkisini ölçebilecek hassasiyete sahip olduğu tespit edilmiştir.

5.3.3. Malzeme Doluluğunun Etkisi

Çalışmanın bu bölümünde malzeme doluluk oranı ile aşınma değerleri arasındaki ilişkinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda aynı tip bilya şarjı (A1) kullanılarak, her bir bilya doluluğu koşulunda 150 dakikalık dört periyot halinde olmak üzere, sırasıyla %10, %20, %40, %60, %80, %100 malzeme doluluğu oranlarında öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her öğütme periyodunun başlangıcında değirmene granüle yüksek fırın cürufu beslemesi yapılmış ve öğütme işleminin ardından ürünün tane boyu dağılımı belirlenmiştir. Değişen malzeme doluluğu oranlarında yapılan deneylerden elde edilen veriler değirmen içerisindeki malzeme miktarı ile aşınma değerleri arasındaki ilişkinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Malzeme doluluğu testlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.13 - 5.18'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.13. %10 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler

Öğütme Süresi	(dakika)	0	150	150	150	150
Bilya Şarjı Ağırlığı	(gr)	9839.85	9835.22	9832.20	9829.76	9826.86
Malzeme Miktarı	(gr)	-	125	125	125	125
F ₈₀	(µm)	-	1727	1727	1727	1727
P ₈₀	(µm)	-	18	25	14	21
Enerji Tüketimi	(kWsa/t)	-	42	35	49	38
	(gr)	-	4.630	3.020	2.446	2.892
	(%)	-	0.047	0.031	0.025	0.029
Aşınma	(kg/t)	-	37.040	24.160	19.568	23.136
	(kg/kWsa)	-	0.885	0.689	0.400	0.601

Çizelge 5.14. %20 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler

Öğütme Süresi	(dakika)	0	150	150	150	150
Bilya Şarjı Ağırlığı	(gr)	9826.86	9822.02	9818.87	9817.05	9815.33
Malzeme Miktarı	(gr)	-	250	250	250	250
F ₈₀	(µm)	-	1727	1727	1727	1727
P ₈₀	(µm)	-	19	20	23	24
Enerji Tüketimi	(kWsa/t)	-	41	40	37	36
	(gr)	-	4.846	3.145	1.823	1.718
	(%)	-	0.049	0.032	0.019	0.018
Aşınma	(kg/t)	-	19.384	12.580	7.292	6.872
	(kg/kWsa)	-	0.478	0.316	0.199	0.192

Çizelge 5.15. %40 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler

Öğütme Süresi	(dakika)	0	150	150	150	150
Bilya Şarjı Ağırlığı	(gr)	9815.33	9812.78	9808.57	9806.60	9804.67
Malzeme Miktarı	(gr)	-	500	500	500	500
F ₈₀	(µm)	-	1727	1727	1727	1727
P ₈₀	(µm)	-	24	21	26	30
Enerji Tüketimi	(kWsa/t)	-	36	39	34	32
	(gr)	-	2.547	4.214	1.996	1.935
	(%)	-	0.026	0.043	0.020	0.020
Aşınma	(kg/t)	-	5.094	8.428	3.932	3.870
	(kg/kWsa)	-	0.141	0.216	0.115	0.121

Çizelge 5.16. %60 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler

Öğütme Süresi	(dakika)	0	150	150	150	150
Bilya Şarjı Ağırlığı	(gr)	9804.67	9802.75	9800.98	9799.39	9797.97
Malzeme Miktarı	(gr)	-	750	750	750	750
F ₈₀	(µm)	-	1727	1727	1727	1727
P ₈₀	(µm)	-	27	22	29	38
Enerji Tüketimi	(kWsa/t)	-	34	38	33	28
	(gr)	-	1.92	1.77	1.59	1.42
	(%)	-	0.020	0.018	0.016	0.015
Aşınma	(kg/t)	-	2.557	2.360	2.123	1.899
	(kg/kWsa)	-	0.075	0.062	0.065	0.069

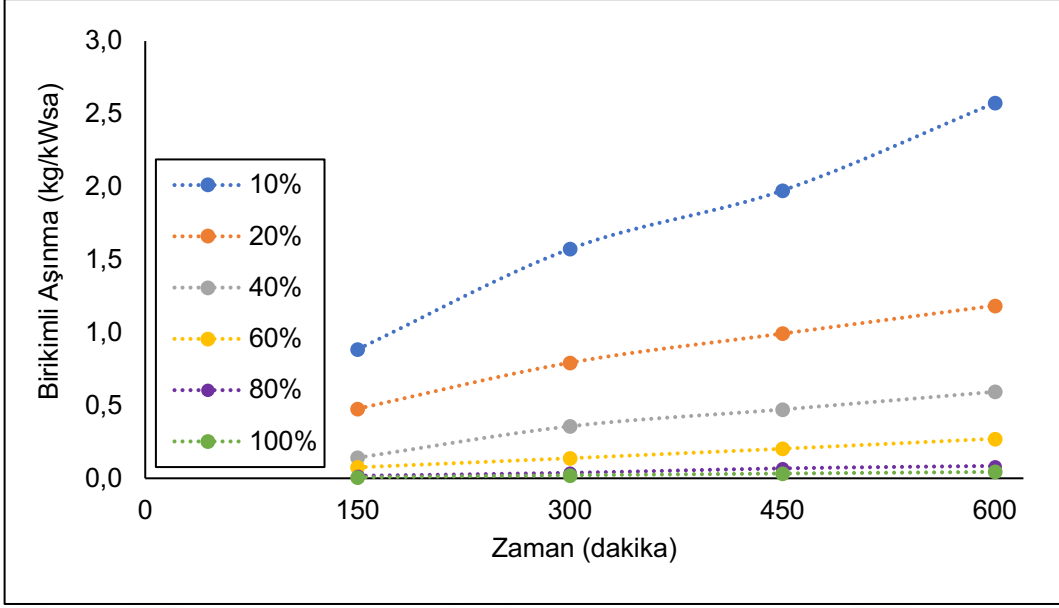
Çizelge 5.17. %80 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler

Öğütme Süresi	(dakika)	0	150	150	150	150
Bilya Şarjı Ağırlığı	(gr)	9797.97	9797.42	9796.65	9795.70	9795.25
Malzeme Miktarı	(gr)	-	1000	1000	1000	1000
F ₈₀	(µm)	-	1727	1727	1727	1727
P ₈₀	(µm)	-	29	22	31	39
Enerji Tüketimi	(kWsa/t)	-	32	37	31	27
	(gr)	-	0.55	0.76	0.95	0.46
	(%)	-	0.006	0.008	0.010	0.005
Aşınma	(kg/t)	-	0.548	0.764	0.950	0.457
	(kg/kWsa)	-	0.017	0.020	0.031	0.017

Çizelge 5.18. %100 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler

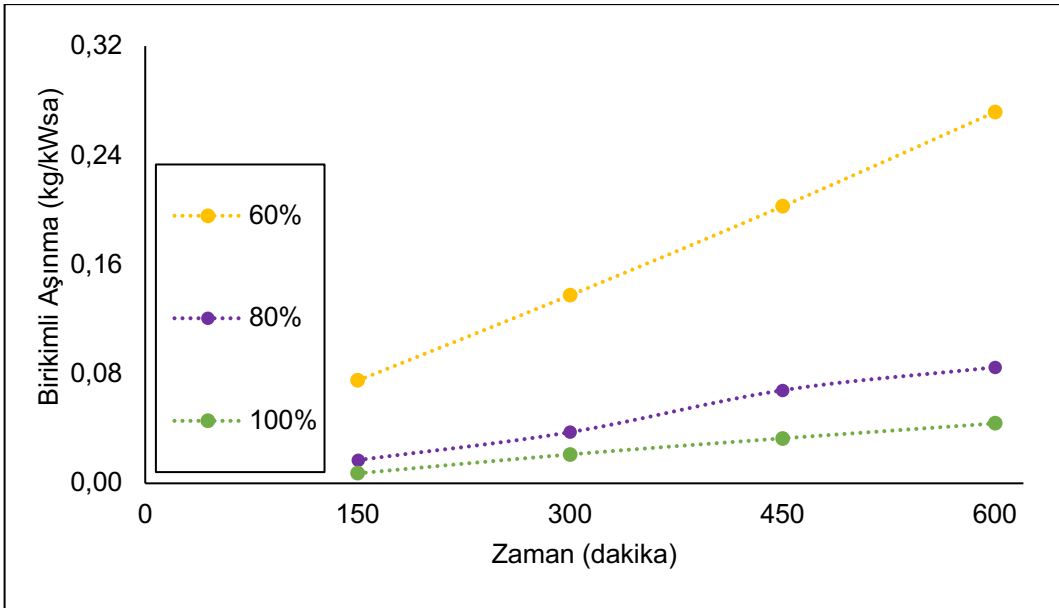
Öğütme Süresi	(dakika)	0	150	150	150	150
Bilya Şarjı Ağırlığı	(gr)	9765.25	9794.99	9794.53	9794.13	9793.74
Malzeme Miktarı	(gr)	-	1250	1250	1250	1250
F ₈₀	(µm)	-	1727	1727	1727	1727
P ₈₀	(µm)	-	38	41	39	36
Enerji Tüketimi	(kWsa/t)	-	28	27	27	29
	(gr)	-	0.25	0.46	0.40	0.39
	(%)	-	0.003	0.005	0.004	0.004
Aşınma	(kg/t)	-	0.202	0.367	0.322	0.313
	(kg/kWsa)	-	0.007	0.014	0.012	0.011

Her bir malzeme doluluğu koşulunda toplamda 600 dakikaya ulaşan öğütme işlemleri sonucunda aşınma miktarları ile malzeme doluluğu arasındaki ilişki incelenmiştir. Yapılan ölçümler değirmen içerisindeki malzeme miktarının artmasıyla aşınma miktarlarının kademeli bir şekilde azaldığını işaret etmektedir. Farklı malzeme doluluğu koşulları için hesaplanan birikimli aşınma miktarları Şekil 5.10'da karşılaştırılmaktadır.

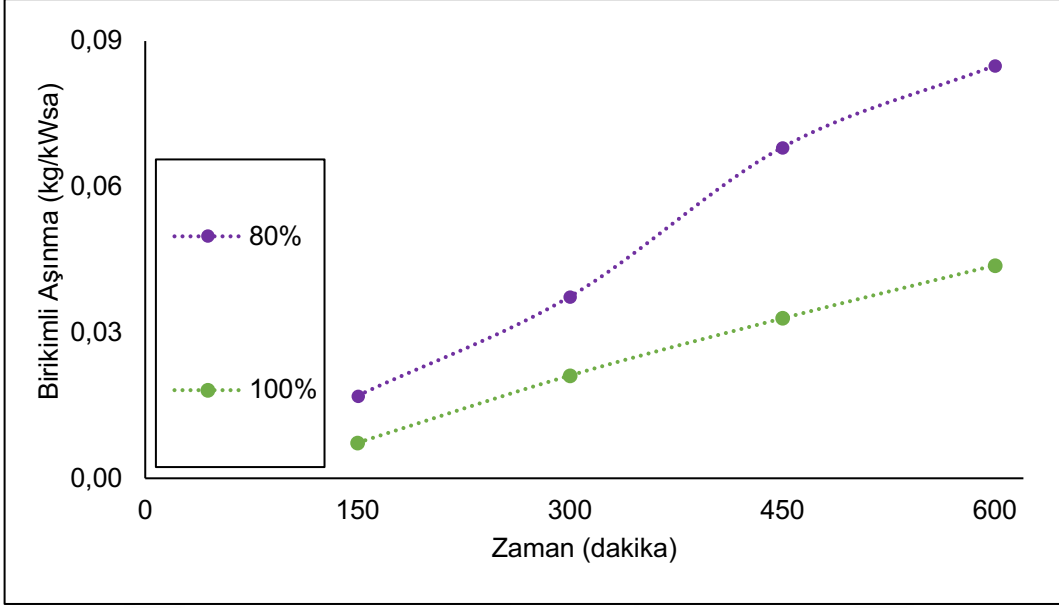


Şekil 5.10. Malzeme doluluğu ile birikimli aşınma miktarları arasındaki ilişki -1-

Malzeme doluluğu oranının artmasıyla değirmen içerisinde yığın halde bulunan bilya şarjının arasındaki boşluklar azalmakta, değirmen içerisindeki malzemenin yastıklama etkisi sonucu bilyalar arası etkileşimlerin sayısı ve şiddetinin azalmaktadır. Dolayısıyla öğütücü ortam tipi, bilya doluluğu ve öğütme süresi parametrelerinin sabit tutulduğu testlerin tamamında malzeme doluluğundaki artışa karşılık birikimli aşınma miktarları azalmaktadır. Şekil 5.10 yeniden ölçeklenerek Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 elde edilmiştir.

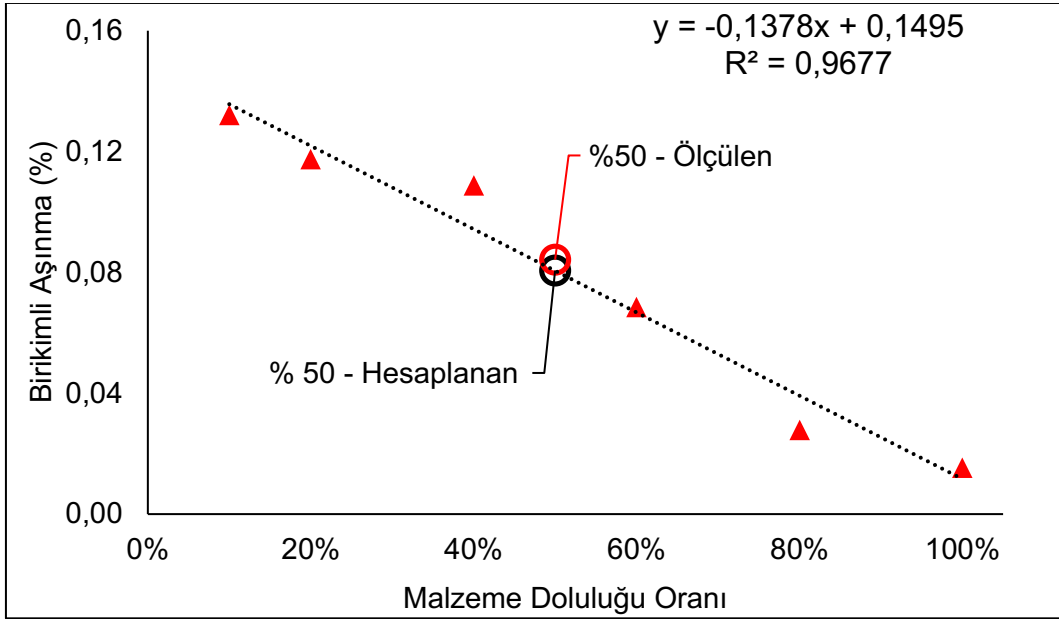


Şekil 5.11. Malzeme doluluğu ile birikimli aşınma miktarları arasındaki ilişki -2-



Şekil 5.12. Malzeme doluluğu ile birikimli aşınma miktarları arasındaki ilişki -3-

Malzeme doluluğu testlerinin son aşamasında malzeme doluluğu ile aşınma miktarları arasındaki ilişkinin matematiksel bir model yardımıyla ortaya konması hedeflenmiştir. Bu kapsamda her bir malzeme doluluğu koşulunda 600 dakikalık öğütme işleminin sonucunda ölçülen birikimli aşınma değeri esas alınarak malzeme doluluğu oranı ile aşınma miktarları arasında bir korelasyon oluşturulmuştur (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Malzeme doluluğu oranı ile aşınma miktarları arasındaki korelasyon

%10, %20, %40, %60, %80 ve %100 malzeme doluluğu koşullarında elde edilen sonuçlar esas alınarak oluşturulan regresyon eğrisinin denklemi Şekil 5.13'te gösterilmektedir. Bu denklem kullanılarak %50 malzeme doluluğu koşulu için 600 dakikalık öğütme işleminde meydana gelen birikimli aşınma miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca aynı malzeme doluluğu koşulunda 600 dakikalık öğütme işlemi uygulanarak birikimli aşınma değeri ölçülmüştür (Çizelge 5.19).

Çizelge 5.19. %50 malzeme doluluğunda yapılan öğütme işlemine ait veriler

Öğütme Süresi (birikimli dakika)		0	150	300	450	600
Bilya Şarjı Ağırlığı (gr)		9780.21	9777.99	9775.76	9773.77	9771.98
	(gr)	-	2.222	2.228	1.989	1.796
Aşınma (%)	(%)	-	0.023	0.023	0.020	0.018
	(birikimli %)	-	0.023	0.046	0.066	0.084

%50 malzeme doluluğu koşulu için ölçülen ve hesaplanan birikimli aşınma değerleri benzerlik göstermektedir. Farklı malzeme doluluğu koşullarında yapılan ölçümler temel alınarak elde edilen matematiksel ifadenin aşınma miktarlarını tahmin etmede başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca uygulanan test yönteminin malzeme doluluğu koşullarındaki değişimlere duyarlı olduğu anlaşılmaktadır.

5.4. Öğütücü Ortamın Mikro Yapı Özelliklerinin Aşınmaya Etkisi

Tez çalışması kapsamında yapılan laboratuvar testlerinden elde edilen sonuçlar öğütücü ortamın mikro yapı özelliklerinin aşınma sonuçları üzerinde etkili olduğunu işaret etmektedir. Özellikle bilya doluluğu, öğütme süresi ve bilya boyu parametrelerinin sabit tutulduğu tamburlama testlerinden alınan sonuçlar bu etkiyi vurgulamaktadır. Bu başlık altında öğütücü ortamın mikro yapısı ve kimyasal kompozisyon analizlerinden elde edilen veriler göz önünde bulundurularak aşınma ile öğütücü ortamın karakteristik özellikleri arasındaki ilişki tartışılmaktadır.

Literatürde mikro yapı içerisindeki karbürlerin tipi, boyutu ve miktarının öğütücü ortamın tokluk veya sertliği gibi mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu işaret edilmektedir [68]. Mikro yapı içerisinde martenzitik yapının hacimsel oranının artması malzemenin gevrekliğinin/kırılganlığının artmasına neden olmaktadır [69]. İkincil karbürler ise matrisin dayanıklılığını artırarak sürtünme mekanizması

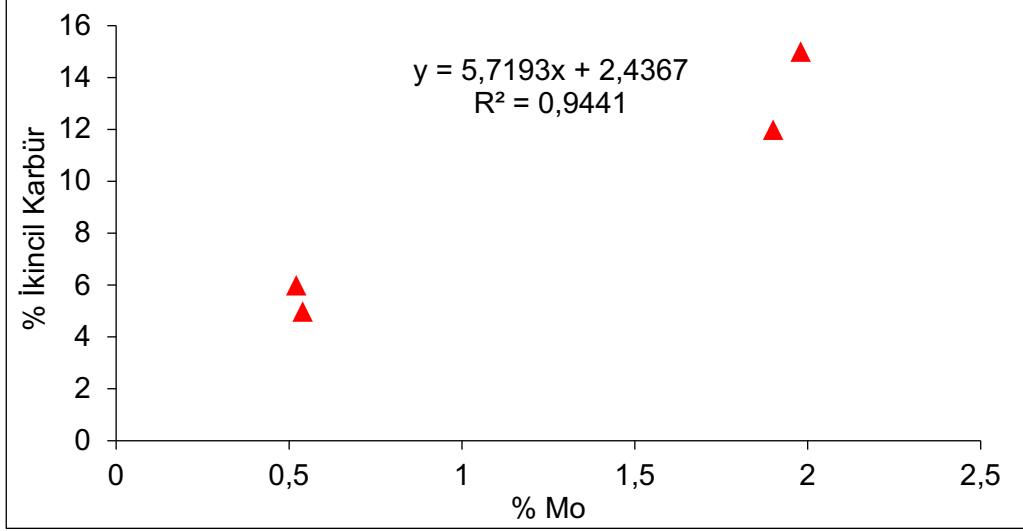
nedeniyle oluşan aşınmaya karşı direnç sağlamaktadır [70]. Aşınma direnci ve tokluğun sağlanabilmesi için en uygun mikro yapının ikincil karbürlerle sertleştirilmiş martenzitik matristen oluşması gerektiği belirtilmiştir [71]. Martenzitik yapı ve ikincil karbürlerin mikro yapı içerisindeki hacimsel oranları ile Bond değirmeninde gerçekleştirilen tamburlama testlerinde ölçülen aşınma değerleri Çizelge 5.20'de listelenmektedir.

Çizelge 5.20. Mikro yapı bileşenlerinin hacimsel oranları ve aşınma miktarları

Ortam tipi	Martenzitik Matris	İkincil Karbürler	Aşınma Miktarı
A1	%60	%6	%0.084
A3		%15	%0.050
A2	%50	%5	%0.070
C1		%10	%0.047
B1	%40	%6	%0.064
B2		%12	%0.033

Bu veriler incelendiğinde mikro yapısında aynı oranda martenzitik matris içeren öğütücü ortam gruplarında ikincil karbür miktarının artmasıyla aşınma direncinin de arttığı gözlemlenmektedir. Mikro yapının matris ve karbür bileşenleri ile aşınma miktarları arasındaki bu ilişkinin tüm ortam grupları için geçerli olduğu gözlemlenmiştir.

Öğütücü ortamın kimyasal kompozisyonunun mikro yapı özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yapılan çalışmalarda A2, A3, B1 ve B2 tipi öğütücü ortamların kimyasal kompozisyonları içerisinde alaşım elementi olarak bulunan molibden miktarı ile ikincil karbürlerin hacimsel oranları karşılaştırılmıştır (Şekil 5.14).



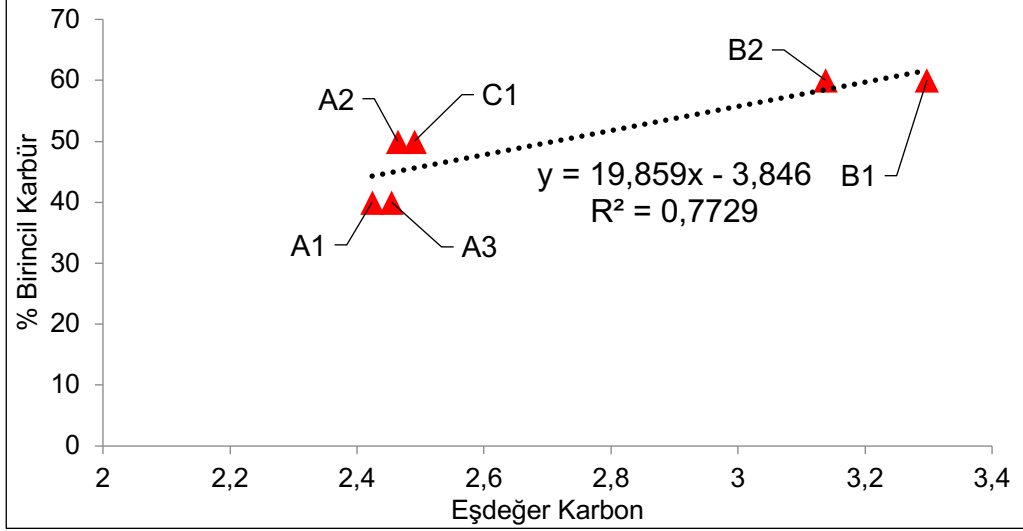
Şekil 5.14. Molibden miktarının ikincil karbür oluşumu üzerindeki etkisi

Öğütücü ortamın üretim aşamasında uygulanan ısı işlem ile sertleşebilir özellik gösterebilmesi için kimyasal kompozisyona molibden, nikel veya bakır gibi alaşım elementleri eklenmektedir [53]. Test edilen öğütücü ortam tiplerinde alaşım elementi olarak %0.5 ila %2 arasında değişen oranlarda molibden bulunmaktadır. Değerlendirmeler sonucunda kimyasal kompozisyondaki molibden içeriği ile mikro yapıdaki ikincil karbürlerin miktarı arasındaki kuvvetli bir korelasyon olduğu sonucuna varılmıştır.

Kimyasal kompozisyonun birincil karbürlerin oluşumu üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla eşdeğer karbon hesaplamaları yapılmıştır. Eşdeğer karbon miktarı (Eşitlik 3) dökme demirlerde karbür oluşuma etki eden karbon, silikon ve fosfor elementlerinin kimyasal kompozisyon içerisindeki oranları göz önüne alınarak hesaplanmaktadır [72].

$$Eşdeğer Karbon = \%C + \frac{\%P + \%Si}{3} \quad (3)$$

Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanan eşdeğer karbon miktarları ile öğütücü ortam gruplarının mikro yapıları içerisindeki birincil karbürlerin hacimsel oranlarındaki değişim Şekil 5.15'te gösterilmektedir.



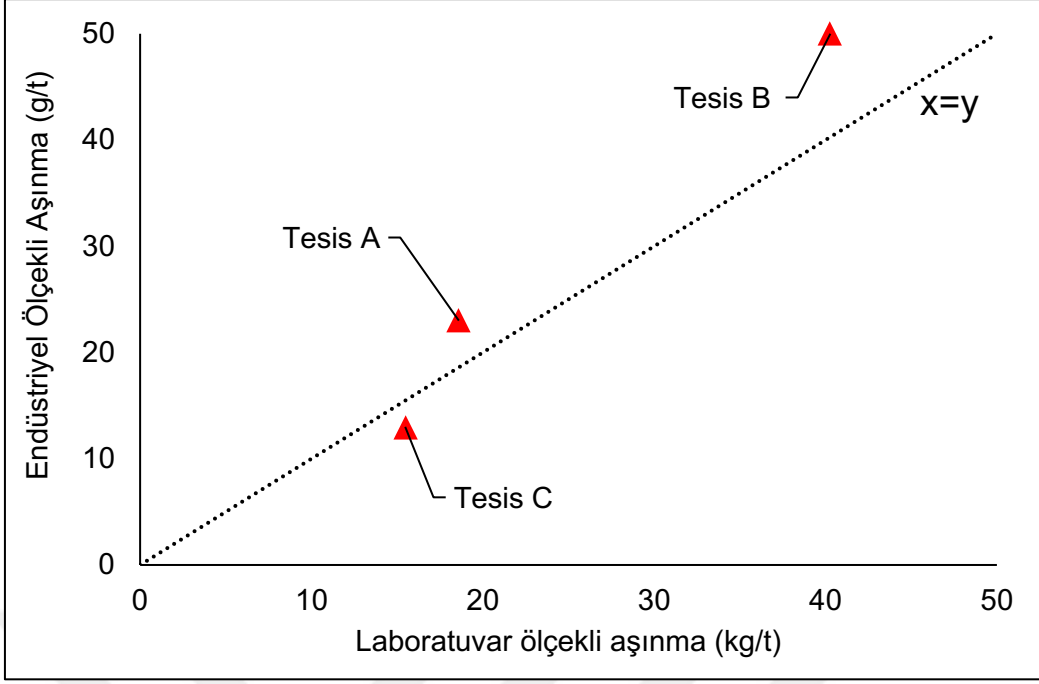
Şekil 5.15. Eşdeğer karbon miktarları ile birincil karbür miktarları arasındaki ilişki

Şekil incelendiğinde mikro yapı içerisindeki birincil karbür oranının eşdeğer karbon miktarıyla doğru orantılı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Ayrıca değerlendirmesi yapılan öğütücü ortam tipleri arasında en yüksek aşınma miktarının ölçüldüğü A1 tipi bilyanın en düşük eşdeğer karbon miktarına, en düşük aşınma miktarının ölçüldüğü B2 tipi bilyanın ise en yüksek eşdeğer karbon miktarına sahip olduğu görülmüştür.

Değerlendirmeler sonucunda kimyasal kompozisyonun öğütücü ortama aşınma direnci kazandıran birincil ve ikincil karbürlerin oluşumunda ve dolayısıyla aşınma miktarları üzerinde doğrudan etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

5.5. Laboratuvar ve Endüstriyel Ölçekli Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tez çalışmasının son aşamasında laboratuvar ortamında elde edilen aşınma değerleri ile endüstriyel gözlemler sonucu belirlenen aşınma değerleri karşılaştırılmıştır. Endüstriyel aşınma verileri CEM I 42.5 R tipi çimento üretimi yapılan üç farklı çimento tesisinden alınmıştır. Bu tesislerde üç aylık dönemde bilyalı değirmene yapılan bilya yüklemesi ile aynı dönemde öğütülen malzeme miktarları göz önünde bulundurularak aşınma değerleri elde edilmiştir. Diğer taraftan endüstriyel ölçekli değirmenlerin besleme malzemesi, bu değirmenlerden temin edilen öğütücü bilyalar kullanılarak laboratuvar ortamında öğütülmüştür. 900 dakikalık öğütme testlerinin ardından ölçülen aşınma miktarları endüstriyel ölçekli aşınma miktarları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.16).



Şekil 5.16. Laboratuvar ve endüstriyel ölçekli aşınma sonuçlarının karşılaştırılması

Değerlendirme sonucunda kg/ton cinsinden hesaplanan laboratuvar ölçekli aşınma sonuçları ile gr/ton cinsinden hesaplanan endüstriyel ölçekli aşınma miktarları ilişkilendirilmiştir. Laboratuvar ölçekli aşınma verileri Bond değirmeninde kesikli öğütme işlemleri uygulanarak elde edilmiştir. Bu uygulama değirmene sürekli taze besleme yapılmasına izin vermediğinden öğütücü ortamda meydana gelen aşınmaya karşılık işlem sırasında öğütülen malzeme miktarı sınırlıdır. Bu durum nedeniyle laboratuvar ve endüstriyel ölçekli aşınma sonuçlarının karşılaştırılması yapılırken farklı ölçü birimleri kullanılmıştır. Endüstriyel ve laboratuvar ölçekli aşınma sonuçları arasındaki bu ilişki, herhangi bir öğütücü ortam tipinin endüstriyel ölçekte kullanımından önce değerlendirilmesinin mümkün olduğunu işaret etmektedir. Bu değerlendirme yöntemi karşılaştırmalı aşınma miktarlarının hızlı ve tutarlı bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında çimento öğütme uygulamalarının maliyetlerinde önemli bir pay teşkil eden öğütücü bilya aşınması, öğütücü bilya ve öğütülen malzemenin özellikleri temelinde değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında değerlendirmesi yapılan altı farklı bilya tipi, farklı koşullarda (öğütme süresi, malzeme tipi, malzeme doluluğu, bilya doluluğu, değirmen geometrisi) incelenerek aşınma sonuçları takip edilmiştir.

Tamburlama testleri üç farklı değirmende uygulanmış ve değirmen çapındaki artış ile birlikte aşınma miktarlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Değirmen çapındaki değişim aşınma miktarlarının değişmesine neden olmakla birlikte, her üç test grubunda bilyalar aşınma miktarlarına göre çoktan aza A1, A2, B1, A3, C1, B2 düzeninde sıralanmışlardır.

Öğütme testlerinden elde edilen sonuçlar, malzeme doluluğundaki artışın aşınma miktarlarında azalmaya neden olduğunu işaret etmektedir. Malzemenin yastıklama etkisinin bir sonucu olarak bilyalar arası etkileşimin azalmasının bu sonuca neden olduğu düşünülmektedir. Farklı öğütücü ortam gruplarının kullanıldığı öğütme testlerinde ise tamburlama testlerinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde bilyalar aşınma miktarına göre çoktan aza A1, A2, B1, A3, C1, B2 düzeninde sıralanmışlardır. Öğütme testlerinin son aşamasında farklı tipteki malzemelerin öğütülmeye karşı gösterdikleri direnç ile bu testlerde ölçülen aşınma miktarları ilişkilendirilmiştir. Malzemenin öğütmeye direncinin artması ile aşınma miktarlarının arttığı anlaşılmıştır.

Çalışma kapsamında öğütücü ortamın mikro yapısı üzerinde incelemeler yapılarak aşınma dirençleri gözlemlenmiştir. Değerlendirmeler sonucunda aynı ısıl işlem yöntemi uygulanarak, dökme demirden üretilen öğütücü ortam gruplarının kimyasal kompozisyonlarındaki farklılıkların mikro yapıları üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Mikro yapıdaki matris ve karbürlerin hacimsel oranları ile aşınma miktarları ilişkilendirilmiştir. Elde edilen veriler martenzitik matrisin hacimsel oranındaki artışın aşınma direncini olumsuz etkilediğini işaret etmektedir. Ayrıca martenzitik matris içerisinde dağılmış halde bulunan karbür miktarındaki artışın aşınma direncini olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bilyaların sertlik ölçümleri ile aşınma miktarları arasında bir ilişki tespit edilememiştir.

Aşınmanın incelenmesi amacıyla laboratuvar ortamında yürütülen çalışmalar ile endüstriyel ölçekteki incelemelere göre daha kısa zamanda, daha düşük iş gücü ile veri sağlanabilmektedir. Ancak laboratuvar ve endüstriyel ölçekli aşınma miktarlarının ölçülmesinde farklı yaklaşımların kullanılması nedeniyle tez kapsamında yapılan çalışmalarda endüstriyel uygulamalarda ölçülen mutlak aşınma verilerine ulaşamamıştır. Aynı nedenle endüstriyel ve laboratuvar ölçekli çalışmalarda ölçülen aşınma miktarları farklı ölçekler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Diğer taraftan öğütme ve tamburlama testlerinden elde edilen sonuçlar uygulanan yöntemin bilya ve malzeme özelliklerinin aşınma üzerindeki etkisinin değerlendirilebilmesine yönelik karşılaştırılabilir sonuçlar sağlamak amacıyla kullanılabilirliğini işaret etmektedir.

Bu tez kapsamında uygulanan deney yöntemi kuru öğütme uygulamalarında meydana gelen aşınmanın değerlendirilmesi yönünde gelecekte yapılacak çalışmalara temel oluşturmaktadır. Uygulanan yöntem öğütme koşullarındaki değişimlere karşı hassas olması, tekrarlanabilir sonuçlar üretmesi bakımından tercih edilebilir konumdadır. Özellikle çimento tesisleri ve bilya üreticilerinin kalite kontrol süreçlerine dahil edilmesinin, öğütücü bilyaların aşınma performanslarını hızlı ve tutarlı bir şekilde incelemesi açısından fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Laboratuvar ölçekli aşınma deneyleri ile öğütücü bilyaların aşınma performansının belirlenmesi veya endüstriyel ölçekli aşınma miktarlarının tahmin edilmesi yönünde gelecekte yapılacak çalışmalarda ilave aşınma ölçümleri alınarak farklı birimler kullanılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu amaçla laboratuvar ölçekte yapılan deneylerde ağırlık ölçümlerinin yanı sıra bilya çapı ve yüzey topoğrafyası ölçümlerinin alınması, endüstriyel ölçekli gözlemlerde değirmene yapılan bilya yüklemesinin takibi, değirmen beslemesi ve ürünün tane boyu dağılımları, ürün sıcaklığı ve değirmenin duruş-kalkış verilerinin elde edilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu veriler kullanılarak aşınmanın hem laboratuvar hem de endüstriyel ölçekte birim yüzey alana sahip bilya şarjında birim zamanda meydana gelen aşınma cinsinden ifade edilmesi ile sağlıklı bir karşılaştırılmanın yapılması mümkün olabilecektir. Bu yöntemle laboratuvar ölçekli çalışmalardan elde edilen sonuçlar temel alınarak endüstriyel ölçekli aşınma miktarlarının tahmin edilmesinin mümkün olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Huang, Y.-H., Chang, Y.-L., ve Fleiter, T., A critical analysis of energy efficiency improvement potentials in Taiwan's cement industry, *Energy Policy*, 96, 14-26, **2016**
- [2] Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., ve Rahim, N. A., A critical review on energy use and savings in the cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2042-2060, **2011**
- [3] Radziszewski, P., Exploring total media wear, *Minerals Engineering*, 15, 1073-1087, **2002**
- [4] Zhiguo, Z., Chengkai, Y., Peng, Z., ve Wei, L., Microstructure and wear resistance of high chromium cast iron containing niobium, *China Foundry*, 11, **2014**
- [5] Aldrich, C., Consumption of steel grinding media in mills – A review, *Minerals Engineering*, 49, 77-91, **2013**
- [6] Natarajan, K., Laboratory studies on ball wear in the grinding of a chalcopryrite ore, *International Journal of Mineral Processing*, 46, 205-213, **1996**
- [7] Chenje, T. W., Simbi, D. J., ve Navara, E., The role of corrosive wear during laboratory milling, *Minerals Engineering*, 16, 619-624, **2003**
- [8] Levin, J., Observations on the Bond standard grindability test, and a proposal for a standard grindability test for fine materials, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 89, 13-21, **1989**
- [9] Gates, J. D., Giblett, A., ve Dunne, R., Prediction of plant ball mill media wear rates from laboratory ball mill test data, *Comminution '12*, South Africa, **2012**.
- [10] *TS EN 197-1: Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*, **2002**.
- [11] Duda Walter, H., *Cement Data Book*, Bauverlag GmbH, **1985**
- [12] Yeğınobalı, A., Çimento–Yeni Bir Çağın Malzemesi, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı-Ankara*, **2003**
- [13] Alsop, P., *Cement Plant Operations Handbook for Dry Process Plants*, Tradeship Publications Ltd, **1998**
- [14] Labahn, O., *Cement Engineers' Handbook*, Bauverlag, **1971**
- [15] DüNDAR, H., *Farklı Soğutma Hızlarında Soğutulan Çelikhane Cürufklarının Öğütme Parametrelerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2006**
- [16] Bye, G. C., *Portland cement: composition, production and properties*, Thomas Telford, **1999**
- [17] Yeğınobalı, A. ve Ertün, T., Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı-Ankara*, **2009**
- [18] WBCSD, I., Cement Technology Roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050, *World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency*.< http://wbcscement.org/pdf/technology/WBCSD-IEA_Cement%20Roadmap.pdf, **2009**

- [19] Wills, B. A. ve Finch, J., *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, Butterworth-Heinemann, **2015**
- [20] Dahner, J. ve Van den Bosch, A., Total primary milling cost reduction by improved liner design, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 111, 87-91, **2011**
- [21] Lameck, N. N. S., *Effects of grinding media shapes on ball mill performance*, Doktora Tezi, University of the Witwatersrand Faculty of Engineering and The Built Environment, Johannesburg, **2006**
- [22] Massola, C. P., Chaves, A. P., ve Albertin, E., A discussion on the measurement of grinding media wear, *Journal of Materials Research and Technology*, 5, 282-288, **2016**
- [23] *Systemanalyse von Verschleissvorgängen*, **1979**.
- [24] Gahr, K.-H. Z., *Microstructure and Wear of Materials*, Chapter 4 Classification of Wear Processes, **1987**
- [25] Bayer, R. G., *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*, Second Edition, Marcell Dekker Inc., **2004**
- [26] Bayer, R. G., Mechanical wear prediction and prevention, *Marcell Dekker, Inc.*, **1994**
- [27] Totten, G. E., *Handbook of Lubrication and Tribology: Volume I Application and Maintenance*, CRC Press, **2006**
- [28] Kato, K. ve Adachi, K., *Modern Tribology Handbook—Principles of Tribology*, LLC, Modern tribology handbook: Wear mechanism, **2001**
- [29] Neale, M. J. ve Gee, M., *A Guide to Wear Problems and Testing for Industry*, Chapter 6 - A summary of the approach to wear testing, William Andrew Publishing, Suffolk, UK, **2001**
- [30] Imhoff, C., Brown, D., Hane, G., Hutchinson, R., Erickson, R., Merriman, T., Gruber, T., ve Barber, S., Review of tribological sinks in six major industries, Pacific Northwest Labs., Richland, WA (USA), **1985**
- [31] Norman, T., Wear in ore processing machinery, *Wear Control Handbook*, 1009-1051, **1980**
- [32] Bhushan, B., *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*, Tribology of Earthmoving, Mining, and Minerals Processing, CRC Press, **2000**
- [33] Iwasaki, I., Pozzo, R. L., Natarajan, K. A., Adam, K., ve Orlich, J. N., Nature of corrosive and abrasive wear in ball mill grinding, *International Journal of Mineral Processing*, 22, 345-360, **1988**
- [34] Blickensderfer, R. ve Tylczak, J., Evaluation of Commercial US Grinding Balls by Laboratory Impact and Abrasion Tests, May, 7, **1989**
- [35] Iwasaki, I., Riemer, S. C., Orlich, J. N., ve Natarajan, K. A., Corrosive and abrasive wear in ore grinding, *Wear*, 103, 253-267, **1985**
- [36] Blau, P. J., *ASM Handbook, Volume 18-Friction, Lubrication, and Wear Technology*, ASM international, **1992**

- [37] Ratia, V., Behavior of Martensitic Wear Resistant Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions, *USA, Temepre University of Technology*, 2, **2015**
- [38] Dwyer-Joyce, R. S., Sayles, R. S., ve Ioannides, E., An investigation into the mechanisms of closed three-body abrasive wear, *Wear*, 175, 133-142, **1994**
- [39] Yelloji Rao, M. ve Natarajan, K., Factors influencing ball wear and flotation with respect to ore grinding, *Mineral Procesing and Extractive Metallurgy Review*, 7, 137-173, **1991**
- [40] Radziszewski, P. ve Tarasiewicz, S., Modelling and simulation of ball mill wear, *Wear*, 160, 309-316, **1993**
- [41] Anonim, Chapter 6 Wear, Eriřilebilir: <https://bit.ly/2Jgl3q7>, (Mayıs, **2018**)
- [42] Engel, P. A., *Tribology Series*, Chapter 6—Experimental Background of Percussive Impact Wear, Elsevier, **1978**
- [43] Engel, P. A., *Tribology Series*, Chapter 8—Measurable Impact Wear Theory, Elsevier, **1978**
- [44] Stachowiak, G. W. ve Batchelor, A. W., *Engineering TriBology*, 15 Fretting and Minor Wear Mechanisms, **1993**
- [45] Fuerstenau, D. W. ve Abouzeid, A. Z. M., The energy efficiency of ball milling in comminution, *International Journal of Mineral Processing*, 67, 161-185, **2002**
- [46] Nass, D., Steel grinding media used in the United States and Canada, Symposium on Materials for the Mining Industry, **1974**.
- [47] Farge, J. ve Barclay, G., Properties and performance of cast iron grinding balls, Symposium on Materials for the Mining Industry, **1974**.
- [48] Ortega-Cubillos, P., Nannetti-Bernardini, P. A., Celso-Fredel, M., ve Antonio Campos, R., Wear resistance of high chromium white cast iron for coal grinding rolls, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, **2015**
- [49] Karantzalis, E., Lekatou, A., ve Mavros, H., Microstructure and properties of high chromium cast irons: effect of heat treatments and alloying additions, *International Journal of Cast Metals Research*, 22, 448-456, **2013**
- [50] Odabaşı, A., *Kokil ve Kum Kalıba Döküm Yöntemleriyle Üretilen Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin X-ışınları Ve Taramalı Elektron Mikroskopu Çalışmalarıyla Karakterize Edilmesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2004**
- [51] Zumelzu, E., Goyos, I., Cabezas, C., Opitz, O., ve Parada, A., Wear and corrosion behaviour of high-chromium (14–30% Cr) cast iron alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 128, 250-255, **2002**
- [52] Bramfitt, B. L., Structure/Property relationships in irons and steels, *Materials Park, OH: ASM International*, 1998., 153-173, **1998**
- [53] Tabrett, C. P., Sare, I., ve Ghomashchi, M., Microstructure-property relationships in high chromium white iron alloys, *International Materials Reviews*, 41, 59-82, **1996**

- [54] Sağlam, C., *Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direncine Alaşım Elementleri İlavesinin Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2009**
- [55] Inthidech, S., Sricharoenchai, P., ve Matsubara, Y., Effect of alloying elements on heat treatment behavior of hypoeutectic high chromium cast iron, *Materials transactions*, 47, 72-81, **2006**
- [56] Chung, R., Tang, X., Li, D., Hinckley, B., ve Dolman, K., Microstructure refinement of hypereutectic high Cr cast irons using hard carbide-forming elements for improved wear resistance, *Wear*, 301, 695-706, **2013**
- [57] Eyre, T. S., *Wear, Wear Resistance of Metals*, **1979**
- [58] Pintaude, G., Albertin, E., Sinatora, A., ve Parada, A., Study On The Performance Of High Chromium Cast Iron Balls With Varied Carbide Fractions And Matrix Microstructures, **2002**.
- [59] Moema, J., Papo, M., Slabbert, G., ve Zimba, J., Grinding media quality assurance for the comminution of gold ores, World Gold Conference, **2009**.
- [60] Gates, J. D., Dargusch, M. S., Walsh, J. J., Field, S. L., Hermand, M. J. P., Delaup, B. G., ve Saad, J. R., Effect of abrasive mineral on alloy performance in the ball mill abrasion test, *Wear*, 265, 865-870, **2008**
- [61] Bond, F. C., Metal wear in crushing and grinding, *Allis-Chalmers Publication 07P1701*, **1963**
- [62] Higuera-Cobos, O. F., Dumitru, F.-D., ve Mesa-Grajales, D. H., Improvement of abrasive wear resistance of the high chromium cast iron ASTM A-532 through thermal treatment cycles, *Facultad de Ingeniería*, 25, 93-103, **2016**
- [63] Bond, F., Crushing and Grinding Calculations, Allis Chalmers Tech, *Pub. 07R9235B*, **1961**
- [64] Ene, G., The Grinding Charge of Rotary Mills, **2007**
- [65] ISO, I., 5725-1: 1994, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results-Part 1: General principles and definitions, *International Organization for Standardization, Geneva*, **1994**
- [66] Zmitrowicz, A., Wear debris: a review of properties and constitutive models, *Journal of theoretical and applied mechanics*, 43, 3-35, **2005**
- [67] Jankovic, A., Wills, T., ve Dikmen, S., A comparison of wear rates of ball mill grinding media, *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*, 52, 1-10, **2016**
- [68] Liu, Q., *Microstructure evaluation and wear-resistant properties of Ti-alloyed hypereutectic high chromium cast iron*, KTH Royal Institute of Technology **2013**
- [69] Zdravecká, E., Tkáčová, J., ve Ondáč, M., Effect of microstructure factors on abrasion resistance of high-strength steel, *Research in Agricultural Engineering*, 60, 115-120, **2004**
- [70] Kootsookos, A. ve Gates, J. D., The role of secondary carbide precipitation on the fracture toughness of a reduced carbon white iron, *Materials Science and Engineering: A*, 490, 313-318, **2008**

- [71] Çetinkaya, C., Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demir Malzemelerin Al₂O₃ ile Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 6, **2003**
- [72] Brown, J. R., *Foseco Foundryman's Handbook*, Butterworth-Heinemann, **1994**



ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Serdar Sait Çolak
Doğum Yeri : Rize
Medeni Hali : Bekar
E-posta : serdarscolak@gmail.com

Eğitim

Lise : Anıttepe Lisesi
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü
Doktora : -

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce, 2013 ÖSYM Yabancı Dil Sınav Notu 87,5/100

İş Deneyimi

-

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

“Development of a preliminary media wear measurement test procedure for cement ball milling applications”, *Powder Technology* 325 (2018): 678-686

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

“Development of a preliminary media wear measurement test procedure for cement ball milling applications”, European Symposium on Comminution and Classification, Eylül 2017, İzmir.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 03/07/2018

Tez Başlığı / Konusu: ÇİMENTO ÖĞÜTME UYGULAMALARINDA BİLYA VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BİLYA AŞINMA SONUÇLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ (INVESTIGATING THE EFFECTS OF BALL AND MATERIAL PROPERTIES ON MEDIA WEAR RESULTS FOR CEMENT GRINDING APPLICATIONS)


Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler, d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 82 sayfalık kısmına ilişkin, 03/07/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.


03/07/2018

Adı Soyadı: SERDAR SAİT ÇOLAK

Öğrenci No: N16122478

Anabilim Dalı: MADEN MÜHENDİSLİĞİ

Programı: CEVHER HAZIRLAMA

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.


DR. ÖĞR. ÜYESİ OKAY ALTUN