

**YATAY BİLYALI TİPTEKİ KROMİT ÖĞÜTME
DEĞİRMENİNİN ASTAR PLAKALARININ
TASARIMI**

FATİH DÖKME

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
EYLÜL – 2013**

**YATAY BİLYALI TİPTEKİ KROMİT ÖĞÜTME
DEĞİRMENİNİN ASTAR PLAKALARININ
TASARIMI**

FATİH DÖKME

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

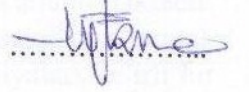
**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Onur GÜVEN**

**MERSİN
EYLÜL – 2013**

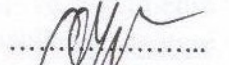
Fatih DÖKME tarafından Yrd. Doç. Dr. Onur GÜVEN danışmanlığında hazırlanan “Yatay Bilyalı Tipteki Kromit Öğütme Değirmeninin Astar Plakalarının Tasarımı” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Doç. Dr. Uğur EŞME



Yrd. Doç. Dr. Onur GÜVEN



Yrd. Doç. Dr. Önder ALBAYRAK



Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08./11./2013 tarih ve 2013.21/656 sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Doç. Dr. Mehmet KÜÇÜKASLAN
Enstitü Müdürü

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

YATAY TİPTEKİ KROMİT ÖĞÜTME DEĞİRMENİN ASTAR PLAKALARININ TASARIMI

Fatih DÖKME

ÖZ

Bilyalı değirmenler madencilik sektöründe öğütmenin genelde son kademesinde kullanılırlar ve 50 µm'nin altındaki ürün boyutuna kadar öğütme yapabilirler. Bilyalı değirmenlerde öğütücü eleman olarak bilya kullanılmaktadır. Değirmenin iç kısmı, dönüş esnasında gövdeyi bilyaların çarpma etkisinden korumak amacı ile plakalar ile kaplanmaktadır. Bu plakalar aynı zamanda bilyaları belirli bir yüksekliğe kadar taşıyarak, öğütülen malzeme üzerine düşmesini ve öğütmenin yapılmasını sağlamaktadırlar. Plaka tasarımının uygun olmadığı koşullarda öğütme çemberi öğütülen malzeme yerine doğrudan plakalar üzerinde oluşabilmektedir. Bu durum bilyaların doğrudan plakaya çarpmasına sebep olmaktadır. Bu çarpışmalar plakaların kırılmasına, kısa zamanda aşınmasına, plakayı tutan civataların gevşeyip plakaların düşmesine neden olabilmektedir. Değirmenlerde toplam öğütme maliyeti; enerji, plaka ve öğütücü maliyetleri toplamından oluşur. Plaka tasarımının bu üç maliyet üzerinde de etkisi vardır. Hem iyi değirmen plakası ömrü, hem de iyi bir değirmen performansı elde etmek, iyi bir plaka tasarımı ile elde edilebilir. Optimizasyonun, plaka ömründe iyileştirme, arızadan kaynaklanan duruş süresini kısaltma, enerji tasarrufu sağlama, plaka ve bilya maliyetini azaltma gibi önemli faydaları vardır. Uygun olmayan plaka tasarımı ile çalışan değirmenlerde öğütme verimi düşük olacaktır. Bilyalı değirmenlerin çalışmasında plaka tasarımı kadar önemli faktörler olan değirmen hızı ve bilya dolum oranının da optimizasyonları ile değirmenin doğru ve verimli çalışması sağlanabilir. Yapılan bu çalışmada değirmen astar plakalarında yapılan optimizasyonların, çeşitli hızlarda değirmen verimine olan etkisi incelenerek, elde edilen verilere göre prosete en uygun çalışabilecek plaka tasarımlar belirlenmiştir. Ayrıca yapılan deneyler ile tasarımların hangi değirmen hızlarında optimum öğütme yaptığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Öğütme, Bilyalı değirmen, Plaka, Optimizasyon

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Onur GÜVEN, Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Ana Bilim Dalı

DESIGN OF HORIZONTAL TYPE OF CHROMITE ORE GRINDING BALL MILL LINERS

Fatih DÖKME

ABSTRACT

Ball mills are using in mining sector as the last step of grinding and they can grind materials less than 50 μ m. Balls are use for grinder elements in ball mills. Inner part of ball mill shell is covered by liners to protect shell body from the balls impact because of the mill turning. Also this liners carry the balls up to a point and the balls fall down on the grinded material so achieve the grinding. In a condition that the liners design are not correct, the grinding chambers directly will occur on liners. This situation causes balls directly impact to liners. This impacts effect, breaking liners, wearing liners quickly, soften bolts which fix liners and result of falling liners. Total milling cost in mills is the sum of energy, liner and balls costs. Liner design has effects these three factors. To realize both long liner life and efficiently mill performance, it can achieve by good liner design. Optimization have some important advantages like increase liner life, reduce shut-down time which occurs because of fault, saving energy, reduce cost of liner and balls. Mills which are working with inappropriate liner designs have low efficiency. By optimization of the mill speed and ball charge ratio which are very important factors for mill efficiency like liner design, it can achieve efficient mill performance. In this study by investigating optimization of liner design upon mill performance at variant speed and aimed to determine the most acceptable liner design for the process. Also with the experiments it is determined that which is the optimum mill speed for these design.

Key Words: Grinding, Ball Mill, Liner, Optimization

Advisor: Assistant Prof. Dr. Onur GÜVEN, Department of Mechanical Engineering, University of Mersin

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmamda desteklerini benden esirgemeyen, her zaman hoşgörü ile yaklaşan Tez Danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Onur GÜVEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam esnasında bana maddi ve manevi destek sağlayan Şişecam Kimyasallar Grubu Soda Sanayii A.Ş.' Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası'nın değerli yöneticilerine ve tez çalışmam esnasında mesai harcayan değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince manevi desteklerini her an yanımda hissettiğim değerli ailem; Eşim Ferda DÖKME'ye ve oğlum Yiğit Alaz DÖKME'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	3
2.1. ÖĞÜTME TEORİLERİ	4
2.2. ÖĞÜTME İŞLEMİNDE KULLANILAN DEĞİRMEN TİPLERİ	6
2.2.1. Çubuklu Değirmenler	6
2.2.2. Bilyalı Değirmenler	7
2.2.3. Otojen Değirmenler	8
2.2.4. Valsli (Silindirli) Değirmenler	9
2.2.5. Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenler	10
2.2.6. Karıştırmalı Değirmenler	11
2.2.7. Jet Değirmenler	12
2.2.8. Titreşimli Değirmenler	13
2.2.9. Yörüngesel (Planeter) Değirmenler	14
2.2.10. Sarkaç Değirmenler	16
2.3. BİLYALI DEĞİRMENLERİN SINIFLANDIRILMASI	17
2.3.1. Çalışma Şekillerine Göre Bilyalı Değirmenler	17
2.3.2. Proses Şekillerine Göre Bilyalı Değirmenler	17
2.3.3. Besleme Şekillerine Göre Bilyalı Değirmenler	19
2.3.4. Tahrik Şekillerine Göre Bilyalı Değirmenler	19
2.3.5. İç Plaka Malzemesine Göre Bilyalı Değirmenler	20
2.4. BİLYALI DEĞİRMEN PLAKALARI	20
2.5. DEĞİRMEN PLAKA OPTİMİZASYONU	25
2.5.1. Değirmen Plaka Optimizasyonunun Değirmene Olan Etkileri	26
2.5.2. Değirmen Plaka Optimizasyonu ile İlgili Maliyet Analizi	27
2.5.3. Değirmen Plaka Tasarımına Etki Eden Faktörler	29
2.5.3.1. Değirmen hızı	29
2.5.3.2. Bilya dolum oranı	32

2.5.3.3. Taşıyıcı plaka yüksekliği ve açısı	34
<i>Denge noktası</i>	34
<i>Taşıyıcı plaka yüzeyinden dönerek aşağı hareket</i>	40
<i>Bilyanın taşıyıcı plaka üzerinde sadece dönüş yapmasına</i> <i>müsaade eden maksimum açı</i>	42
<i>Bilyanın taşıyıcı plaka üzerinde sadece dönüş yapması</i> <i>hareketinden hem dönüş hem de kayma anına geçtiği an</i>	43
<i>Dönüş ve kayma hareketinin birlikte olduğu zaman</i>	43
<i>Kayma hareketi</i>	44
<i>Serbest düşme yörüngesi</i>	45
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	49
3.1. MATERYAL	49
3.1.1. Değirmen.....	49
3.1.2. Değirmen Astar Plakaları	50
3.1.3. Bilya	51
3.1.4. Kromit	53
3.2. YÖNTEM	54
3.2.1. Deneysel Ölçekli Değirmen Astar Plakaları İmalatı	54
3.2.2. Deneysel Ölçekli Plaka Dizilimlerinin Yapılması	58
3.2.3. Değirmen Kritik Hızının Hesaplanması.....	59
3.2.4. Maksimum Bilya Çapının Belirlenmesi, Değirmen Bilya Dolum Oranının Hesaplanması ve Bilya Şarjı Yapılması.....	59
3.2.5. Plaka Tip 1 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (1. Deney).....	63
3.2.6. Plaka Tip 2 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (2. Deney).....	64
3.2.7. Plaka Tip 3 ile 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (3. Deney).....	65
3.2.8. Plaka Tip 4 ile 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (4. Deney).....	66
3.2.9. Plaka Tip 5 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (5. Deney).....	67
3.2.10. Plaka Tip 1 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (6. Deney).....	68
3.2.11. Plaka Tip 2 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (7. Deney).....	69
3.2.12. Plaka Tip 3 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (8. Deney).....	70
3.2.13. Plaka Tip 4 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (9. Deney).....	71
3.2.14. Plaka Tip 5 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (10. Deney).....	72

3.2.15. Plaka Tip 1 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (11. Deney).....	73
3.2.16. Plaka Tip 2 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (12. Deney).....	74
3.2.17. Plaka Tip 3 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (13. Deney).....	75
3.2.18. Plaka Tip 4 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (14. Deney).....	76
3.2.19. Plaka Tip 5 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (15. Deney).....	77
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	78
4.1. BULGULAR	78
4.1.1. Plaka Tip 1 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (1. Deney).....	78
4.2.2. Plaka Tip 2 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (2. Deney).....	79
4.2.3. Plaka Tip 3 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (3. Deney).....	80
4.2.4. Plaka Tip 4 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (4. Deney).....	81
4.2.5. Plaka Tip 5 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (5. Deney).....	82
4.2.6. Plaka Tip 1 İle 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (6. Deney).....	83
4.2.7. Plaka Tip 2 İle 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (7. Deney).....	84
4.2.8. Plaka Tip 3 İle 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (8. Deney).....	85
4.2.9. Plaka Tip 4 İle 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (9. Deney).....	86
4.2.10. Plaka Tip 5 İle 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (10. Deney).....	87
4.2.11. Plaka Tip 1 İle 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (11. Deney).....	88
4.2.12. Plaka Tip 2 İle 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (12. Deney).....	89
4.3.13. Plaka Tip 3 İle 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (13. Deney).....	90
4.3.14. Plaka Tip 4 İle 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (14. Deney).....	91
4.3.15. Plaka Tip 5 İle 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (15. Deney).....	92

4.2. DENEY BULGULARININ KARŞILAŞTIRILMASI	94
4.2.1. 34 Devir / Dakika’da (% 60 Kritik Hız) Deney Bulgularının Karşılaştırılması	95
4.2.2. 40 Devir / Dakika’da (% 70 Kritik Hız) Deney Bulgularının Karşılaştırılması	96
4.2.3. 46 Devir / Dakika’da (% 80 Kritik Hız) Deney Bulgularının Karşılaştırılması	98
4.2.4. Hız ile Enerji Tüketimi Karşılaştırılması	99
4.2.5. Hız ile Ürün Boyutu Karşılaştırılması.....	101
4.2.6. Hız ile Öğütme Çemberi Karşılaştırılması.....	104
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ.....	113

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Optimize edilmiş ve optimize edilmemiş plakalar için maliyet tablosu (Magotteaux, 2010)	28
Çizelge 2.2. 75µm öğütülmüş ürün elde etmek için kullanılan örnek enerji tablosu	34
Çizelge 3.1. Plaka malzemesinin kimyasal özellikleri	51
Çizelge 3.2. Bilya malzemesinin kimyasal özellikleri	52
Çizelge 3.3. Kromit malzemesinin kimyasal özellikleri	53
Çizelge 3.4. Kromit malzemesinin fiziksel özellikleri	53
Çizelge 3.5. Deneyler için belirlenen hızlar	55
Çizelge 4.1. 1. Deney sonuçları	78
Çizelge 4.2. 2. Deney sonuçları	79
Çizelge 4.3. 3. Deney sonuçları	80
Çizelge 4.4. 4. Deney sonuçları	81
Çizelge 4.5. 5. Deney sonuçları	82
Çizelge 4.6. 6. Deney sonuçları	83
Çizelge 4.7. 7. Deney sonuçları	84
Çizelge 4.8. 8. Deney sonuçları	85
Çizelge 4.9. 9. Deney sonuçları	86
Çizelge 4.10. 10. Deney sonuçları	87
Çizelge 4.11. 11. Deney sonuçları	88
Çizelge 4.12. 12. Deney sonuçları	89
Çizelge 4.13. 13. Deney sonuçları	90
Çizelge 4.14. 14. Deney sonuçları	91
Çizelge 4.15. 15. Deney sonuçları	92
Çizelge 4.15. Yapılan deneylerdeki verilerin özet tablosu	94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Boyut küçültmede taneye uygulanan kuvvetler	3
Şekil 2.2. Çubuklu değirmen.....	7
Şekil 2.3. Bilyalı değirmen.....	8
Şekil 2.4. Otojen değirmen.....	9
Şekil 2.5. Valsli değirmen	10
Şekil 2.6. Yüksek basınçlı merdaneli değirmen.....	11
Şekil 2.7. Karıştırmalı değirmen	12
Şekil 2.8. Jet değirmenler.....	13
Şekil 2.9. Titreşimli değirmen.....	14
Şekil 2.10. Yörüngesel değirmen.....	15
Şekil 2.11. Sarkaç değirmen (Hikom Değirmeni).....	16
Şekil 2.12. Kuru çalışan tek kompartmanlı yatay bilyalı değirmeni.....	18
Şekil 2.13. Kuru çalışan değirmen için tipik çalışma devresi	18
Şekil 2.14. Tahrik şekillerini göre bilyalı değirmenler	19
Şekil 2.15. Soda Sanayi A.Ş. Kromsan Fabrikası değirmeni.....	20
Şekil 2.16. Değirmen içerisindeki bilya hareketi	21
Şekil 2.17. Bilyalı değirmenlerde plaka dağılımı.....	23
Şekil 2.18. Bilyalı değirmen için klasik plaka dizilimi	24
Şekil 2.19. Bilyalı değirmenlerde kullanılan bazı plaka modelleri.....	25
Şekil 2.20. Plaka tasarımına göre bilyaların hareket yörüngeleri	27
Şekil 2.21. Optimize edilmiş ve optimize edilmemiş plakalar için maliyet grafiği	28
Şekil 2.22. Değirmen içerisindeki bilya hareketleri.....	30
Şekil 2.23. Değirmen içerisinde taşıyıcı plaka üzerinde bulunan bilya	35
Şekil 2.24. Taşıyıcı plaka ile temas halindeki bilya üzerine etkiyen kuvvetler	36
Şekil 2.25. Açısı değişken bir eğimli yüzey üzerinde hareket eden bilyaya etkiyen kuvvetler	40
Şekil 2.26. Bilyanın taşıyıcı plaka ucundan serbest düşüşe geçeceği andaki hız dağılımları.....	45
Şekil 2.27. Bilyanın taşıyıcı plakadan ayrıldıktan sonraki parabolik düşme yörüngesi.....	46
Şekil 3.1. Deneysel ölçekli değirmen.....	50
Şekil 3.2. Deneyler için kullanılan bilyalar.....	52
Şekil 3.3. Deneylerde öğütülen malzeme olarak kullanılan kromit	54
Şekil 3.4. Değirmen plaka imalatı.....	55
Şekil 3.5. Deneylerde öğütülen malzeme olarak kullanılan kromit	56
Şekil 3.6. Değirmen plaka dizilimi	58
Şekil 3.7. Değirmen bilya şarjı.....	60
Şekil 3.8. Bilyalı değirmende öğütme çemberi bileşenleri	61
Şekil 3.9. Değirmen kromit beslemesi	62
Şekil 3.10. 1. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi...63	
Şekil 3.11. 2. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi...64	
Şekil 3.12. 3. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi...65	

Şekil 3.13. 4. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi...	66
Şekil 3.14. 5. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi...	67
Şekil 3.15. 6. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi...	68
Şekil 3.16. 7. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi...	69
Şekil 3.17. 8. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi...	70
Şekil 3.18. 9. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi...	71
Şekil 3.19. 10. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi	72
Şekil 3.20. 11. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi	73
Şekil 3.21. 12. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi	74
Şekil 3.22. 13. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi	75
Şekil 3.23. 14. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi	76
Şekil 3.24. 15. Deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi	77
Şekil 4.1. 1. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	78
Şekil 4.2. 2. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	79
Şekil 4.3. 3. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	80
Şekil 4.4. 4. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	81
Şekil 4.5. 5. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	82
Şekil 4.6. 6. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	83
Şekil 4.7. 7. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	84
Şekil 4.8. 8. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	85
Şekil 4.9. 9. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	86
Şekil 4.10. 10. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	87
Şekil 4.11. 11. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	88
Şekil 4.12. 12. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	89
Şekil 4.13. 13. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	90
Şekil 4.14. 14. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	91
Şekil 4.15. 15. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü.....	92
Şekil 4.16. Deneyler sonucunda öğütülmüş kromit	93
Şekil 4.17. Deneyler sonrası öğütülen malzemeden numune alınması	93
Şekil 4.18. 34 devir/dakika hızda (%60 kritik hız) enerji tüketim tablosu	95
Şekil 4.19. 34 devir/dakika hızda (%60 kritik hız) ürün boyutu tablosu	95
Şekil 4.20. 34 devir/dakika hızda (%60 kritik hız) öğütme çemberi dışında kalan bilya yüzdesi	96
Şekil 4.21. 40 devir/dakika hızda (%70 kritik hız) enerji tüketim tablosu	96
Şekil 4.22. 40 devir/dakika hızda (%60 kritik hız) ürün boyutu tablosu	97
Şekil 4.23. 40 devir/dakika hızda (%70 kritik hız) öğütme çemberi dışında kalan bilya yüzdesi	97
Şekil 4.24. 46 devir/dakika hızda (%80 kritik hız) enerji tüketim tablosu	98
Şekil 4.25. 46 devir/dakika hızda (%80 kritik hız) ürün boyutu tablosu	98
Şekil 4.26. 46 devir/dakika hızda (%80 kritik hız) öğütme çemberi dışında kalan bilya yüzdesi	99

Şekil 4.27. Hız ile ortalama enerji tüketimi karşılaştırılması.....	99
Şekil 4.28. Plaka tiplerinin çeşitli hızlarda enerji tüketimleri.....	100
Şekil 4.29. Hız ile ortalama ürün boyutu karşılaştırılması.....	102
Şekil 4.30. Plaka tiplerinin değişken hızlardaki öğütmüş oldukları ürün boyutları.....	103
Şekil 4.31. Hız ile öğütme çemberi karşılaştırılması	104
Şekil 4.32. Plaka tiplerinin değişken hızlardaki öğütme çemberi dışında kalan bilya yüzdesine etkileri	105

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

ω : Açısal Hız

W_i : Bond Öğütme İndeksi (kwh/ton)

t: zaman.

τ : Kayma zamanı.

Γ : Tork.

I: Atalet momenti.

HRC : Rockwell Sertliği

k_k : Kick Sabiti

f_c : Kırılma Gerilimi

k: Rittinger Sabiti

W_i : Bond Öğütme İndeksi (kwh/ton)

N_c : Kritik devir (devir / dakika)

g: Yerçekimi kuvveti ($9,8 \text{ ms}^{-2}$).

N: Taşıyıcı plaka üzerinden bilyaya etkiyen normal kuvvet.

R: Değirmen etkin çapı.

r: Değirmen çapı ile bilya çapı arasındaki mesafe.

r^{\rightarrow} : Değirmen merkezinden bilya merkezine yönelen vektör.

s^{\rightarrow} : Taşıyıcı plaka yüzeyine paralel uç kısımdan sona yönelen vektör.

\acute{s} : Taşıyıcı plaka yüzeyi boyunca bilyanın doğrusal hızı.

\hat{s} : Taşıyıcı plaka yüzeyi boyunca bilyanın doğrusal ivmesi

μ_s : Bilya ve taşıyıcı plaka arasındaki statik sürtünme katsayısı.

μ_k : Bilya ve taşıyıcı plaka arasındaki kinetik sürtünme katsayısı.

v: Kartezyen koordinat sisteminde bilyanın hızı.

Ω : Değirmenin açısal hızı.

1. GİRİŞ

Kromu 1797’de Fransız kimyacı Louis Nicolas Vauquelin Sibirya’da bulunan bir cevher örneğinin içinde bulmuştur. Krom, Yunan dilinde renk anlamına gelen “Chrome”’den alınmış olup, sert parlak ve gümüşü renkte bir metale verilen isimdir. İngilizce ve Türkçe’de ise otomobillerin parlak ve paslanmaz çelik aksamına “krom” denilmiştir. Daha sonraları, Türkçe’de krom sözcüğü, tabiatta oksit halinde bulunan kromite ve krom cevherine verilen bir isim olmuştur [1].

Kromit çeşitleri koyu kahveden siyaha kadar çeşitli renklerde bulunabilir ve genellikle büyük kütleler içinde granül yapıda bulunurlar. Sertliği 5,5 mohr ölçeği kadardır. Yoğunluğu yüksek tenörlülerde 5-6 gr/cm³, düşük tenörlülerde ise 4 gr/cm³ civarındadır [2].

Kromit cevherinin kimyasal bileşimi cevherin sanayideki kullanım alanlarını belirlemektedir. Kimyasal analizlerde SiO₂, Cr₂O₃ ve Al₂O₃ yüzdeleri ve Cr/Fe oranı çok belirleyici olmaktadır. Kromit mineralinin doğada bilinen en yüksek Cr₂O₃ içeriği %68’dir.

Krom cevherinin endüstrideki kullanım alanlarına göre kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikler ile ilgili sınırlamalar söz konusudur. Teknolojik gelişmelere uygun olarak cevherin kimyasal bileşiminden kaynaklanan kullanım sınırlamaları giderek daha esnek hale gelmektedir. Kimyasal cevher olarak tanımlanan yüksek demirli krom cevheri, gelişen teknolojiyle artık metalurji sanayinde de kullanılabilir [3].

Öğütme işlemi için kullanılan mekanizmalar değirmen olarak adlandırılırlar. Değirmenlerin isimlendirilmesinde ve sınıflandırılmasında genelde öğütücü malzeme referans alınır. Öğütücü malzemesine göre değirmenler; bilyalı, çakıllı, çubuklu, valsli ve otojen (iri cevher parçalı) olarak isimlendirilebilir. Yapılan tez çalışmasında bilyalı değirmen sistemleri incelenmiştir.

Bilyalı değirmenler öğütücü malzemesi bilya olan değirmenlerdir. Diğer tip değirmenlerle karşılaştırıldığında ince öğütme için en uygun olan değirmendir. Yaş ve kuru olarak çalışabilirler. Kuru öğütmede, cevherin nem içeriğinin %1'den az olması istenir. Aksi durumlarda, nemli cevher hem bilyalara hem de astarlara sıvanır. İnce öğütme işlemi için en uygun besleme boyutunun 1 mm olduğu bulunmuştur. Bazen çok daha iri besleme de yapılabilir. 3 cm çaplı bilyalar içeren bir değirmende beslenen cevher tane boyutu yaklaşık olarak 1 mm'dir.

Bilyalar, dökme çelik, dökme demir veya dövme çelikten üretilebilirler. Genel olarak, bilyalar küresel şekillidir. Bununla beraber, silindirik, konik ve diğer düzensiz şekilli olanlar da kullanılmaktadır. Bilyalar, normal olarak, değirmen hacminin %40 ile %50'si kadar bir yer kaplar. Bununla beraber ve biraz daha fazla olduğu durumlar da vardır. Değirmene verilmesi gereken enerji, şarj miktarı ile artar. %50 şarj miktarında enerji maksimum olur. Optimum değirmen hızı da şarj hacmi ile artar [4].

Yapılan çalışma ile bilyalı değirmenlerinde plaka tasarımının değirmen performansına olan etkileri araştırılmıştır. Soda Sanayi A.Ş. Kromsan Fabrikası'nda bulunan üç adet bilyalı kromit öğütme değirmeni model olarak alınmış ve deneysel ölçekli bir bilyalı değirmen imalatı yapılmıştır. Bu değirmen ile bilyalı değirmenlerde en çok kullanılan taşıyıcı parçalı plaka tasarımının incelenmesi ve istenen tanecik boyutuna sahip azami öğütmenin yapılabilmesi için optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Yapılan çalışmada taşıyıcı parçalı plaka modeli ile çalışan değirmenin kritik hız, plaka yüksekliği ve açısının değirmen öğütme yörüngesine olan etkileri incelenmiştir. Söz konusu etkinler değişken olup, en uygun bilya öğütme yörüngesine etki eden faktörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Boyut küçültme bir diğer adıyla ufalama katı maddelerin az veya çok sayıda parçalara ayrılması işlemidir. Ufalamanın mümkün olabilmesi için, dıştan tatbik edilecek bir kuvvetle katı cisimlerin parçalarını birbirine bağlı tutan iç kuvvetlerin yenilmesi gerekir. Tatbik edilecek kuvvet darbe, baskı veya kesme kuvveti şeklinde olabilir. Ufalamanın karakteristik tarafı, her bir tanenin ayrı ayrı değil de tanelerin müştereken (kolektif olarak), ufalanmasıdır. Genel olarak madencilikte, cevherin ocakta patlatılmasından değirmen içinde toz haline gelinceye kadar geçirdiği işlemlere “ufalama” denilmektedir. Cevher hazırlamada ufalama için uygulanan işlemler kırma veya öğütmedir. Bunlar arasındaki fark, kırmada elde edilen ürünün öğütmeye nazaran daha iri olmasıdır [5].

Öğütme, boyut küçültme işleminin son aşaması olup, 25 mm’den daha küçük tane boyutlarına uygulanır. Cevherin toz haline getirilmesi için kullanılan bu araçlara ise ‘öğütücü’ ya da ‘değirmen’ adı verilir. Değirmenlerde öğütülecek malzeme darbe, ezme, kesme ve sürtme kuvvetleri ile toz haline getirilir [6].



Şekil 2.1. Boyut küçültme taneye uygulanan kuvvetler [4]

Öğütmenin başlıca iki amacı vardır. Bunlardan birincisi öğütülecek cevheri zenginleştirilebilmek için uygun tanecik boyutuna getirmek yani faydalı minerali faydasız mineralden serbestleştirmektir. Örneğin, ülkemizdeki altın cevherinde altının serbestleşme boyutu 38 mikrondur. İkinci amaç ise eğer cevher zenginleştirmeye gerek yok ise piyasanın istediği ölçülere göre öğütmektir.

2.1. ÖĞÜTME TEORİLERİ

Katı bir cisme, iç bağlantı kuvvetlerini yenecek derecede bir dış kuvvetin tatbiki sonucu bu cisim daha küçük parçalara bölünmekte ve böylece kırma veya öğütme olayları gerçekleşmektedir. Dış kuvvetin tatbikine harcanacak güç ile bu güce karşı elde edilen sonuçlar arası bağlantılar üzerine günümüze kadar üç teori ortaya atılmıştır. Krolonojik sıralamaya göre bunlardan ilki 1867'de Rittinger'in, ikincisi 1885'de Kick'in, üçüncüsü ise 1951'de Bond'un öne sürdükleri teorilerdir.

Katı bir cismin parçalara bölünmesiyle yeniden bazı yüzeyler meydana gelmekte, böylelikle kırılmış malzemede bir yüzey enerjisi artışı olmakta ve tane hacimleri küçülmektedir. Rittinger, olayı yüzey enerjisi artışı yönünde ele almış ve teorisini bu artışa dayamıştır. Ona göre, ebat küçültmede verilen faydalı iş yüzey artışı ile orantılıdır. Kırma ve öğütme sonucu yüzey enerjisinde bir artış olduğu gerçek ise de bu artış, harcanan toplam enerjisinin çok küçük (belki de 1/1000'lik) bir kısmını izaha yeterlidir. Enerjinin büyük kısmının şekil değiştirerek ısı haline geçtiği bilinmektedir.

Rittinger hipotezine göre öğütme için gerekli net enerji yüzey alanındaki büyüme ile orantılıdır.

$$E = C * \Delta S = C * (S_2 - S_1) \quad (2.1.)$$

Burada;

E: Öğütmek için gerekli enerji

S₁: Öğütülmemiş Malzemenin Yüzey Alanı

S₂: Öğütülmüş Malzemenin Yüzey Alanı

Bu formülden yola çıkılarak öğütme için gerekli net enerji;

$$E = C * [(1/D_2) - (1/D_1)] \quad (2.2.)$$

Eşitlikte C değişmezdir. Rittinger Teorisi daha çok ince öğütme için geçerlidir. C = kr * fc ile ifade edilir. Burada fc malzemeyi ezme gücü, kr ise Rittinger değişmezidir.

Kick Hipotezinde göre öğütmek için gerekli enerji öğütülmemiş malzemenin çapı ile öğütülmüş malzemenin çapına orandan bulunur.

$$E = k * \ln(D_2 / D_1)$$

(2.3.)

Burada;

D₁: Öğütülmemiş Malzemenin Çapı

D₂: Öğütülmüş Malzemenin Çapı

k: Resiprokal (İki taraflı) verim katsayısıdır. Burada k = k_k * f_e olup,

k_k: Kick Sabiti

f_e: Kırılma Gerilimi

1952 yılında Bond, tanecik boyutunun küçültülmesinde kullanılan enerjinin ürünün çapının karekökü ile ters orantılı olduğunu ileri sürmüştür. Bu orantı (α) matematiksel olarak ifade edilirse;

$$E \propto (1/\sqrt{D_2}) \quad (2.4.)$$

Bu üç hipotezi kullanarak parçacığın kırılması için gerekli net enerji bulunur. Ancak Rittinger hipotezi taneciğin kırılmadan önceki deformasyonunu göz önüne almamıştır. Dolayısıyla bu eşitliklerle öğütme enerjisi hakkında bilgi edinilmekle beraber, aletlerin performansı hakkında bilgi edinebilmek için, Bond tarafından çalışma indisi adı verilen bir kavram ortaya atılmıştır. Çalışma indisi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır. Çalışma İndisi (E_i) ,belli ağırlıktaki ve sonsuz parçacık büyüklüğündeki materyalin %80'inin 100 μ 'luk bir elekten geçecek şekilde öğütülmesi için gerekli enerjidir [7].

$$E_i = E * [\sqrt{D_1} / (\sqrt{D_1} - \sqrt{D_2})] * [D_2/100] \quad (2.5.)$$

E_i : Çalışma İndisi (kw.saat/ton)

Bu yaklaşım öğütücü performansının belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemdir

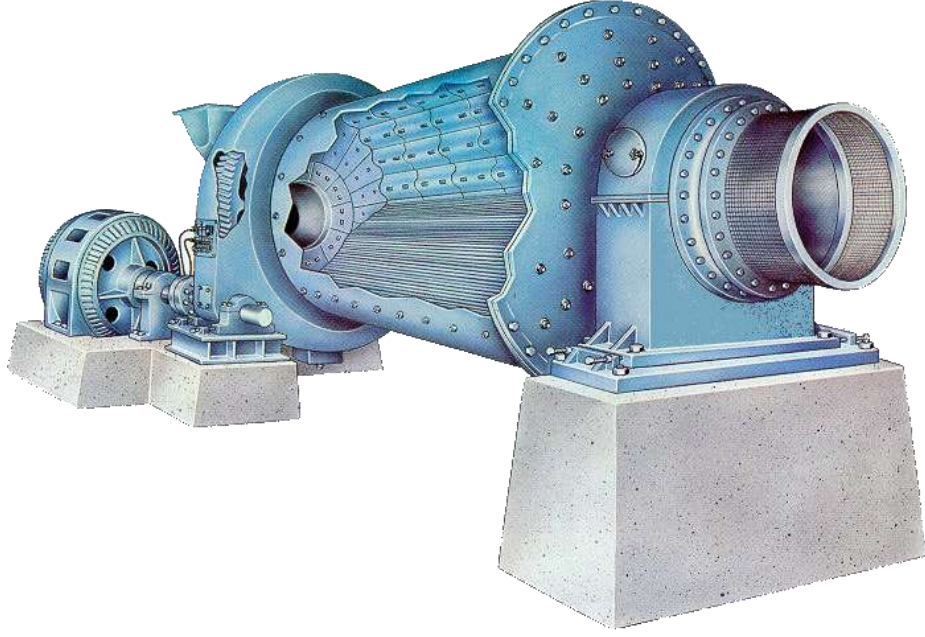
2.2. ÖĞÜTME İŞLEMİNDE KULLANILAN DEĞİRMEN TİPLERİ

2.2.1. Çubuklu Değirmenler

Çubuklu değirmenler genellikle birinci kademe öğütme devrelerinde kullanılır. İri boyutta kaba öğütücüler olarak da bilinmektedir. Genellikle yaş öğütmede kullanılırlar. Kırma işleminden sonraki ürünü çubuklu değirmene gelir. Buradan çıkan ürün ise ihtiyaca göre bilyalı değirmende daha ince taneciklere öğütülebilir [8].

Çubuklu değirmenlerde boy çap oranı (L/D) 1,5-2,5 arasındadır. Bu oranın 1,25'in altında olması durumunda, değirmen içindeki çubukların birbirine karışarak

öğütme ortamını bozulmasına, oranının 2,5'den büyük olması durumunda ise çubukların kırılmasına, eğilmesine, istiflerinin bozulmasına neden olmaktadır [9].



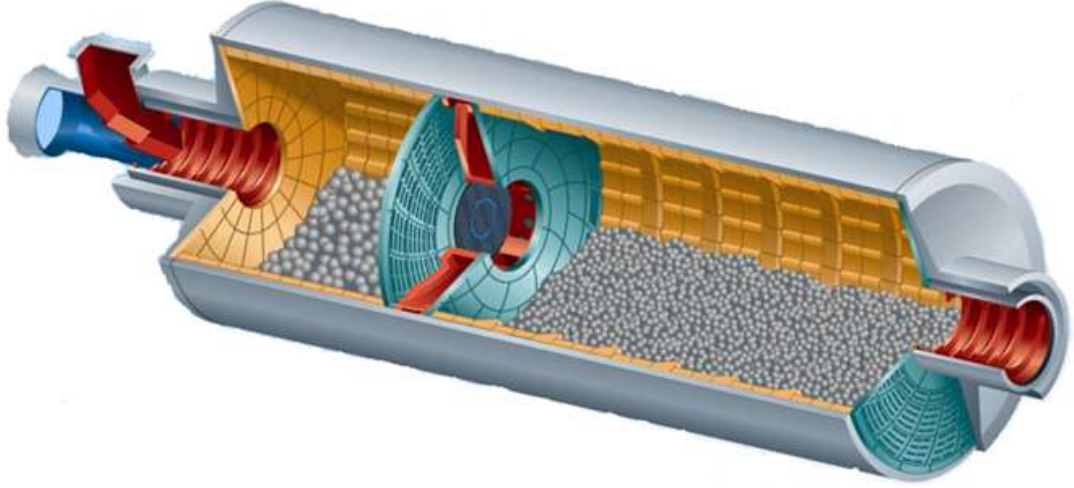
Şekil 2.2. Çubuklu değirmen [10]

2.2.2. Bilyalı Değirmenler

Öğütme ortamı çelik bilyalardan oluşan değirmenlere “Bilyalı Değirmen” denir. Genellikle öğütmenin son kademesinde kullanılır. Çubuklu değirmenlere göre daha ince ürün veren bu değirmenlerde boyun çapa oranı 1 ile 1,5 arasında değişmektedir. Genel olarak ince öğütmelerde değirmenin boyu daha uzundur.

Bilyalı değirmenlerde öğütme, bilyaların cevher taneleri ile noktasal teması sonucunda gerçekleşmektedir. Yeterli süre verilmesi durumunda bu değirmenler ile istenilen incelikte ürün alınabilmektedir. Bu yüzden bilyalı değirmenler ile 50 mikronun altında öğütme yapmak mümkündür. Ancak açık devre çalıştırılan bilyalı değirmenden elde edilen ürün çok geniş tane boyutuna sahiptir.

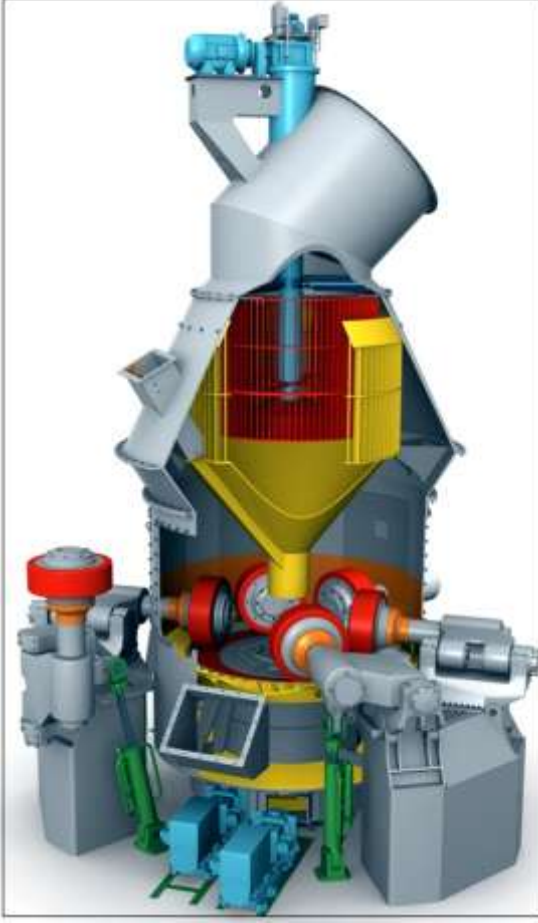
Bu problemi halletmek için malzemenin değirmen içerisinde kalma süresinin az olduğu kapalı devre öğütme sistemi kullanılmaktadır. Başka bir deyişle bilyalı değirmenlerde öğütülmüş ince ürün, sistemden uzaklaştırılarak iri tanelerle öğütme işlemine devam edilmelidir [11].



Şekil 2.3. Bilyalı değirmen [12]

2.2.3. Otojen Değirmenler

Öğütücü ortam olarak iri cevher parçalarının kullanıldığı öğütme şekline “Otojen Öğütme” denir. Otojen değirmenler bir çeşit aktarılan ortamla çalışan tamburlu değirmenlerdir. Yaş veya kuru olarak çalıştırılabilirler. Değirmen içerisinde öğütme olayı çatlatma, kesme ve aşındırma kuvvetleri ile gerçekleştirilir. İşletmelerden edinilen tecrübelerle göre otojen değirmenlerde astar sarfiyatı çubuklu ve bilyalı değirmenlerin astar sarfiyatından daha fazladır. Ancak bilya aşınmasının önlenmesi ile toplam çelik sarfiyatında %50 azalma görülmekte ve işletim maliyeti önemli ölçüde düşmektedir [13].

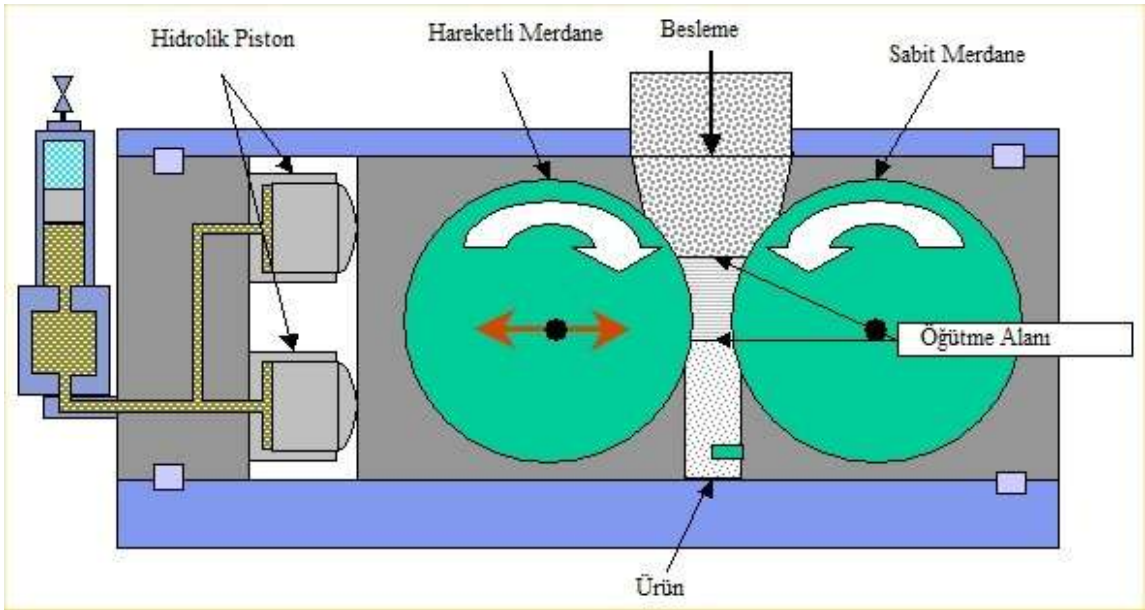


Şekil 2.5. Valsli değirmen [16]

2.2.5. Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenler

Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerde birbirine doğru dönen iki adet geniş çaplı (75-250 cm) merdane bulunur. Bu merdanelerden birisi sabit bir yatağa oturtulmuşken diğeri hidrolik bir sistem aracılığıyla sabit merdaneye doğru itilmektedir. Bu esnada iki merdane arasına yapılan besleme ile taneler ezilerek ufalanmaktadır. Ufalanmanın ölçüsü merdanelere uygulanan basınç ile kontrol edilmekte ve merdaneler arasındaki basınç cihazın büyüklüğüne göre 50 ile 150 kPa arasında değişmektedir. Bu değirmenler genellikle gevrek yapılı, kuru, yumuşak ve orta sertlikteki aşındırıcı olmayan malzemelerin öğütülmesi için uygundur [17].

Aktarılan ortamla çalışan değirmenlerde enerjinin büyük bir bölümü, öğütücü ortamın birbiriyle ve astarlarla çarpışmasında harcanmakta iken, yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerde öğütme malzeme yatağında gerçekleştiği için enerji kaybı daha az olmaktadır. Laboratuvar ölçeğinde yapılan çalışmalar sonucunda, yüksek basınçlı merdaneli değirmenin klasik bilyalı değirmene göre %40-50 oranında daha az enerji tükettiği kaydedilmiştir. Ayrıca, kapasitesinin de klasik bilyalı değirmene göre 1,5-3 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir [18].



Şekil 2.6. Yüksek basınçlı merdaneli değirmen [19]

2.2.6. Karıştırmalı Değirmenler

Karıştırmalı bilyalı değirmenler, mikronize malzeme üretiminde kullanılan en popüler değirmenlerdir. Son 30 yıldan beri; seramik, metalürji, elektronik, boya, kimya, gıda, lastik, ziraat, ilaç, fotoğraf, kömür ve enerji gibi endüstrilerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Diğer öğütme yapan cihazlara göre işletimi daha kolay, öğütme süresi ve enerji tüketimi daha azdır.

Karıştırmalı değirmen, temelde sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir gövde içinde dönen bir rotordan oluşmaktadır. Rotor üzerine belli aralıklarla yerleştirilmiş çubuk (pin) veya diskler yardımıyla silindiri dolduran ortamı hareket ettirerek öğütme yapılmaktadır. Öğütücü ortam olarak birkaç yüz mikrondan birkaç milimetreye kadar değişebilen bilyalar kullanılmaktadır. Uygulama alanına bağlı olarak değirmenin öğütücü ortamı boncuklar; çelik, seramik, cam (silis), alüminyum veya zirkon olabilmektedir. Öğütülecek malzemenin besleme boyutu da birkaç mikronla bir kaç milimetre arasında değişebilmektedir. Ancak, genellikle 100 mm'nin altındaki öğütmelerde enerji tüketiminin konvansiyonel değirmenlere göre daha az olduğu belirtilmektedir [20].

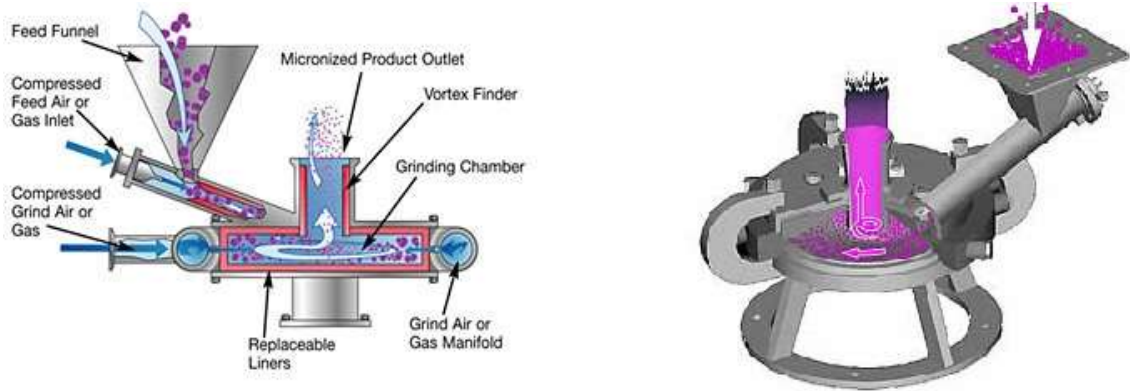


Şekil 2.7. Karıştırmalı değirmen [21]

2.2.7. Jet Değirmenler

Jet değirmenlerde, değirmen gövdesi içine çok yüksek basınçlarda verilen hava ile tanelerin birbirine ve değirmen gövdesine çarpması sonucu darbe ve aşınma etkisiyle

öğütme gerçekleştirilmektedir. Besleme boyutu genellikle 0,5 mm'nin altında olan bu tip değirmenler ile birkaç mikron düzeyine öğütme yapmak mümkündür. Bu sistemlerde, nozuldan basınçlı havanın etkisi ile ivmelenerek çıkan malzeme hızla öğütme odasına girmektedir. Öğütme odası aşınmayı en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır. Malzeme bu bölge içerisindeki çepere ve birbirlerine çarparak veya sürtünerek ince taneler halinde dağılmaktadır. Sistemdeki öğütülmüş malzeme ise akışkanın hareketi ile taşınarak havalı bir separatörden geçmekte ve ince taneler ayrıldıktan sonra iri tanelerle birlikte tekrar sisteme geri dönmektedir. Bu tip değirmenlerde akışkan ortam olarak; sıcak basınçlı buhar, hava veya herhangi bir inert gaz kullanılabilir. Daha çok plastik, polimer, pigment ve pestisit gibi malzemelerin mikron boyutuna öğütülmesi için kullanılmaktadır. Kapasiteleri 0,5 ile 5000 kg/saat arasında değişmektedir [22].

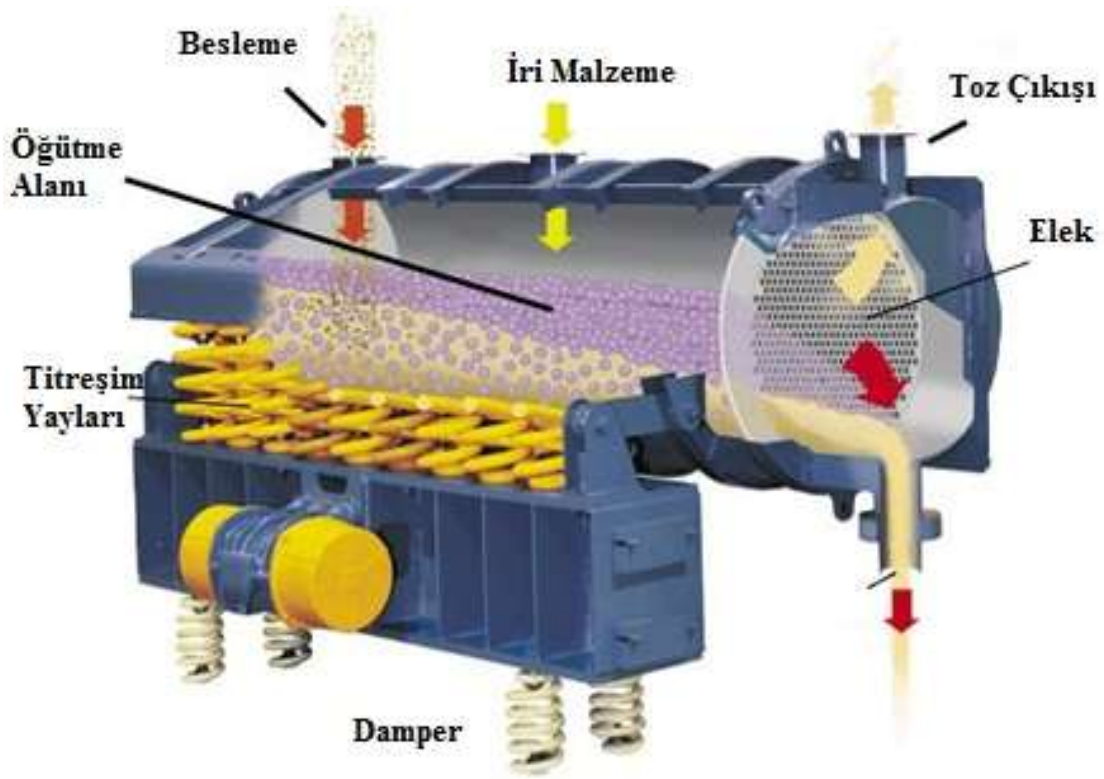


Şekil 2.8. Jet değirmenler [23]

2.2.8. Titreşimli Değirmenler

Titreşimli değirmenler dar bir boyut sağlayabilmeleri, düşük enerji tüketimleri, düşük ürün kirliliği vs. gibi nedenlerden dolayı birçok endüstride minerallerin ince ve de süper ince boyutlara öğütülmesini sağlamak için kullanılmakta olan önemli bir değirmen türüdür. Bu değirmenlerde değirmenin gövdesi bir boru gibidir ve hacminin %65–80 i öğütücü ortam ile doldurulur. Bilyalı değirmenlere göre daha düşük bir kapasiteye de sahiptir. Bu kapasite yaklaşık 18 ton/saat civarındadır.

Öğütücü ortam bilyalar, çubuklar ya da silindirler olabilir. Öğütücü ortamın şekli ise ya boru şeklinde silindirik ya da halka şeklindedir. Sert ve aşındırıcı malzemelerin öğütülmesinde oldukça uygundur. Salınım çapı, alıkonma süresi vs. gibi parametrelerin ayarlanmasıyla beslemeleri de işleyebilmektedir. Bunlar kireçtaşı, alçıtaşı, boksit, dolomit, alumina, korundum, silimanit, manyezit, kromit, florit gibi malzemelerdir. Öğütme hem yaş hem de kuru olarak gerçekleştirilebilmektedir. Fakat yaş öğütme burada nadiren uygulanmaktadır [22].



Şekil 2.9. Titreşimli değirmen [24]

2.2.9. Yörüngesel (Planeter) Değirmenler

Mikron ve mikron altı boyutlarda öğütme yapmak için geliştirilmiş olan bir çeşit bilyalı değirmen tipidir. Planeter ismi, değirmen gövdesinin güneş etrafındaki gezegenlerin hareketi gibi dönmesinden gelmektedir. Bir yörüngesel değirmende, bir birine ters yönde olan iki hareket vardır. Birincisinde, yörüngesel değirmenin gövdeleri

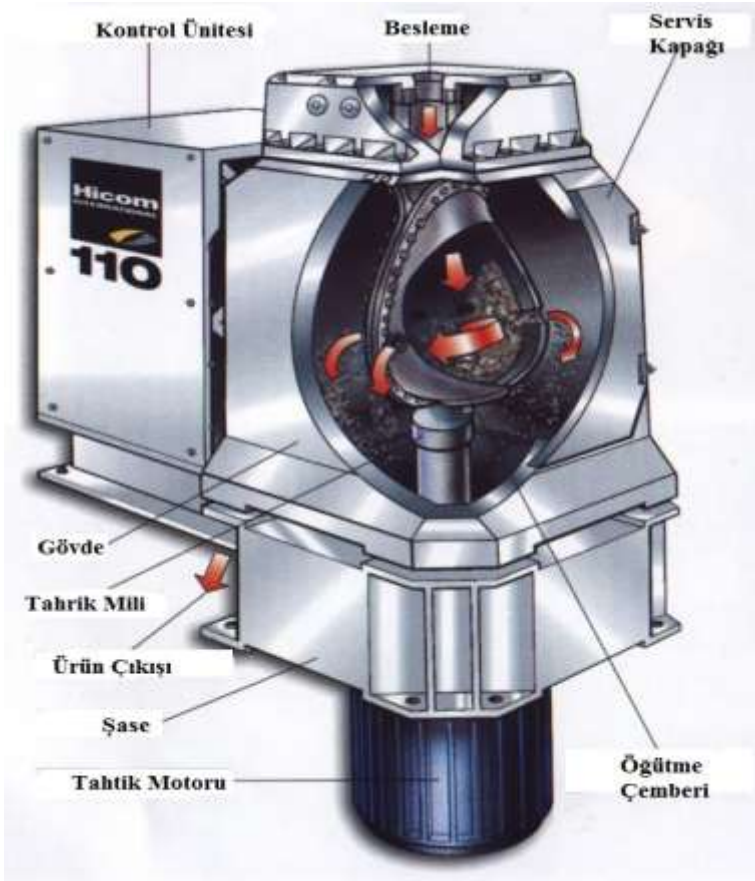
(4 adet), merkezi bir eksen etrafında tıpkı gezegenlerin güneş etrafındaki dönüşü gibi döner. Bu hareketi sayesinde merkez eksenini boyunca santrifüj alanı oluşur. İkinci harekette ise değirmen gövdeleri kendi eksenleri etrafında dönmektedir. Ayrıca, yüksek santrifüj alanının da etkisiyle değirmen içerisinde çok yüksek enerji açığa çıkmaktadır. Bu yüzden, yörüngesel bir değirmen ile klasik bilyalı değirmenlere göre daha kısa sürede çok ince boyutlu malzeme elde etmek mümkündür. Günümüzde karıştırılmalı değirmenin kullanıldığı her alanda yörüngesel değirmen kullanılabilmesi olanaklı gözükmektedir. Ancak, karıştırılmalı değirmenlere göre öğütme maliyeti daha yüksek olup, mekanik aksamlarında sık sık problem yaşanmaktadır [25].



Şekil 2.10. Yörüngesel değirmen [26]

2.2.10. Sarkaç Değirmenler

En bilinen sarkaç değirmen tipi, yüksek yoğunluklu, yarı küresel öğütme odalı Hikom değirmenidir. Hikom değirmeninde öğütme odası askıda tutulmakta ve kendi eksenini etrafında ivmeli bir hareketle 600-800 d/d'lık bir hızla döndürülmektedir. İçerisinde bulunan bilyalar yardımıyla taneler ufalanmakta ve öğütme odası üzerinde bulunan deliklerden öğütülmüş ürün dışarı çıkmaktadır. Daha sonra bu ürün separatörden geçirilmekte ve ince kısmından ayrılmaktadır. Bu değirmen tipinde kimberlit gibi çok sert malzeme öğütülebileceği gibi, kireç ve talk gibi çok yumuşak malzemeler de etkili bir şekilde öğütülebilmektedir. Diğer değirmen tipleri ile karşılaştırıldığında %31 ile %70 arasında bir enerji tasarrufu sağladığı çeşitli çalışmalarda iddia edilmektedir [27].



Şekil 2.11. Sarkaç değirmen (Hikom değirmeni) [28]

2.3. BİLYALI DEĞİRMENLERİN SINIFLANDIRILMASI

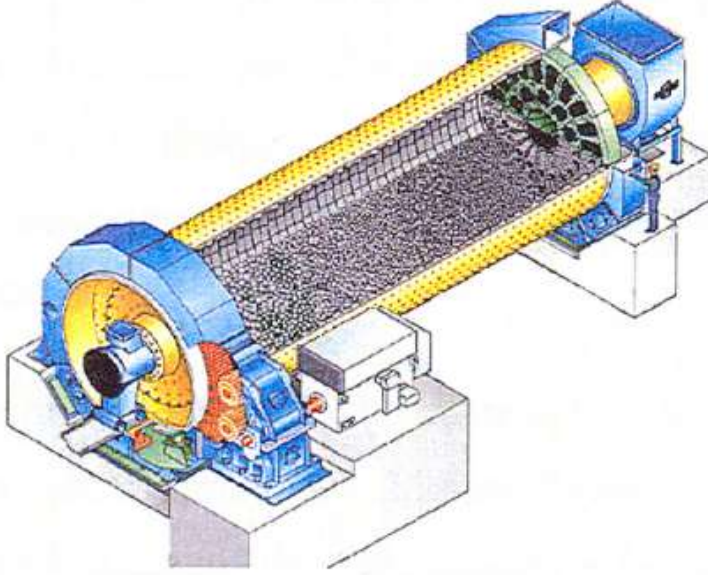
2.3.1. Çalışma Şekillerine Göre Bilyalı Değirmenler

Bilyalı değirmenler çalışma şekillerine iki ana grupta sınıflandırılabilirler. Bunlardan biri “Batch” (Parti) şeklinde çalışır. Bu tip çalışmada bilyalar ve öğütülecek malzeme değirmene beslenir. Ardından, değirmen malzeme istenilen değerlere gelinceye kadar çalışır. Daha sonra öğütülen malzeme boşaltılır. Ardından tekrar öğütülecek malzeme ile beslenir ve öğütme işlemi yapılır. Diğer çalışma sistemi ise “Continious” (Sürekli) çalışır. Bu sistemde ise değirmene bilya şarjı yapıldıktan sonra değirmen sürekli olarak öğütülecek malzeme ile beslenir ve değirmen çıkışından devamlı olarak öğütülmüş malzeme alınır.

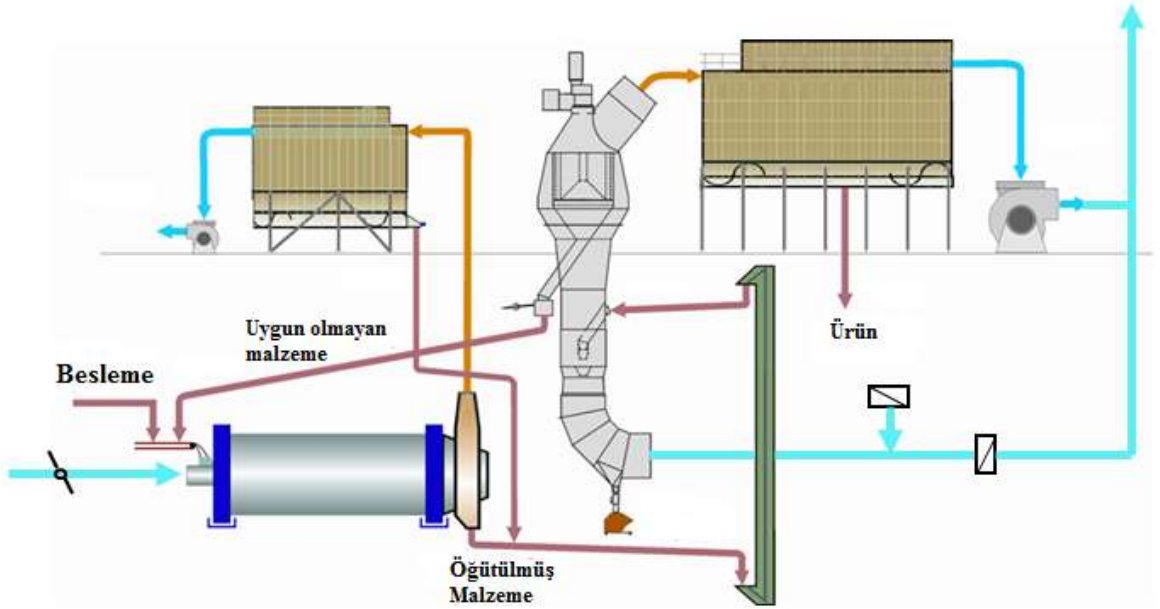
2.3.2. Proses Şekillerine Göre Bilyalı Değirmenler

Proses bakımından ise değirmenler kuru ve yaş çalışan değirmenler olmak üzere iki ana sınıfa ayrılırlar. Adından da anlaşılacağı üzere kuru çalışan değirmenlerde kuru işlem, yaş çalışan değirmenlerin sisteminde ise öğütücü malzeme ile birlikte yaş işlem yapılır.

Kuru öğütmede malzemenin değirmen içindeki hareketini sağlamak için değirmenin çıkış tarafına vakum, ya da giriş tarafına basınçlı hava uygulanır. Bazen vakum ve basınçlı hava birlikte de kullanılabilir. Uygulanacak vakum veya basınç, malzemenin değirmen içinde yığılmasını önlemeli, malzemenin değirmen içinde öğütülebilmesi için yeterli süre kalmasını sağlamalıdır. Kuru öğütme devrelerinde valsli, bilyalı, otojen veya yaygın olmasa da çubuklu değirmen kullanılmaktadır [29].



Şekil 2.12. Kuru çalışan tek kompartmanlı yatay bilyalı değirmen [30]



Şekil 2.13. Kuru çalışan değirmen için tipik çalışma devresi [31]

2.3.3. Besleme Şekillerine Göre Bilyalı Değirmenler

Bilyalı değirmenler besleme şekilleri yönünden incelenirse; tüplü besleme, oluklu besleme ve vidalı besleme olarak genelde üç tip besleme şekline bahsedilebilir. Tüplü besleme genelde yaş sistem değirmenlerinde kullanılır. Oluklu besleme kullanıldığında, malzemeyi değirmen içerisine besleyebilmek için değirmene vakum sistemi kurulmalıdır. Vidalı tip besleyiciler kuru tip değirmenlerde kullanılmakta olup sık sorun yaşatan malzemeler için kullanılır.

2.3.4. Tahrik Şekillerine Göre Bilyalı Değirmenler

Bilyalı değirmenler tahrik şekilleri yönünden iki çeşit olarak üretilirler. Bunlardan biri doğrudan tahrikli (milli) diğeri ise fener/pinyon dişli olarak üretilen değirmenlerdir. Doğrudan tahrikli tip değirmenler tahrik grubu tarafından bir mil vasıtasıyla değirmeni merkezden tahrik eden sistemlerdir. Fener/pinyon dişli tahrikli değirmenlerde ise tahrik grubu pinyon dişliyi çevirir, pinyon dişli ise değirmen çevresine montajlanmış olan fener dişliyi çevirir ve değirmene dönüş hareketi sağlar.

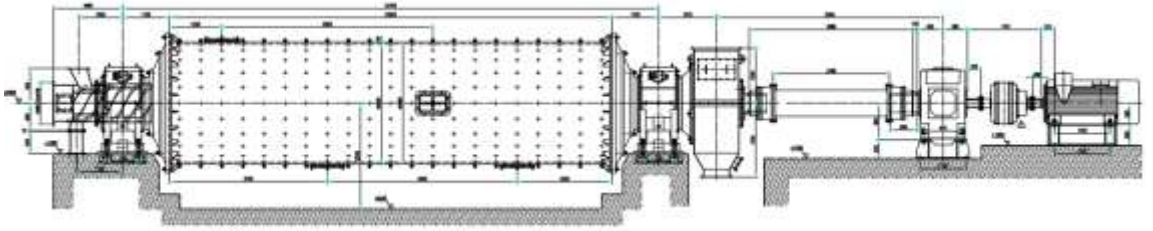


Şekil 2.14. Tahrik şekillerini göre bilyalı değirmenler

2.3.5. İç Plaka Malzemesine Göre Bilyalı Değirmenler

Bilyalı değirmenlerin iç plaka tipleri imalat malzemesine göre üç başlıkta toplanabilir. Bunlar çelik plakalar, kauçuk plakalar ve seramik plakalardır. Bu plakalardan kauçuk plakalar sadece yaş öğütme sistemi ile çalışan değirmenlerde kullanılır. Seramik plakalar ise kuru sistemlerde ve öğütülen malzeme içerisinde demir ve demir bileşeni olmayan durumlarda kullanılmaya uygundur. Çelik plakalar ise kuru ve yaş sistemlerin her ikisinde de kullanılabilir [32].

Çalışmada model olarak kullanılacak olan değirmenlerin besleme şekli vidalı beslemedir. Merkezden mil ile tahrik edilmekte olup değirmen astar plakaları manganlı çelik malzemeden imal edilmiştir. Sistem olarak kuru çalışan yatay ve tek kamaralı bilyalı değirmenlerdir. Öğütücü malzeme olarak paslanmaz çelik bilya kullanılmaktadır. Çalışmada mevcut değirmen model alınacak olup buna uygun bir deneysel ölçekli bir bilyalı değirmen imalatı yapılmıştır.

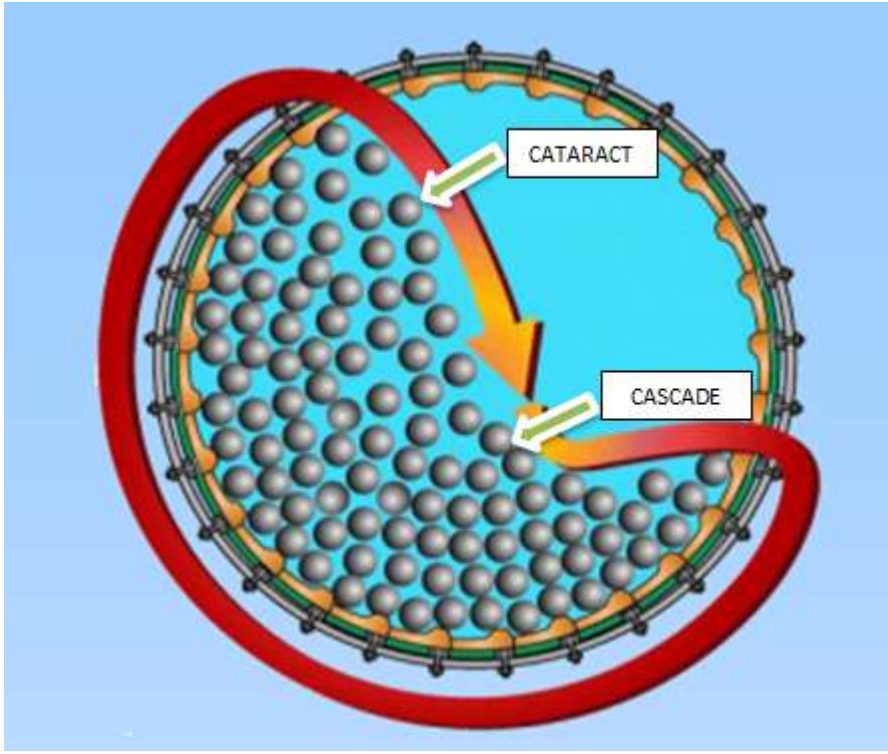


Şekil 2.15. Soda Sanayi A.Ş. Kromsan Fabrikası değirmeni

2.4. BİLYALI DEĞİRMEN PLAKALARI

Değirmenlerin iç yüzeyleri astarlarla kaplıdır. Değirmen dönme sırasında, öğütme elemanları ile astar plakaları sürtünmeden dolayı, öğütme elemanları dinamik dengeye ulaşmaya kadar yukarı kaldırılırlar. Öğütme elemanlarının bir kısmı, bu hareket sırasında geriye doğru kayarken bir kısmı biraz daha yükseldikten sonra düşmeye maruz kalırlar. Düşük dönme hızlarında veya astarların düz olması durumunda,

öğütme elemanları yuvarlanarak aşağı kayarlar. Bu harekete “Cascade” denir ve sonucunda aşınma ile öğütme gerçekleşir. “Cascade” hareketi, oldukça ince tane oluşumuna ve değirmen astarlarının daha fazla aşınmasına neden olur. Yüksek hızlarda veya değirmen astarlarının düz olmaması durumunda öğütücü elemanlar, değirmen içinde daha yükseğe çıkarılırlar ve buradan düşerler. Düşükleri yerlerde bulunan cevher parçalarını, şok ve aşındırma yoluyla öğütürler. Bu hareket ise “Cataract” adını alır ve daha iri ürün sağlandığı gibi daha az astar plaka aşınmasına neden olur.



Şekil 2.16. Değirmen içerisindeki bilya hareketi [33]

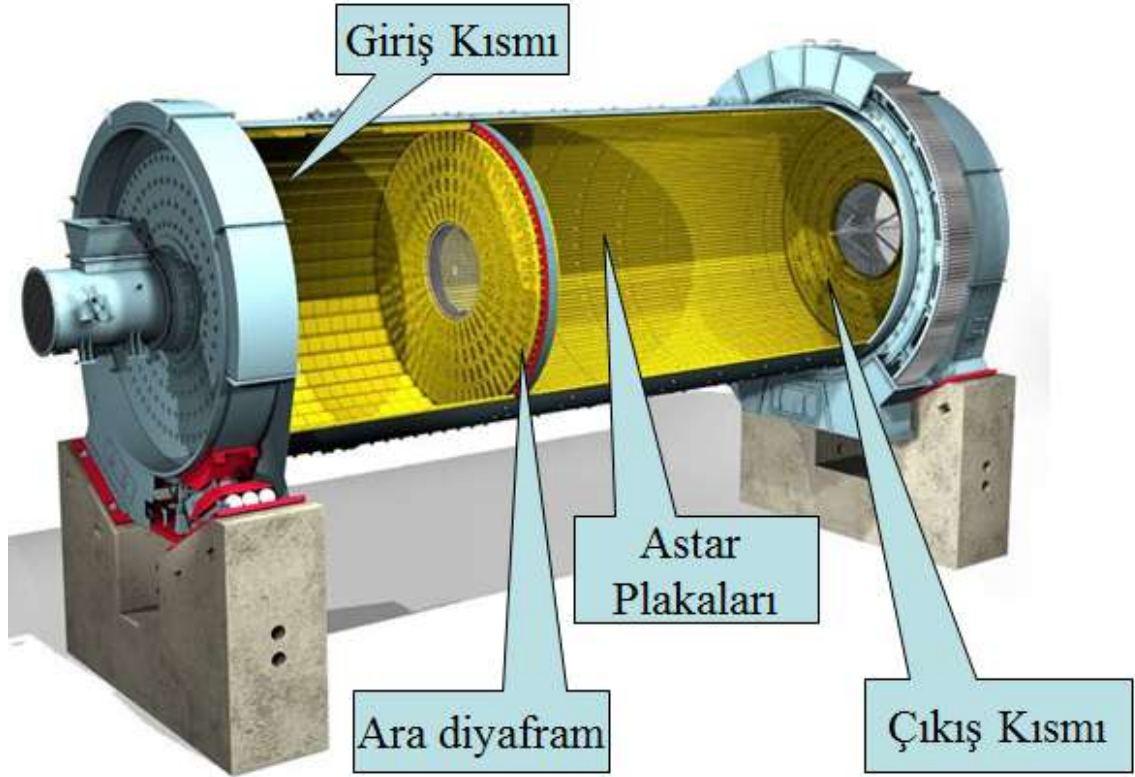
Genelde değirmen iç kısmındaki plakalar şu şekilde sınıflandırılabilir;

- Astar plakaları: Asıl görevi, değirmen gövdesini bilyaların ve öğütülen malzemenin darbelerine karşı korumak ve bilyaları öğütme çemberi içerisinde tutmaktır.
- Ara bölme plakaları: Değirmenin birden fazla kompartımana sahip olduğu durumlarda var olan plakalardır. Değirmen iki, üç veya nadir de olsa daha fazla kompartımana sahip

olduğu durumlarda, kompartımanlar arasında geçiş görevi görürler. Genelde değirmenler kaba öğütme ve ince öğütmenin yapıldığı iki kompartımandan oluşurlar. İlk kısımda yapılan kaba öğütmeden sonra öğütülen malzeme ara bölme plakalarından geçerek ince öğütmenin yapılacağı kompartımana gelirler. Bu gibi durumlarda ara bölme plakaları kaba öğütülmesi tamamlanmış malzemenin ince öğütme kompartımanına geçmesi esnasında görev yapan plakalardır. Yeterince öğütülmüş malzemeler plaka üzerindeki açıklıklardan diğer kompartımana geçebilirken, açıklıktan geçemeyen malzeme yeterince öğütülmemiş anlamında gelmektedir.

- Giriş plakaları: Bu plakalar değirmenin giriş ayna kısmını darbeler karşı korumakla görevlidir. Plaka üzerinde her hangi bir açıklık bulunmaz. Bu plakalar arasından herhangi bir malzeme geçişi söz konusu değildir.
- Çıkış plakaları: Çıkış plakalarının birinci görevi çıkış ayna kısmını darbelere karşı korumaktır. İkinci önemli görevi ise öğütülmüş malzemenin plaka üzerinde bulunan açıklıklardan geçmesini sağlayarak, malzemeni değirmenin dışına alınmasını sağlamaktır.

Giriş ve çıkış tarafı plakaları da montaj kolaylığı açısından genelde iki parçalı olurlar. Bu durumda giriş plakası iç, giriş plakası dış, çıkış plakası iç, çıkış plakası dış olarak adlandırılırlar. Şekil 2.17.'de değirmen kesitinde değirmen içerisindeki plakaların genel montaj şekli verilmiştir.



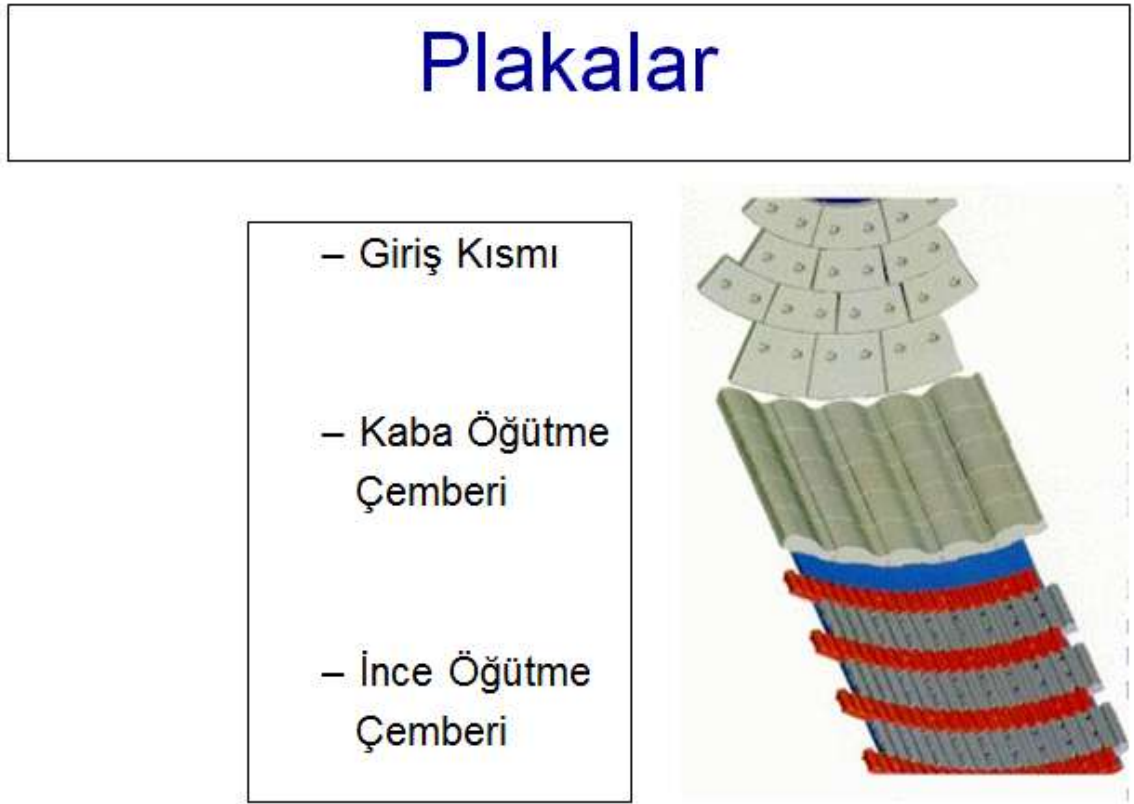
Şekil 2.17. Bilyalı değirmenlerde plaka dağılımı [34]

Değirmen gövdesini sert darbelere ve değirmen içindeki abrasif ortama karşı korumak astar plakalarının asıl görevlerinden biridir. Plakalar seçilirken genelde en uzun süre çalışma süresine sahip olan veya en ucuz olan seçilir. Plakaların maruz kaldığı yüklerin sürekliliği, plaka ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden belirli periyodlar haline duruş yapmak, plakalara etkiyen yüklere ara vereceğinden, plakaların daha sağlıklı ve daha uzun süre çalışmasına olanak sağlar [35].

Malzemenin dönme etkisi ile öğütme çemberine taşımak ve burada uygun sürede tutmak değirmenin ikinci en önemli görevidir. Değirmenler üzerinde ilk çalışmalar yaklaşık yüz yıl önce (White 1905 ve Davis 1919) yapılmasına rağmen, plaka tasarımının değirmen performansına olan etkilerinin ilk olarak araştırılması McIvor tarafından bu tarihten yaklaşık yetmiş yıl sonra yapılmıştır. Bu çalışma ile birlikte plaka

tasarımın değirmen performansına önemli bir etkisi olduğu anlaşılmıştır. Böylece fabrikalarda bulunan eski değirmen plakalarının değişimi başlamıştır [36].

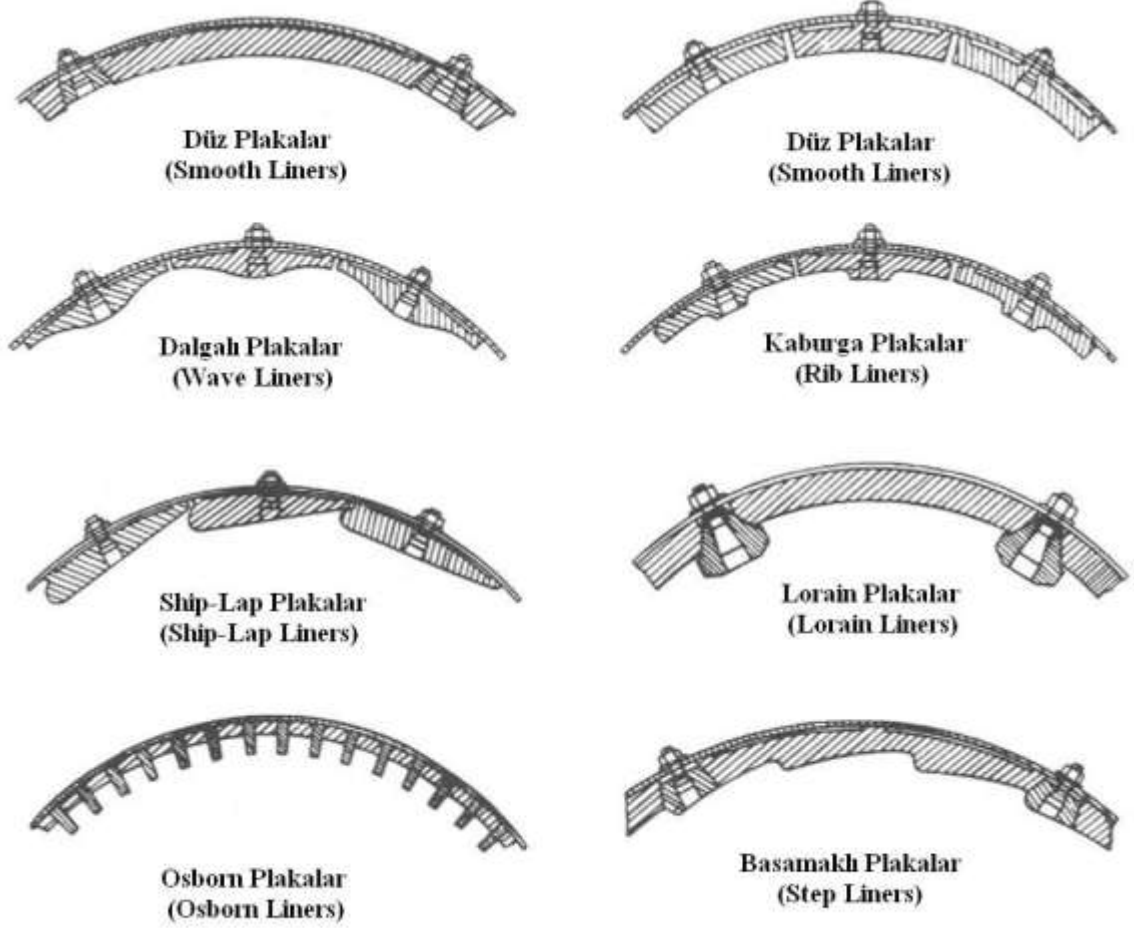
Bilyalı değirmenlerde plakalar, değirmende öğütülen malzemenin özelliklerine göre tasarlanır. Bu tasarımın da plaka dizilimine etki vardır. Aşağıdaki şekilde klasik bir bilyalı değirmende plakaların dizilim sırası gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Bilyalı değirmen için klasik plaka dizilimi [37]

Plaka tasarımında göz önüne alınan en önemli faktör öğütülen malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleridir. Öğütülecek malzemenin istenilen tanecik boyutuna ulaşması için değirmende doğru plaka tasarımının yapılması gerekmektedir. Aksi halde istenilen tanecik boyutuna ulaşılamaz ve değirmene mekanik yönden zarar verilebilir. Literatürde bilyalı değirmenler için çeşitli proseslerde denenmiş ve başarı sağlanmış çok çeşitli plaka modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller üzerinde yapılan açı değişiklikleriyle

öğütme çemberi için en uygun olan plaka tasarlanması gerekmektedir. Aşağıdaki şekilde bilyalı değirmenler için daha önceden tasarlanmış plaka modelleri görülmektedir.



Şekil 2.19. Bilyalı değirmenlerde kullanılan bazı plaka modelleri [38]

2.5. DEĞİRMEN PLAKA OPTİMİZASYONU

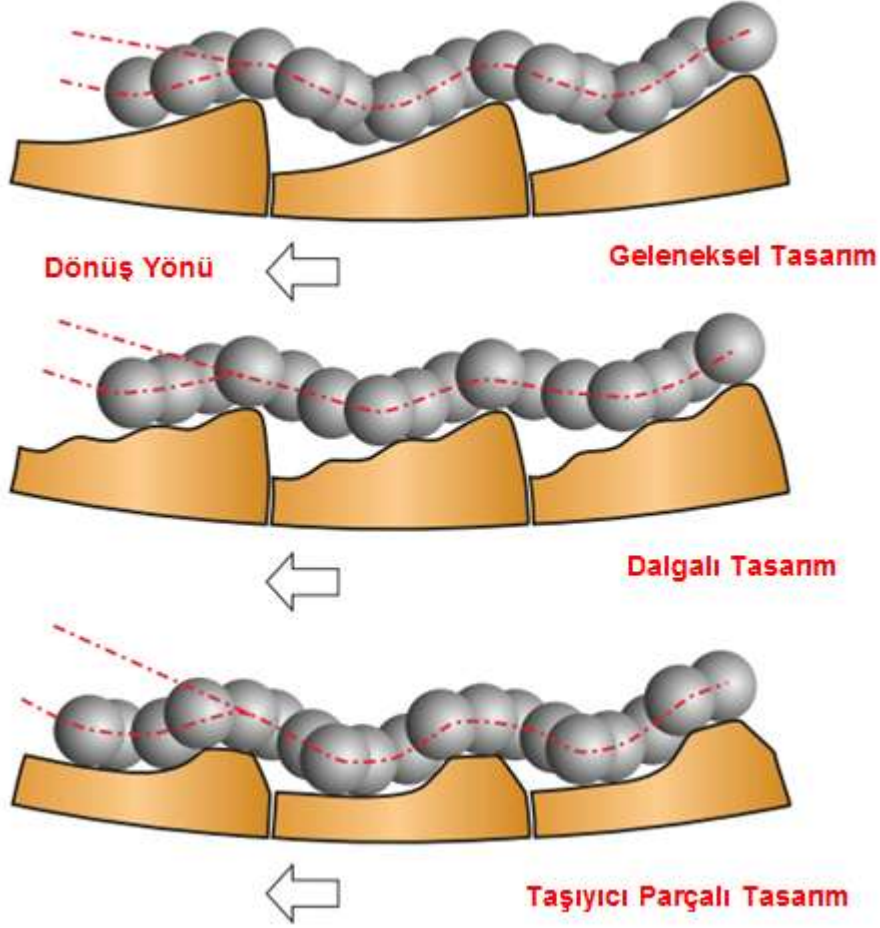
Hem iyi değirmen plakası ömrü, hem de iyi bir değirmen performansı elde etmek iyi bir plaka tasarımı ile elde edilebilir. Plaka tasarımına yardımcı olacak belirli uygulamalar mevcuttur. Bunlar değirmene uygun bir optimize yöntem ile uygulanabilir. Bunun, plaka ömründe iyileştirme, duruş süresini kısaltma, plaka maliyetini azaltma gibi önemli faydaları olabilir. Değirmen çalışma sistemi ile plaka tasarımı tam olarak

anlaşırsa, değirmenin optimum düzeyde çalışması sağlanabilir. Plakaların dizilimlerinin ayarlanmasının prosese birçok olumlu etkisi vardır.

Uygun olmayan plaka tasarımı değirmen performansını ve plaka ömrünü kötü yönde etkiler. Bu durum işletmede düşük verimlilik ve yüksek maliyet oluşmasına yol açar. Değirmenin veriminin düşmesi gereğinden fazla enerji tüketimine ve değerli minerallerin geri kazanımının azalmasına neden olur. Değirmen plakalarında meydana gelen aşınmalar sonucu oluşan plaka maliyetleri, değirmenin uygun kapasitede kullanılamaması gibi durumlar nedeni ile işletmede sıkıntıya sebep olabilmektedir. Optimize edilmiş plaka tasarımı plaka ömürleri ve değirmen öğütme performansı açısından ekonomik dengeyi sağlayabilir ve böylece öğütme optimum değerler ile yapılabilir [39].

2.5.1. Değirmen Plaka Optimizasyonunun Değirmene Olan Etkileri

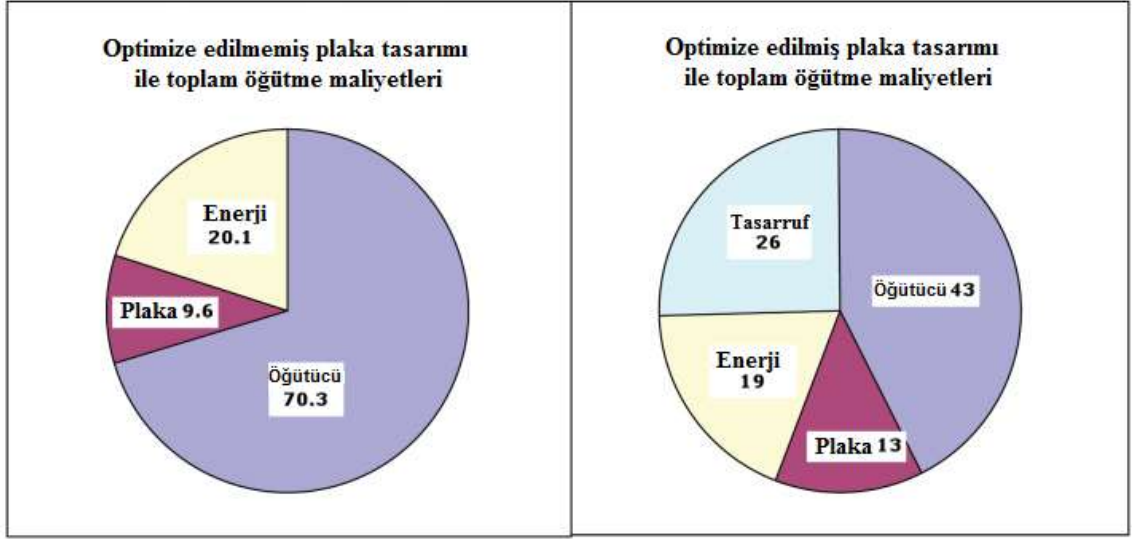
- Bilyaların en yükseğe çıkararak, en yüksek noktadan malzeme üzerine düşmesi ve böylece öğütmenin en iyi düzeyde olması.
- İnce öğütmenin verimli yapılabilmesi için “cascade” hareketini sağlamak.
- Değirmen gövdesini darbelere karşı korumak.
- Plaka tutucu çubuklarının koruması sayesinde plakaların ömürlerinin uzatılmasını sağlamak.
- Bilyaların değirmen gövdesine doğrudan çarpmasını engelleyerek, bilya kırılmasını önlemek
- Plaka tasarımında önemli bir faktör olan plaka taşıyıcı çubuklarının doğru boşlukta ve yükseklikte ayarlanması ile değirmen ömrünü uzatmak [40].



Şekil 2.20. Plaka tasarımına göre bilyaların hareket yörüngeleri [33]

2.5.2. Değirmen Plaka Optimizasyonu ile İlgili Maliyet Analizi

Aşağıdaki şekilde optimize edilmiş ve optimize edilmemiş plaka tasarımlarının toplam öğütme maliyetlerine olan etkileri ile ilgili bilgiler verilmiştir.



Şekil 2.21. Optimize edilmiş ve optimize edilmemiş plakalar için maliyet grafiği [41]

Şekil 2.21. ve Çizelge 2.1.'de optimize edilmiş plaka tasarımı ile optimize edilmemiş plaka tasarımı arasındaki farklılıkları ve bunların toplam öğütme maliyeti üzerindeki etkilerini göstermektedir. Sunulan hipoteze göre; tasarımı optimize edilmiş değirmen plakalarının maliyeti, tasarımı optimize edilmemiş değirmen plakalarının maliyetine göre % 35 fazladır. Fakat optimizasyon ile birlikte enerji maliyetindeki % 6 ve öğütücü maliyetindeki %39 azalmadan dolayı, toplam öğütme maliyetinde % 25 tasarruf edildiği görülmektedir. Bu optimizasyon verimsiz öğütme çemberinin oluşmasına izin vermez. Böylece bilyalar doğrudan plaka üzerine çarparak kırılmaz dolayısıyla öğütücü maliyetinde önemli bir azalma sağlanabilir [41].

Çizelge 2.1. Optimize edilmiş ve optimize edilmemiş plakalar için maliyet tablosu [41]

	Optimize Edilmemiş Plaka	Optimize Edilmiş Plaka	Maliyet Farkı
Ekipman	70	43	- % 39
Plaka	10	13	+ % 35
Enerji	20	19	- % 6
Toplam	100	75	- % 25

2.5.3. Değirmen Plaka Tasarımına Etki Eden Faktörler

Optimal plaka tasarımı için etkili olan temel faktörler şöyledir:

- Değirmen hızı
- Bilya dolum oranı
- Taşıyıcı plaka yüksekliği
- Taşıyıcı plaka açısı

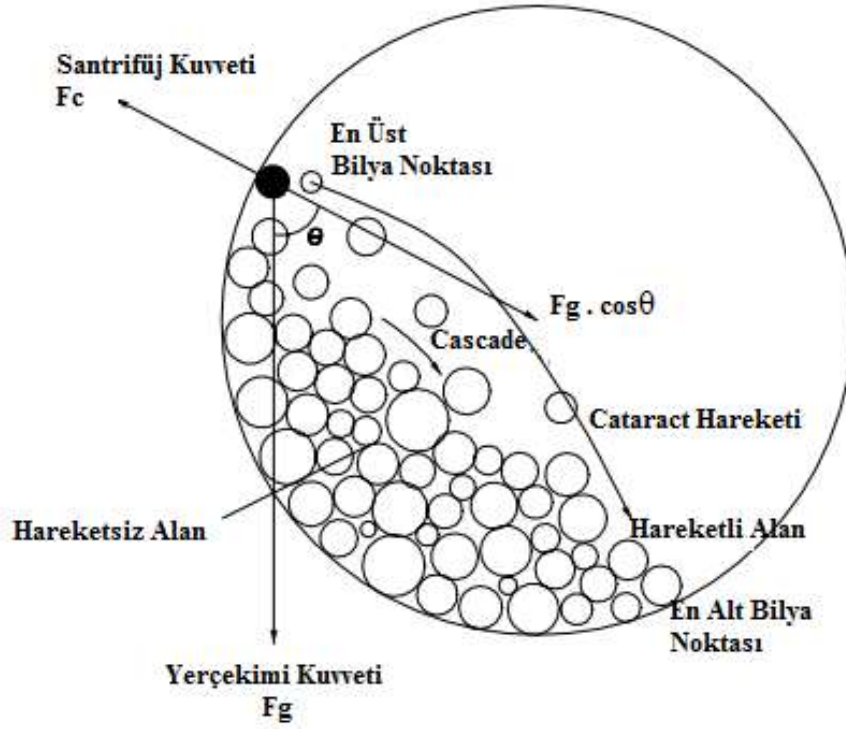
2.5.3.1. Değirmen hızı

Değirmen dönüş hızı değirmen işletmesindeki en önemli kavramlardan biridir. Kaskade ve katarakt hareketlerinin sağlanmasındaki ana rolü değirmen dönüş hızı sağlamaktadır. Bununla birlikte dönüş hızındaki kavramsal hatalar ise değirmen astar plakalarının tasarımı ile ancak kısmen giderilebilir.

Değirmen içerisindeki bir bilyanın hareketi pratikte çok karmaşık olup dönüş esnasındaki yolu hesaplamak imkansızdır. Bununla birlikte değirmen içerisindeki dinamik koşullar için değerli bilgiler veren “Ayrık Elemanlar Yöntemi” sayesinde değirmen içerisindeki genel hareketinin simülasyonunu yapmak olanaklıdır.

Değirmenler genellikle kritik hızlarının %65 - %82 arası bir değerde çalıştırılırlar. Bazı durumlarda kritik hızlarının %90 değeri ile de çalıştırılabilirler [42].

Bir değirmenin bilya hareketini tanımlamakta kullanılan bazı kavramlar ve terimler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Değirmen içerisindeki bilya hareketleri

Kütle üzerindeki değirmen gövdesine karşı olan kuvvet santrifüj kuvvet olarak tanımlanırsa;

$$F_c = m_p \cdot \omega^2 \cdot D_m / 2 \quad (2.6.)$$

Burada;

ω : Açısal Hız

m_p : Çalışılan Bilyanın Kütlesi

D_m : Değirmenin Plaka İç Kısmından Ölçülen Çapı

olarak verilir.

Yerçekimi kuvveti;

$$F_g = m_p \cdot g \quad (2.7)$$

Eğer bu iki kuvvet de birbirine eşit ise bilya değirmen gövdesine yapışık halde dengede duracaktır. Şekildeki θ açısı göz önüne alınır;

$$F_c = F_g \cdot \cos\theta \quad (2.8.)$$

Buradan;

$$\cos\theta = F_c / F_g \quad (2.9.)$$

Değirmenin kritik hızı (ω_c), bir bilyanın değirmenin tam tur hareketinde askıda kalmasını sağlayan hız olarak tanımlanır. En üst noktada θ açısının 0 olacağı göz önüne alınır;

$$F_c = F_g \quad (2.10.)$$

$$m_p \cdot (\omega_c^2 \cdot D_m) / 2 = m_p \cdot g \quad (2.11.)$$

$$\omega_c = (2 \cdot g / D_m)^{1/2} \quad (2.12.)$$

Değirmen kritik devri (N_c) saniyedeki tur sayısı ile hesaplanacak olursa;

$$N_c = \omega_c / 2\pi = (1 / 2 \cdot \pi)(2 \cdot g / D_m)^{1/2} = (2 \cdot 9,81)^{1/2} / 2 \cdot \pi \cdot D_m^{1/2} \quad (2.13.)$$

$$N_c = 0,705 / D_m^{1/2} \text{ devir / saniye} \quad (2.14.)$$

$$N_c = 42,3 / D_m^{1/2} \text{ devir / dakika} \quad (2.15.)$$

2.5.3.2. Bilya dolum oranı

Bilyalı değirmenlerde bilya boyutunun enerji tüketimi ve öğütme verimliliğine etkisi çok fazladır. Bilyanın ürünü öğütülebilmesi için ürün boyutundan daha büyük boyutta olması gerekmektedir. Bu yüzden en büyük ürün boyutu en büyük bilya çapını belirlemek için kullanılır. Aynı şekilde en küçük ürün boyutu en küçük bilya çapını belirlemek için kullanılır. Her bir ürün boyutu için optimum bir bilya çapı vardır.

Optimum bilya boyutundan daha büyük olan veya daha küçük olan bilyalar öğütme kapasitesini düşürdüğü gibi buna bağlı olarak aynı zamanda değirmenin daha yüksek enerji tüketmesine neden olmaktadır.

Özgül kırılma hızı değerleri doğrudan değirmenin malzemeyi kırma kabiliyetine indekslidir. Bununla birlikte yapılacak testler malzeme dolum oranının (f_c) değişimiyle değerlendirilecekse, işleme tabi tutulan malzeme miktarının bilinmesi yararlı olacaktır. Böylece mutlak kırılma hızının S_iW veya $S_i f_c$ ile mukayese edilmesi mümkün olacaktır. (f_c)'nin birim zamanda ve birim değirmen hacminde kırılan malzemenin hacmi olarak tanımlanmasının fiziksel bir anlamı vardır. Değirmene az malzeme doldurulması, düşük kırılma hızı verir. Malzeme miktarının artırılmasıyla bilyalar arasında çarpışma boşlukları doldurur ve yüksek kırılma hızı elde edilir. Bütün etkin boşluklar doldurulduğu zaman maksimum kırılma hızına ulaşır. Daha fazla malzeme ilavesi çarpışma alanının doyması ve fazla malzemenin depo olarak değirmene girmesinden dolayı kırılma hızının azalmasına neden olur. Aşırı malzeme doldurulması malzemenin yastıklanma yapmasına ve çarpışmasının azalmasına sebep olur. Bu nedenle kırılma hızı azalır [43].

Geleneksel bilya boyutu seçimi, kullanılması gereken en büyük bilya boyutunu hesaplanmasını sağlayan Bond eşitliğine dayanmaktadır. Seçimi sağlayan parametreler: besleme boyu, değirmen tipi, özgül ağırlık, iş indeksi, kritik hız ve değirmen çapıdır. En büyük boyuttan itibaren, bilya boyutlarının dağılımı ampirik formülün kullanımı ile

tanımlanabilir. Bu yaklaşım yaygın bir endüstriyel yaklaşım olarak kabul edilmiştir ve bu nedenle geçerliliğini yıllardır kaybetmemiştir.

Maksimum bilya çapı hesabında kullanılan farklı modeller mevcuttur. Fakat bu konuda tasarımcıların büyük bir bölümü en kabul gören yöntem olan Bond modeli ile maksimum bilya çaplarını hesaplamaktadır.

Bond Modeli'nde maksimum bilya çapı formülü aşağıdaki gibidir.

$$D_{max} = 20,17 \cdot (D_{20} / K)^{1/2} \cdot 3 \cdot [W_i \phi / N_c (D_u)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.16.)$$

D_{max} : Maksimum bilya çapı

D_{20} : Öğütülecek malzemenin %80'inin geçtiği elek çapı (μ)

K : Açık veya kapalı devre sistemler için sabit değer ($K = 350$)

W_i : Bond Öğütme İndeksi (kwh/ton)

N_c : Kritik devir

D_u : Değirmen etkin çapı (m)

ϕ : Malzeme özgül ağırlığı

Bilya miktarının belirlenmesinde ise aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$Q = (\pi \cdot D_u^2 / 4) \cdot L \cdot d \cdot V_p \quad (2.17)$$

Q : Bilya miktarı

L : Değirmen uzunluğu

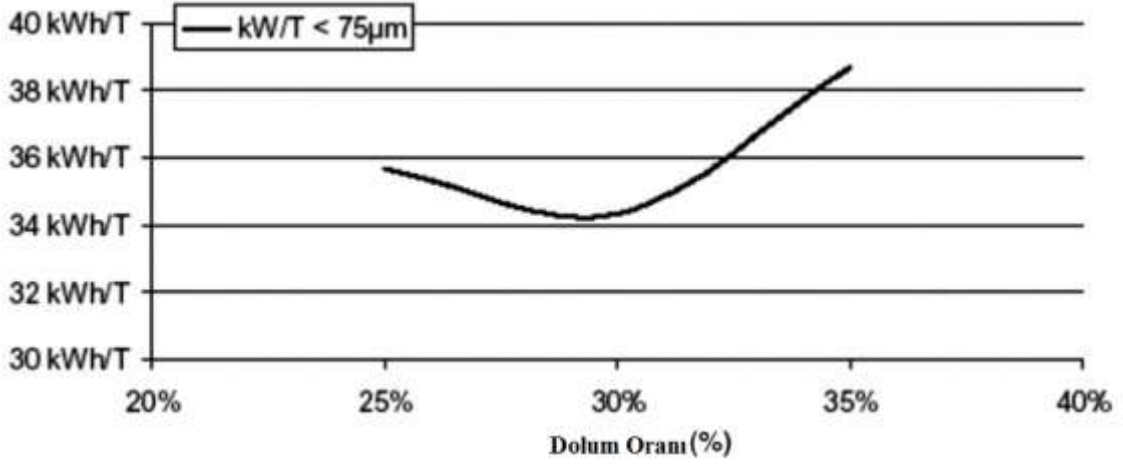
d : Bilya yığın yoğunluğu

V_p : Hacimsel şarj oranı

Değirmen bilya doluluk oranı değirmen çalışması için çok önemli bir kriter olup, öğütme boyutuna, enerji tüketimine, plaka aşınması gibi bir çok duruma doğrudan etkisi

vardır. Değirmen prosesine göre optimum bir dolum oranı vardır. Örnek olarak %25 bilya dolum oranıyla çalışan bir değirmenin bilya dolum oranı %30' çıktığı zaman daha ince öğütülmüş ürün elde edebiliriz [44]. Fakat bu oranı %35'e çıkardığımızda daha da ince bir ürün elde edilebilir bir sonuca varmak doğru değildir. Bu durum sadece daha fazla enerji tüketilmesine neden olacaktır.

Çizelge 2.2. 75µm öğütülmüş ürün elde etmek için kullanılan örnek enerji tablosu [44]



2.5.3.3. Taşıyıcı plaka yüksekliği ve açısı

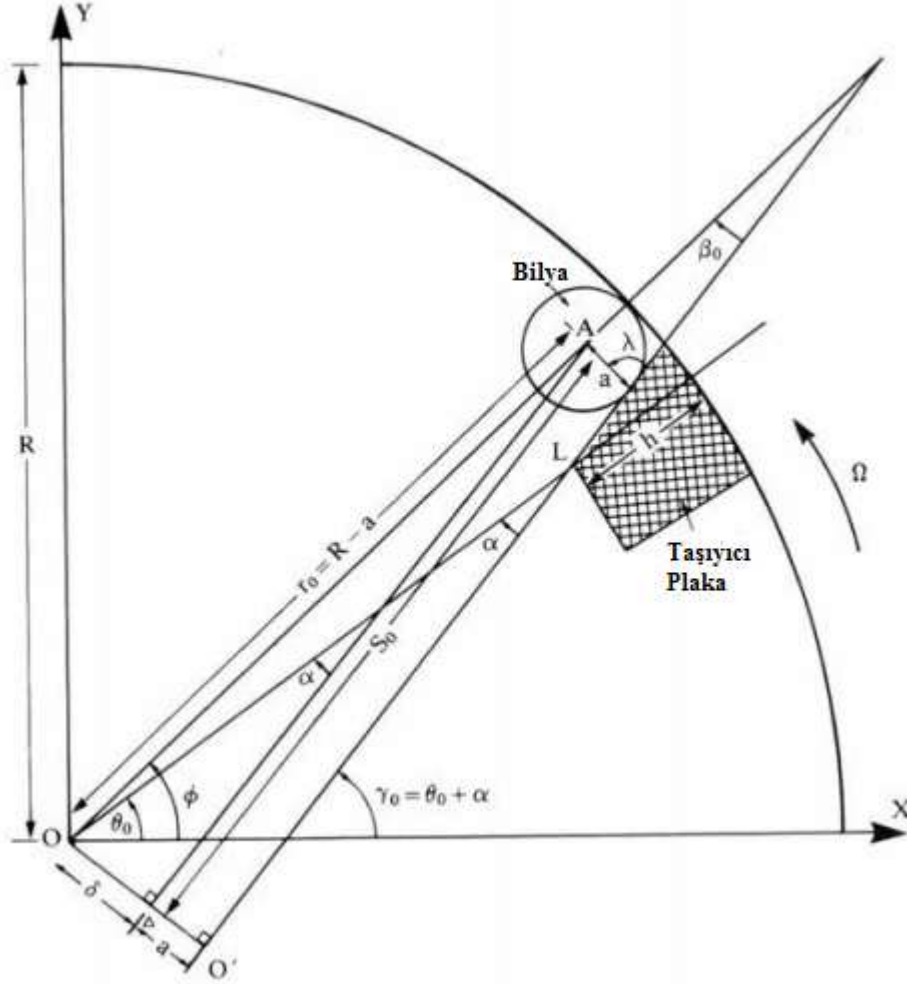
Taşıyıcı plaka yüksekliği ve açısı birbirleri ile bağlantılı oldukları için birlikte incelenecektir. Taşıyıcı plaka yüksekliği ve açısı tek bir bilya referans alınarak teorik olarak incelenebilir. Bilyanın taşıyıcı plaka üzerinde değirmen gövdesine yapışık durumda dengede durduğu bir denge göz önüne alınacak olursa, bu durumda bilya üzerine etkiyen yüklerin toplamının sıfır olması gerekmektedir.

Denge noktası

Aşağıdaki Şekil 2.23. ve Şekil 2.24. de görüldüğü gibi kuvvetler;

- Yerçekimi kuvveti aşağı yönde etki etmektedir. ($m \cdot g$)
- Dönme kuvveti değirmen gövdesine doğru etki etmektedir. ($m \cdot \Omega^2 \cdot r$)

- Taşıyıcı plakanın normal kuvveti (N)
- Bilya ve taşıyıcı plaka arasındaki değirmene doğru olan sürtünme kuvveti etki etmektedir. (f)



Şekil 2.23. Değirmen içerisinde taşıyıcı plaka üzerinde bulunan bilya

Açısal semboller

α : Taşıyıcı plaka uç kısmından geçen radyal çizgi ile taşıyıcı plaka yüzeyi arasındaki açı.

β : Bilya radyal vektörü ile taşıyıcı plaka yüzeyi arasındaki açı.

γ : $s \vec{}$ ve x eksenindeki karşılıklı açı.

ϕ : $r \vec{}$ ve y eksenindeki karşılıklı açı.

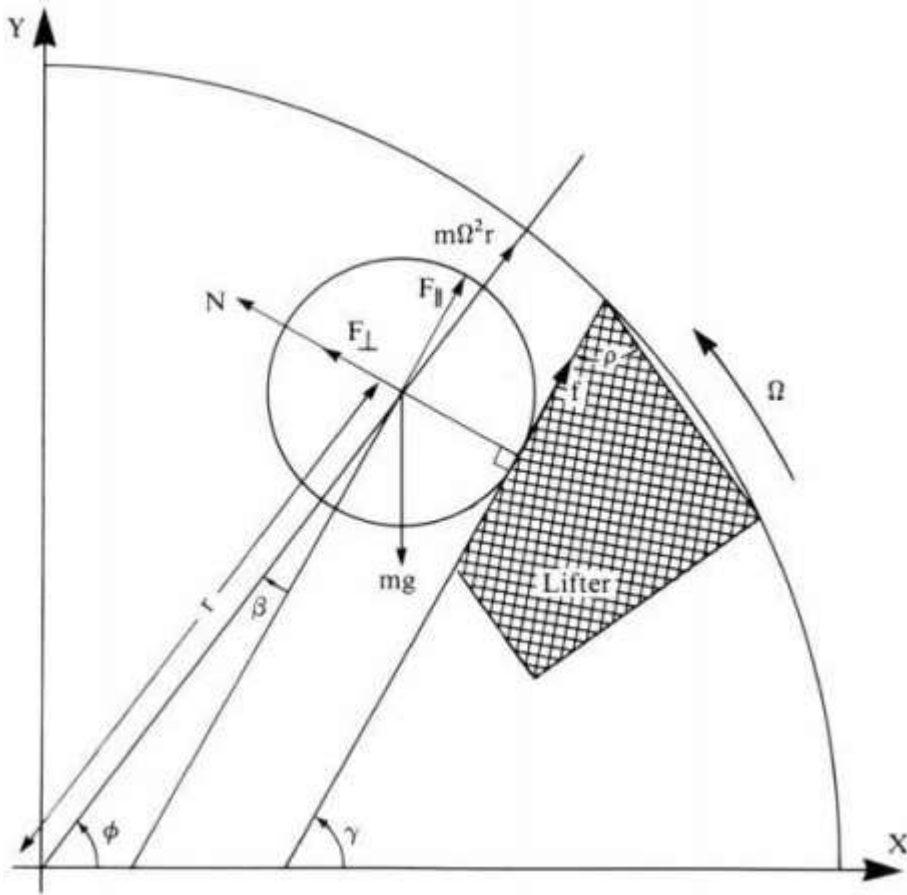
ρ : Taşıyıcı plaka yüzeyi ve tabanı arasındaki açı.

σ : Bilya yatay hız vektörüne doğru olan açı.

θ : Merkezdeki taşıyıcı plaka ucu ile x eksenindeki karşılıklı açı.

λ : Bilyanın taşıyıcı plakaya değme noktasında bilya merkezi ile taşıyıcı plaka tabanı arasındaki karşılıklı açı.

κ : $\arctan \mu_s$ 'ye eşit olan sürtünme açısı



Şekil 2.24. Taşıyıcı plaka ile temas halindeki bilya üzerine etkiyen kuvvetler

Genel semboller

a: Bilya çapı.

α : Bilyanın açısal ivmesi.

δ : $\sin\alpha(R-h)-a = a$ sabiti.

f: Taşıyıcı plaka yüzeyi ile bilya arasındaki sürtünme kuvveti.

F: Bilya üzerindeki nihai kuvvet.

g: Yerçekimi kuvveti ($9,8 \text{ ms}^{-2}$).

h: Taşıyıcı plaka yüksekliği.

I: Atalet momenti.

m: Bilya kütlesi.

N: Taşıyıcı plaka üzerinden bilyaya etkiyen normal kuvvet.

R: Değirmen etkin çapı.

r: Değirmen çapı ile bilya çapı arasındaki mesafe.

\vec{r} : Değirmen merkezinden bilya merkezine yönelen vektör.

s: $s \cdot \cos\beta$.

\vec{s} : Taşıyıcı plaka yüzeyine paralel uç kısımdan sona yönelen vektör.

\dot{s} : Taşıyıcı plaka yüzeyi boyunca bilyanın doğrusal hızı.

\ddot{s} : Taşıyıcı plaka yüzeyi boyunca bilyanın doğrusal ivmesi.

t: zaman.

τ : Kayma zamanı.

Γ : Tork.

μ_s : Bilya ve taşıyıcı plaka arasındaki statik sürtünme katsayısı.

μ_k : Bilya ve taşıyıcı plaka arasındaki kinetik sürtünme katsayısı.

v: Kartezyen koordinat sisteminde bilyanın hızı.

Ω : Değirmenin açısal hızı.

x: Kartezyen koordinat sisteminde bilyanın yatay merkezi.

y: Kartezyen koordinat sisteminde bilyanın dikey merkezi.

\perp : Diklik işareti.

\parallel : Paralellik işareti.

Alt simgeler

0: eşitlik noktası

L: Taşıyıcı plaka uç noktası

cm: Bilya kütle merkezi

m: maksimum

I: Dönüşten kaymaya geçen nokta

ρ : Taşıyıcı plaka yüzeyi ile bilya temas noktası

x: x eksen yönü

y: y eksen yönü

E: Bilyanın değirmen plakası çarptığı nokta

r: Radyal bileşen

Denge noktasındaki taşıyıcı plaka yüzeyine paralel kuvvetler:

$$m \cdot \Omega^2 \cdot r_0 \cdot \cos\beta_0 + \mu_s \cdot N - mg \cdot \sin\gamma_0 = 0 \quad (2.18)$$

Denge noktasındaki taşıyıcı plaka yüzeyine dik kuvvetler:

$$N - m \cdot g \cdot \cos\gamma_0 - m \cdot \Omega^2 \cdot r_0 \cdot \sin\beta_0 = 0 \quad (2.19)$$

N (2.18.) numaralı formülde yerine konulup ve m'ye bölünürse:

$$\sin\gamma_0 - \mu_s \cdot \cos\gamma_0 = (\Omega^2 \cdot r_0 / g) \cdot (\cos\beta_0 + \mu_s \cdot \sin\beta_0) \quad (2.20)$$

μ_s yerine κ konulup, denklem $\cos\kappa$ ile genişletilirse:

$$\begin{aligned} \sin\gamma_0 \cdot \cos\kappa - \cos\gamma_0 \cdot \sin\kappa &= (\Omega^2 \cdot r_0 / g) \cdot (\cos\beta_0 \cdot \cos\kappa + \sin\beta_0 \cdot \sin\kappa) \\ \sin(\gamma_0 - \kappa) &= (\Omega^2 \cdot r_0 / g) \cdot \cos(\beta_0 - \kappa) \\ \gamma_0 &= \kappa + \arcsin[(\Omega^2 r_0 / g) \cdot \cos(\beta_0 - \kappa)] \end{aligned} \quad (2.21)$$

Denge durumunda taşıyıcı plaka yüzeyine paralel ve dış tarafa doğru olan vektör $s \rightarrow$ için:

$$s_0 = r_0 \cdot \cos\beta_0 \quad (2.22.)$$

$$\beta_0 = \arcsin(\delta / r_0) \quad (2.23.)$$

$\delta = (R - h) \cdot \sin\alpha - a = \text{sabittir.}$ (2.21.), (2.22.) ve (2.23.) numaralı denklemler ile dengedeki bilyanın pozisyonu tamamen açıklanabilir.

Taşıyıcı plaka yüksekliğinin bilya çapından daha küçük olduğu durumlarda, açı λ , 90° 'den büyük olur. Bu durum N'nin sin ve cos fonksiyonlarını içeren (2.18.) ve (2.19.) numaralı denklemler için eklenti yapılması anlamına gelmektedir.

$$\gamma_0 = \kappa - \lambda + \arcsin[(-\Omega^2 \cdot r_0 / g) \cdot \cos(\lambda + \beta_0 - \kappa)] \quad (2.24.)$$

İncelenen konuda bilya dengede ve taşıyıcı plaka ucunda olup bu hareketin hemen sonrasında plakadan uçarak değirmen içerisine düşecektir. Bilya taşıyıcı plakasının en uç kısmındayken, uzunluk s_L ve açı β_L Şekil 2.24'de görüldüğü gibidir ve $s_L = \overline{LO'}$, buradan:

$$s_L = (R - h) \cdot \cos\alpha \quad (2.25.)$$

$$\beta_L = \arctan(\delta / s_L) \quad (2.26.)$$

Denge noktası ile taşıyıcı plakasının en uç noktası arasında bilya yuvarlanarak ve kayarak plakadan düşer. Fakat N kuvveti sonlandığında, bu denge noktasından bir serbest düşme hareketi değildir. Bilya taşıyıcı plaka ile etkileşmektedir. Bilyanın hala taşıyıcı plaka ile temas ettiği göz önüne alınıp, taşıyıcı plaka açısı tamamen dik olduğu varsayılacak olursa, yani $\gamma = 90^\circ$ olursa; bilya taşıyıcı plakadan N'nin sıfır olacağı durumda düşecektir.

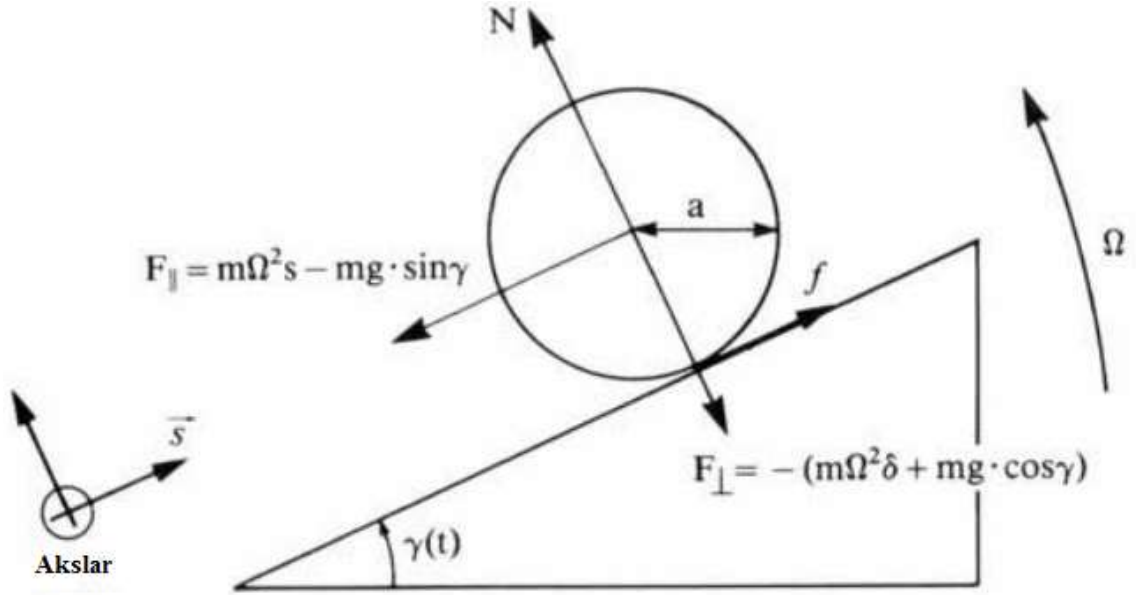
$$m \cdot \Omega^2 \cdot r \cdot \sin\beta + m \cdot g \cdot \cos\gamma = 0$$

$$g \cdot \cos\gamma + \Omega^2 \cdot \delta = 0 \quad (2.27.)$$

Bu hesaplamalar N değerinin pozitif olduğu, bilyanın taşıyıcı plaka ile temas halinde, plakanın ucuna gelene kadar her noktasında yapılmalıdır. Eğer statik sürtünme katsayısının sıfırdan büyük olacağı düşünülürse; bilya, f 'in Şekil 2.25.'de görülen torka maruz kalana kadar başlangıçtan itibaren dönerek ilerler. Burada; $f \leq \mu_s N$ olur.

Taşıyıcı plaka yüzeyinden dönerek aşağı hareket

Eğer bir küre eğimli bir yüzeyden aşağıya doğru inerken, bunun sabit bir açısal hız ile gerçekleştiği düşünülebilir. Bu durumda bu küreye etkiyen kuvvetler Şekil 2.25. kullanılarak aşağıdaki formüller ile hesaplanabilir.



Şekil 2.25. Açısı değişken bir eğimli yüzey üzerinde hareket eden bilyaya etkiyen kuvvetler

$$\text{Eğime etkiyen normal kuvvet: } N - m \cdot g \cdot \cos\gamma - m \cdot \Omega^2 \cdot \delta = 0 \quad (2.28.)$$

$$\text{Eğim yüzeyine etkiyen kuvvet: } m \cdot \Omega^2 \cdot s - m \cdot g \cdot \sin\gamma + f = m\dot{s} \quad (2.29.)$$

$$\text{Kütle merkezi torku : } \Gamma_{\text{cm}} = I_{\text{cm}}\alpha \quad (2.30.)$$

$\gamma = \gamma_0 + \Omega t$ olduğu bilindiğine göre bilya merkezinden etki eden tek kuvvetin sürtünme kuvveti olduğu kabul edilebilir. Böylece,

$$f \cdot a = I_{\text{cm}} \cdot \alpha \quad (2.31.)$$

olarak formülize edilebilir. Bu formül bir küre için işlem yapacak olursa aşağıdaki şekilde biçimlenir.

$$I_{\text{cm}} = 2 / 5 \cdot m \cdot a^2 \quad (2.32.)$$

Bilyanın kaymadığı durumda açısal ivme doğrudan lineer ivme ile orantılıdır.

$$\alpha = - \hat{s} / a \quad (2.33.)$$

Pozitif değerli bir α için negatif \hat{s} olduğu düşünülürse, aksların oryantasyonunun bir sonucu olarak;

$$f = - 2 \cdot m \cdot \hat{s} / 5 \quad (2.34.)$$

eşitliği ortaya çıkar. Bu değer (2.29.) numaralı denklemde yerine konulursa;

$$\hat{s} - 5 / 7 \Omega^2 s = - 5 / 7 g \cdot \sin\gamma \quad (2.35.)$$

denklemini elde edilir. İkinci dereceden çok bilinmeyenli bu denklemin çözümü için sınır koşullarının $s(0) = s_0$ ve bilyanın dönmeye başlamadan önceki durumdaki $\dot{s}_{t=0} = 0$ olarak belirlenirse bu değerler için şu denklemler elde edilir:

$$s(t) = [s_0 - (5g / 12 \cdot \Omega^2) \cdot \sin\gamma_0] \cdot [\cosh.(5/7)^{1/2} \cdot \Omega \cdot t]$$

$$- [(35^{1/2} \cdot g / 12 \cdot \Omega^2) \cdot \sinh \cdot (5/7)^{1/2} \Omega \cdot t] + [(5 \cdot g / 12 \cdot \Omega^2) \cdot \sin\gamma] \quad (2.36.)$$

$$\begin{aligned} \dot{s} = & (5/7)^{1/2} \cdot \Omega \cdot [s_0 - (5 \cdot g / 12 \cdot \Omega^2) \cdot \sin\gamma_0] \cdot \sinh \cdot (5/7)^{1/2} \Omega \cdot t \\ & - (5 \cdot g / 12 \cdot \Omega) \cdot [\cos\gamma_0 \cdot \cosh \cdot (5/7)^{1/2} \Omega \cdot t - \cos\gamma] \end{aligned} \quad (2.37.)$$

Bu denklemler taşıyıcı plaka üzerinde sadece dönme hareketi yapan bilyanın pozisyonunu ve hızını tanımlar.

Bilyanın taşıyıcı plaka üzerinde sadece dönüş yapmasına müsaade eden maksimum açı

Sürtünme kuvveti ile orantılı olan statik sürtünme katsayısı ve değirmen parametreleri için dönmenin oluştuğu maksimum bir açı (γ_m) vardır. Bu açıdan daha büyük bir açı oluştuğu zaman lineer ivme çok yüksek olacaktır. Bu da bilyanın plaka yüzeyi üzerinde tutunmasını engelleyecek ve bilya kaymaya başlayacaktır. Bu teorik maksimum açığı hesaplayabilmek için bilya üzerindeki kuvvetleri tanımlayan eşitlikler kullanılmalıdır. Şöyle ki; (2.35.) numaralı denklem (2.33.) numaralı denklemde yerine konulursa;

$$f = 2 \cdot m / 7 (g \cdot \sin\gamma - \Omega^2 \cdot s) \quad (2.38)$$

$f \leq \mu_s N$ olduğu bilinmektedir. (2.28.) ve (2.38.) numaralı denklemler bu eşitsizlikte yerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sin\gamma_m - (7/2) \cdot \mu_s \cdot \cos\gamma_m \leq (\Omega^2 / g) \cdot (7/2 \cdot \delta \cdot \mu_s + s) \quad (2.39.)$$

Burada $s = s(t)$ olduğu zaman denklem sayısal olarak çözülebilir. (2.39.) numaralı denklemin çözümünde limit pozisyonu esnasında $s = s_L$ olacak şekilde düşünülür. Aynı durum (2.36.) numaralı denklemin sayısal çözümü için de geçerlidir. Bununla birlikte limit noktasındaki açı ile sadece dönüş hareketini terk ettiği noktadaki

açı arasında $\gamma_L > \gamma_m$ şeklinde bir açı olduğu düşünülürse, bilyanın sadece dönme hareketini bırakıp, dönme ve kayma hareketini yapmaya başladığı bir nokta olduğu bilinebilir.

Bilyanın taşıyıcı plaka üzerinde sadece dönüş yapması hareketinden hem dönüş hem de kayma anına geçtiği an

(2.39.) ve (2.36.) numaralı denklemlerin γ_m ve $s(t)$ için birlikte çözülmesiyle sadece kaymanın limit noktasını verir. Denklem çözümü;

$$\begin{aligned} (7/12 \cdot \sin\gamma_m) - (7/2 \cdot \mu_s \cdot \cos\gamma_m) &\leq (7 \cdot \Omega^2 / 2 \cdot g) \cdot (\mu_s \cdot \delta) \\ + [(s_0 \cdot \Omega^2 / g) - (5 \cdot \sin\gamma_0 / 12)] \cdot \cosh \cdot (5/7)^{1/2} \cdot \Omega \cdot t_1 \\ - [5\sqrt{3} \cdot \cos\gamma_0 \cdot \sinh \cdot (5/7)^{1/2} \cdot \Omega \cdot t_1] / 12 \end{aligned} \quad (2.40.)$$

olarak tamamlanır. Burada t_1 dönme hareketinden kayma hareketine geçtiği zamanı belirtir. Sürekli artan t zamanının $t = t_1$ olduğunda denklemde eşitsizlik bozulur. (2.36.) ve (2.37.) numaralı denklemler kullanılarak bu geçiş noktasındaki bilyanın pozisyonu ve hızı hesaplanabilir.

Dönüş ve kayma hareketinin birlikte olduğu zaman

Bilya kaymaya başladığı andan itibaren kinetik sürtünme katsayısının artmasıyla birlikte hareket gecikir. Bilya dönme ve kayma hareketi daha sonra sürtünme kuvveti etkisinde lineer bir kayma hareketine dönüşecektir. Kütle merkezine etki eden bir torkun olması, kütle merkezinin halen açısal bir ivmesinin olduğu anlamına gelmektedir. Fakat kayma hareketi koşullarında bu açısal ivmeye bağımlı değildir. Sürtünme kuvvetine bağlı olarak bazı yerçekimsel enerjiler kaybolacak ve bilya kendi etrafında dönmekten, sadece kayma hareketi yapacak ve düz tabanlı bir madde gibi davranacaktır. Burada (2.31.) numaralı denklem kullanılacak olursa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} f \cdot a &= (2 / 5) \cdot m \cdot a^2 \cdot \alpha \\ f &= \mu_k \cdot N = \mu_k \cdot (m \cdot g \cdot \cos\gamma + m \cdot \Omega^2 \cdot \delta) \\ \alpha &= (5 \cdot \mu_k / 2 \cdot a) \cdot (g \cdot \cos\gamma + \Omega^2 \cdot \delta) \end{aligned} \quad (2.41.)$$

Kayma hareketi

Bilyanın sadece kayma hareketi başladığı zaman Şekil 2.25’de görülen taşıyıcı plaka yüzeyine etkiyen paralel ve dik kuvvetler aşağıdaki şekilde tanımlanır.

Plaka yüzeyine etkiyen paralel kuvvetlerin toplamı:

$$m \cdot \Omega^2 \cdot r \cdot \cos\beta + \mu_k \cdot N - m \cdot g \cdot \sin\gamma = m \cdot \hat{s} \quad (2.42.)$$

Plaka yüzeyine etkiyen dik kuvvetlerin toplamı:

$$N - m \cdot g \cdot \cos\gamma - m \cdot \Omega^2 \cdot r \cdot \sin\beta = 0 \quad (2.43.)$$

Lineer ivme, N’nin (2.43.) numaralı denklemde yerine konulmasıyla s ve δ terimleri cinsinden bulunabilir.

$$\hat{s} - \Omega^2 \cdot s = g \cdot (\mu_k \cdot \cos\gamma - \sin\gamma) + \Omega^2 \cdot \mu_k \cdot \delta \quad (2.44.)$$

Geçiş noktasında τ ile simgelenen yeni bir zamana başlamak uygun olacaktır.

τ = 0 anındaki limit koşulları şu şekildedir:

$$s(0) = s_1 \text{ ve } \hat{s}_\tau = \hat{s}_1$$

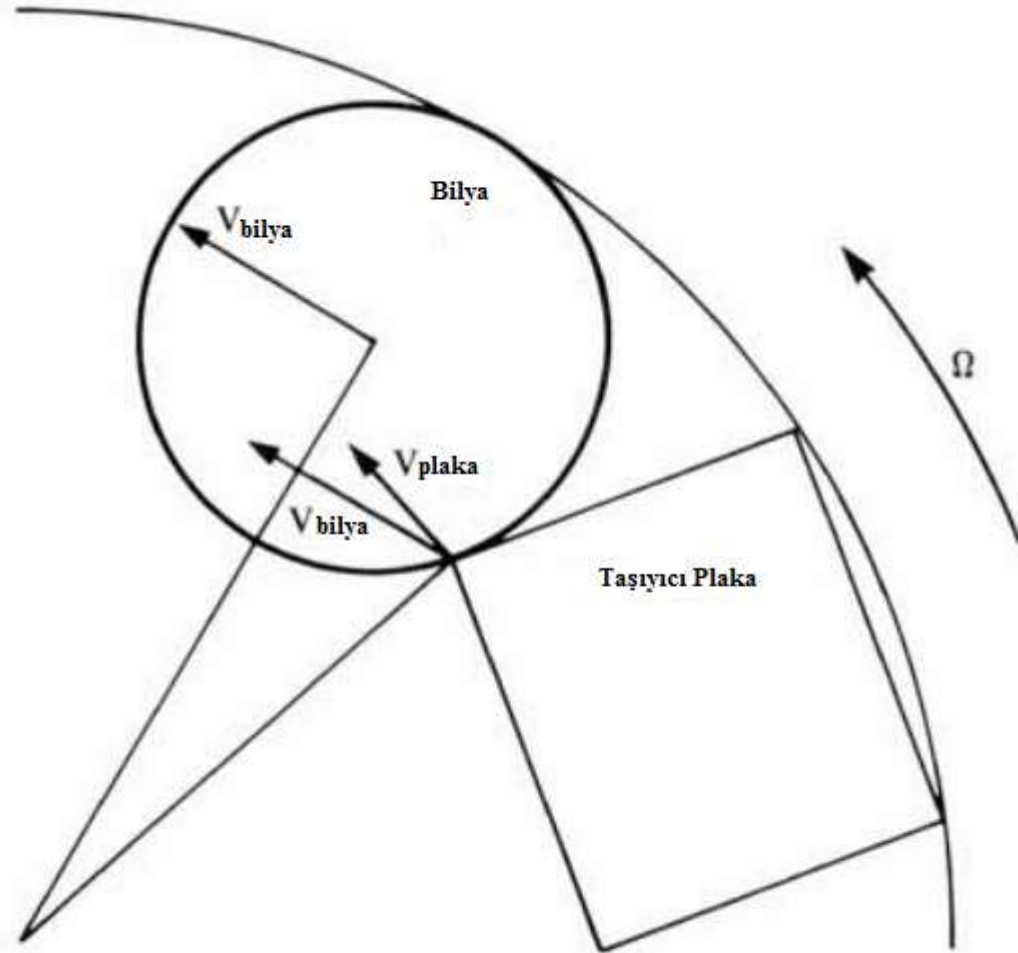
Bu diferansiyel denklemin çözümü limit koşulları için şu şekilde çözülür:

$$\begin{aligned} s(\tau) &= [s_1 + \mu_k \cdot \delta + (g / 2 \cdot \Omega^2)(\mu_k \cdot \cos\gamma_1 - \sin\gamma_1)] \cdot \cosh \cdot \Omega \cdot \tau \\ &+ [(\hat{s}_1 / \Omega) - (g / 2 \cdot \Omega^2) \cdot (\mu_k \cdot \sin\gamma_1 + \cos\gamma_1)] \sinh \cdot \Omega \cdot \tau \\ &- (g / 2 \cdot \Omega^2) \cdot [\mu_k \cdot \cos(\gamma_1 + \Omega \cdot \tau) - \sin(\gamma_1 + \Omega \cdot \tau)] - \mu_k \cdot \delta \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 = & [s_1 + \mu_k \cdot \delta + (g / 2 \cdot \Omega^2)(\mu_k \cdot \cos\gamma_1 - \sin\delta_1)] \cdot \sinh \cdot \Omega \cdot \tau \\ & + [\dot{s}_1 - (g / 2 \cdot \Omega)(\mu_k \cdot \sin\gamma_1 - \cos\gamma_1)] \cdot \cosh \cdot \Omega \cdot \tau \\ & - (g / 2 \cdot \Omega)[- \mu_k \cdot \sin(\gamma_1 + \Omega \cdot \tau) - \cos(\gamma_1 + \Omega \cdot \tau)] \end{aligned} \quad (2.46.)$$

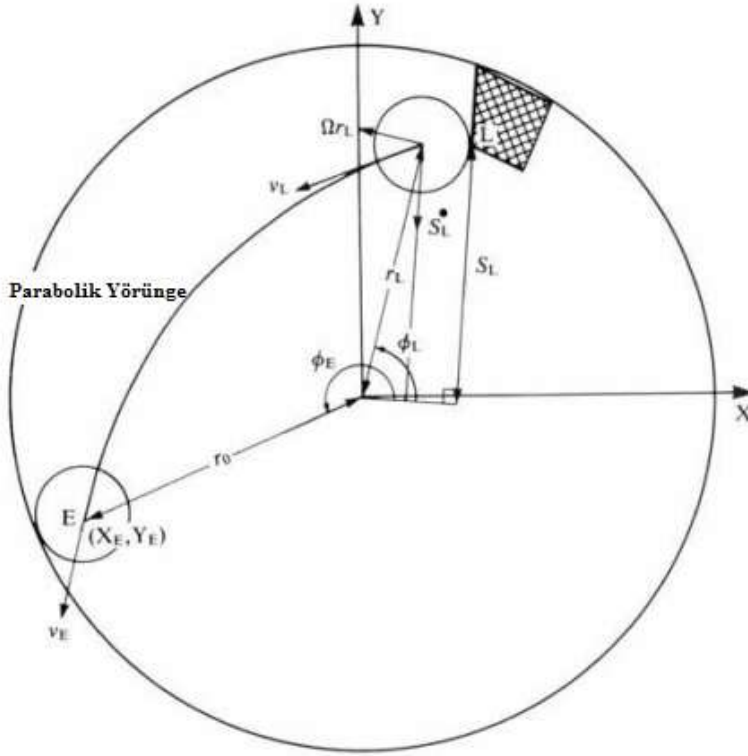
Serbest düşme yörüngesi

Bilya taşıyıcı plaka ucuna geldiği zaman eğer başka bir etkileşime maruz kalmıyorsa, serbest düşme hareketini gerçekleştirecektir. Şekil 2.26.'da bilyanın taşıyıcı plakanın ucunda temas halinden, serbest düşme anına geçişi görülmektedir.



Şekil 2.26. Bilyanın taşıyıcı plaka ucundan serbest düşüşe geçeceği andaki hız dağılımları

Bilya rijit bir cisim olduğu için bilyanın bütün parçaları bilya merkezindeki aynı hız ile hareket ederler, bu durum bilyanın plakanın ucundaki konumunda taşıyıcı plakadan kaynaklanan hızı ile kendinden kaynaklanan hızı farklıdır. Bilyanın radyal bir hızının olmadığı kabul edildiği ve plaka yüksekliğinin bilya çapına eşit veya daha küçük olduğu, bilya ile plaka ucunda bir hız farklılığı olmaktadır. Bu durum bilyanın plaka yüzeyinden kurtularak, düşme hareketi yapmasını sağlar. Eğer taşıyıcı plakanın ucu aşınmış ya da yuvarlanmışsa, taşıyıcı plakanın uç kısmı yuvarlanmanın başladığı nokta kabul edilir. Taşıyıcı plaka yüzeyinin aşınması veya yuvarlanması taşıma açısını düşürür. Bu durum bilyanın taşıyıcı plaka tarafından daha kısa süre taşınmasına neden olur. Eğer taşıyıcı plaka yüzeyi tabandan itibaren yuvarlanmış bir şekil alırsa, bilya plaka üzerinden hiç taşınmayacak ve denge noktasında serbest düşme hareketi yapacaktır. Serbest düşme hareketi Şekil 2.27.'de gösterilmiştir. Plakanın uç noktasında $s_L, s_L, \theta_L, \beta_L, \gamma_L$ değerleri bilindiğine göre bilyanın radyal koordinatları şu şekildedir.



Şekil 2.27. Bilyanın taşıyıcı plakadan ayrıldıktan sonraki parabolik düşme yörüngesi

$$(r_L; \phi_L) = (s_L / \cos\beta_L; \gamma_L - \beta_L) \quad (2.47.)$$

Böylece değirmen merkezini Kartezyen koordinat sisteminin orijin noktası olduğu kabul edilerek serbest düşme yörüngesi tanımlanabilir.

$$(x_L, y_L) = (r_L \cdot \cos\phi_L, r_L \cdot \sin\phi_L) \quad (2.48.)$$

\dot{s}_L bilyanın taşıyıcı plaka üzerindeki hızı olup, bu hıza değirmenin dönüşünden kaynaklanan hız da mutlaka eklenmelidir. Bu hız bileşeni teğetsel olup, Ωr_L olarak simgelenir.

$$(U_{xL}; U_{yL}) = (\dot{s}_L \cdot \cos\gamma_L - \Omega \cdot r_L \cdot \sin\phi_L; \dot{s}_L \cdot \sin\gamma_L + \Omega \cdot r_L \cdot \cos\phi_L) \quad (2.49.)$$

Net hız;

$$U_L = (U_{xL}^2 + U_{yL}^2)^{1/2} \quad (2.50.)$$

İzdüşümün yatay açısı;

$$\sigma_L = \arctan(U_{yL} / U_{xL}) \quad (2.51.)$$

Bilyanın serbest düşme hareketinde izlediği parabolik yol şu şekildedir:

$$x = x_L + U_{xL} \cdot t \quad (2.52.)$$

$$y = y_L + U_{yL} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (2.53.)$$

Bilyanın değirmen gövdesine çarptığı noktada, bilyanın yörünge üzerinde herhangi bir kütleli etkileşime maruz kalmadığı varsayılırsa;

$$x_E^2 + y_E^2 = r_0^2 \quad (2.54.)$$

Hız bileşenleri ise şu şekildedir:

$$(U_{xE}; U_{yE}) = (U_{xL}; U_{yL} - g \cdot t) \quad (2.55.)$$

Değirmen gövdesine vuruş hızı;

$$U_E = (U_{yE}^2 + U_{xE}^2)^{1/2} \quad (2.66.)$$

Yataydaki σ_E açısında;

$$\sigma_E = \arctan(U_{yE} / U_{xE}) \quad (2.67.)$$

Bilyanın düşüş zamanında yol aldığı yörünge ve değirmen gövdesine vuruş anındaki koşulları bu şekilde açıklanmış olur [45].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERYAL

3.1.1. Değirmen

Çalışmanın ana malzemesi olan değirmen, Soda Sanayi A.Ş. Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası Hammadde Ünitesi'nde bulunan kromit öğütme değirmenleri çalışma prensipleri açısından model olarak alınmıştır. Söz konusu model olarak alınan değirmen için etiket bilgileri şu şekildedir:

Üreticisi: Sojuzglavstromzagranpostavka (S.S.C.B.)
Üretim Tarihi: 05.1982
Sertifika No: 3601.00.000.1,2
Index: CMM205,1
Seri Numarası: 181,2
Motor Gücü: 500 kW
Motor Devri: 1000 devir/dakika
Redüktör Tahvil Oranı: 44,25
Redüktör Çıkış Devri: 22,6 devir/dakika
Etkin Çapı: 1.900 mm
Boy: 10.500 mm

Söz konusu değirmen göz önüne alınarak model olarak yapılan deneysel ölçekli değirmen için etiket değerleri:

Üreticisi: Kromsan Fabrikası Mekanik Bakım Onarım Şefliği
Üretim Tarihi: 04.2013
Motor Gücü: 4 kW
Motor Devri: 1445 devir/dakika
Redüktör Markası: Sew Eurodrive
Redüktör Modeli: SK873.1-112M/4
Redüktör Tahvil Oranı: 23,49
Redüktör Çıkış Devri: 62 devir/dakika
Etkin Çapı: 555 mm
Boy: 1.300 mm



Şekil 3.1. Deneysel ölçekli değirmen

Değirmen manto sacı olarak 5 mm kalınlığında St 37.2. karbon çelik sac kullanılmıştır. Bunun için 1.775 mm eninde ve 1.330 mm boyunda olan levha bükülerek etkin çapı 555 mm olan ve boy uzunluğu 1.330 mm olan bir değirmen gövdesi elde edilmiştir. Değirmen için St 37.2. malzemeden şase yapılmış olup değirmen bu şase üzerine yerleştirilmiştir. Değirmenin tahrik grubu değirmen giriş kısmına kafadan tahrikli bir sistem için gerekli olan mil montajı yapılmıştır. Ardından yukarıda etiket değerleri verilen redüktör ve motor montajı yapılmıştır. Çalışma esnasında incelenecek konulardan bir tanesinin de değirmen hızı olmasından dolayı motor için frekans ayarlayıcı cihaz montajı yapılmıştır. Bu sayede sistemi değişken hızlarda deneme imkanı doğmuştur.

3.1.2. Değirmen Astar Plakaları

Çalışma açısı ve yüksekliği üzerinde çalışma yapılacak olan değirmen astar plaka modeli seçilirken, çeşitli proseslerde çalışan bilyalı değirmenler incelenmiştir.

Bilyalı değirmenler prosesleri en çok çimento üretim tesislerinde kullanılmaktadır. Bu sebeple yurt içi ve yurt dışında üretimde olan çimento fabrikaları ile Soda Sanayi A.Ş. Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası değirmenleri göz önüne alınmıştır. Ayrıca bu çalışma esnasında Dünya’da bilyalı değirmenler üzerinde yaptıkları çalışmalar ile çok saygın bir konumda bulunan Magotteaux – Slegten firmasının Proses Kontrol Müdürü olan Sayın Bernard de Haas’ın da teknik onayı ile taşıyıcı parçalı plaka modelinin bu çalışma için en uygun plaka modeli olacağına karar verilmiştir. Bu plaka modeli sayesinde özellikle plaka açısı ve yüksekliği değişken olarak kullanılarak en verimli sonuçları elde etmek amaçlanmıştır.

İmalatı yapılan değirmen göz önüne alınarak seçilen plaka modeli değirmen için uygulanmıştır. Bu kapsamda değirmende her sırada çevrede 8 adet olmak üzere toplam 4 sıra plaka imalatı yapılmıştır. Değirmen için toplam 32 adet plaka imalatı yapılmış olup plaka malzemesinin kimyasal özellikleri Çizelge 3.1.’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Plaka malzemesinin kimyasal özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (1.4027)	
Cr	% 12,5 – 14,5
C	%0,16 – 0,23
Mn	Maks. % 1
Si	Maks. % 1
P	Maks. %0,045
S	Maks. %0,030
Ni	% 1 -2
Fe	Kalan

3.1.3. Bilya

Değirmende öğütücü olarak kullanılan bilya çapları 10-20 mm’dir. Bilyaların sertlikleri 55-65 HRC olup, bilya malzemesinin kimyasal özellikleri aşağıdaki çizelgede belirtildiği gibidir.

Çizelge 3.2. Bilya malzemesinin kimyasal özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	
Cr	% 12 - 14
C	Maks. %0,15
Mn	Maks. % 1
Si	Maks. % 1
P	Maks. %0,40
S	Maks. %0,30
Fe	Kalan



Şekil 3.2. Deneyler için kullanılan bilyalar

3.1.4. Kromit

Öğütülen malzeme olan kromit hammaddesi Güney Afrika Cumhuriyeti menşeli, %3-4 nem oranına sahip ve %48 Cr₂O₃ tenör içermektedir. Malzemenin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1. ve 3.2.'de görülmektedir.

Çizelge 3.3. Kromit malzemesinin kimyasal özellikleri

	Birim	Standart	Fiili
Cr ₂ O ₃	%	Min. 46	48,00
Fe ₂ O ₃	%	Maks. 20	17,10
Al ₂ O ₃	%	Maks. 12	9,8
MgO	%	Maks. 20	17,20
CaO	%	Maks. 3	0,40
SiO ₂	%	Maks. 8	5,10
Kızdırma Kaybı 1000 °C	%	Maks. 3	1,40

Çizelge 3.4. Kromit malzemesinin fiziksel özellikleri

	Birim	Standart	Fiili
Maks. Tane Boyutu	mm	2	4,00
Ürün Rutubeti	%	Maks. 4	3
Özgül Ağırlığı	t/m ³	4,50	4,55
Dökme Yoğunluğu	t/m ³	2,50	2,50
Öğütme Endeksi Bond Wi	kWh/t	9,5	9,7



Şekil 3.3. Deneysel ölçekte öğütülen malzeme olarak kullanılan kromit

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Deneysel Ölçekli Değirmen Astar Plakaları İmalatı

Yapılan çalışmada incelenen ana konulardan olan taşıyıcı plaka yüksekliği ve açısı hakkında uygun koşullar elde edebilmek için öncelikle plaka modeli belirlemek gerekmiştir. Model belirlemede Magotteaux – Slegten firması Proses Kontrol Müdürü olan Sayın Bernard de Haas'ın teknik görüşleri etken olmuştur. Magotteaux firması değirmen plaka tasarımı konusunda literatürde önemli çalışmaları olan Prof. Malcolm Powell'ın 20 yıllık çalışmaları sonucu ortaya çıkardığı Milltraj yazılımı sayesinde laboratuvar ölçekli değirmen plaka tasarımı konusunda çalışmaktadır. Bu departmanın başında bulunan Bernard de Haas tez çalışmasında taşıyıcı parçalı plaka modelinin deney için çok uygun bir seçenek olduğuna ayrıca fabrikada bulunan değirmene uygulanabilirlik açısından en uygun plaka modelinin olduğunu belirtmiştir. Böylece

bilyalı değirmenler prosesleri genelinde kullanılan taşıyıcı parçalı tip değirmen plaka modeli seçilerek imalatı yapılan deneysel bilyalı değirmene uyarlanmıştır.



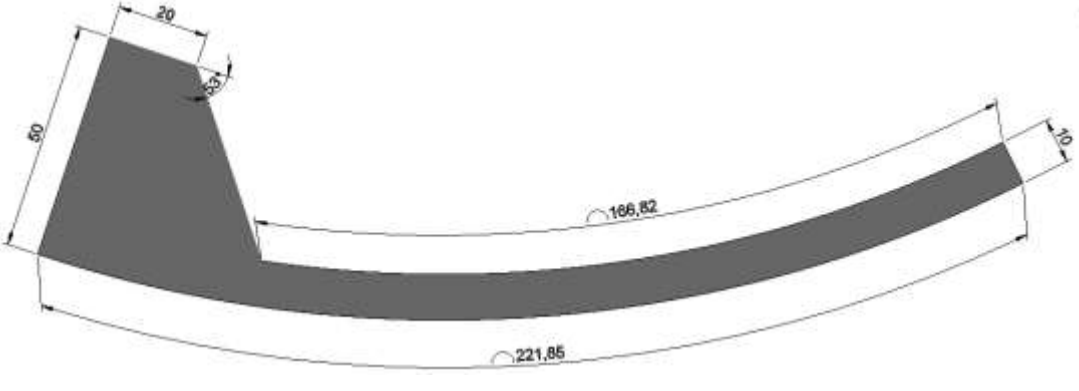
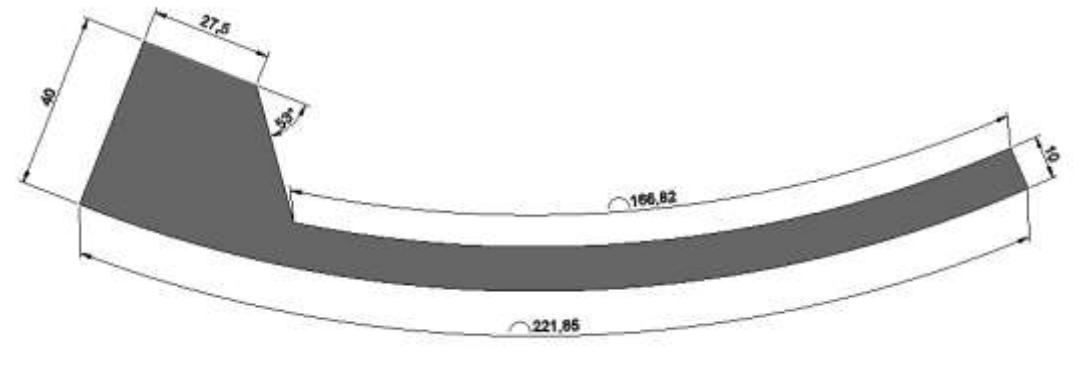
Şekil 3.4. Değirmen plaka imalatı

Deneyler için belirlenen plaka modeli üzerinde çalışma yapılacak olan taşıyıcı açısı ve yüksekliği değişken tutulmuştur. Böylece kullanılan her devir için beş farklı plaka kombinasyonu gözlemi yapılma imkanı doğmuştur.

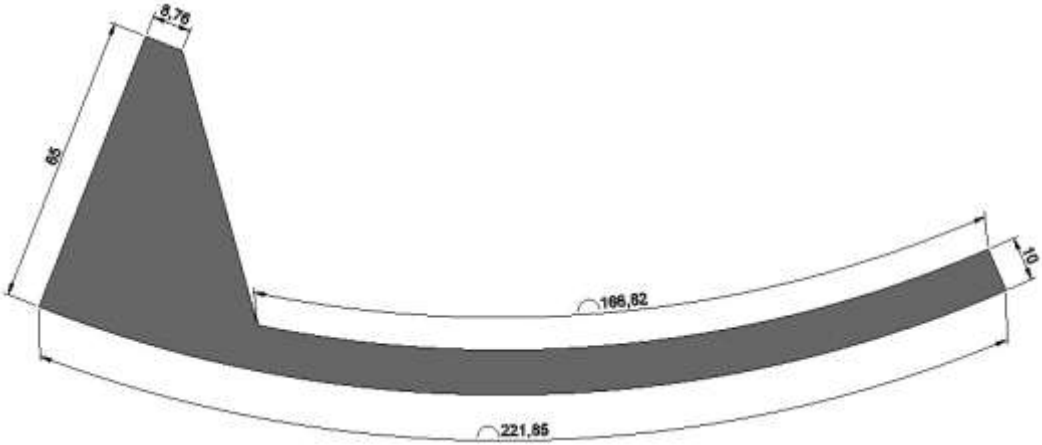
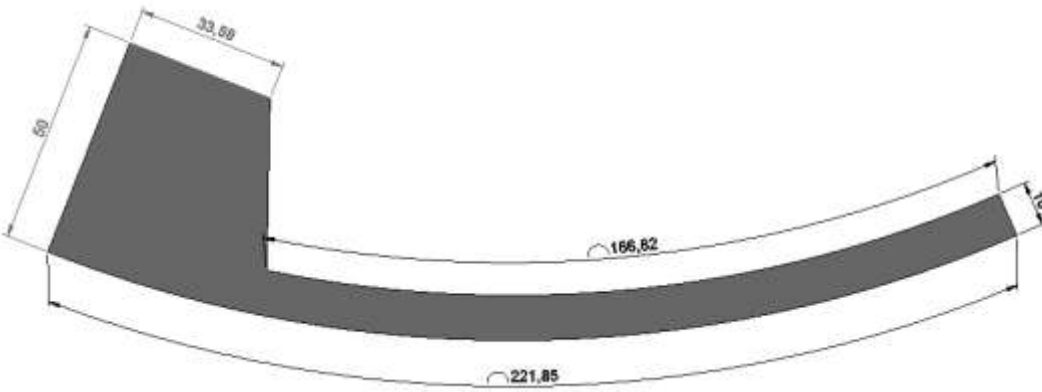
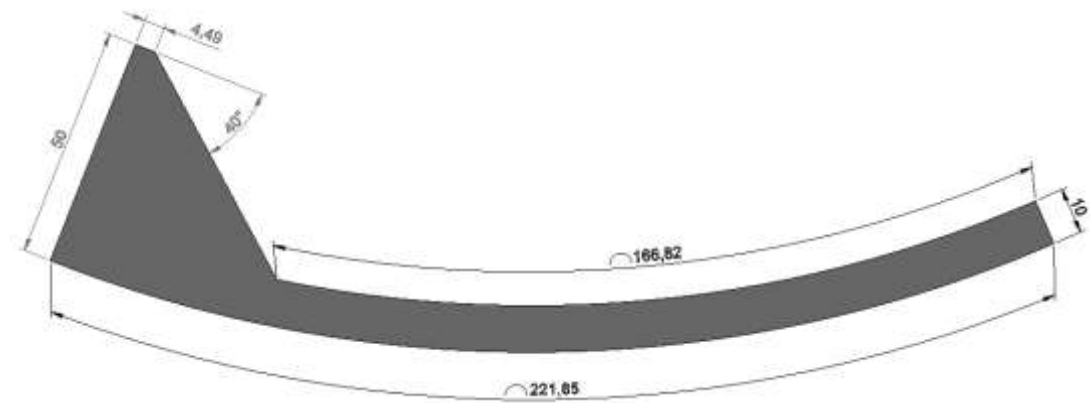
Çizelge 3.5. Deneyler için belirlenen hızlar

Kritik hız 57,30 devir /dakika	
%60 Kritik hız	34 devir /dakika
%70 Kritik hız	40 devir /dakika
%80 Kritik hız	46 devir /dakika

Yapılan deneyler için üç farklı hız ve beş farklı plaka tasarımları belirlenmiştir. Plaka tasarımları özelliklerine göre Plaka Tip 1, Plaka Tip 2, Plaka Tip 3, Plaka Tip 4, Plaka Tip 5 olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca deney hızları da % 60 kritik hız, % 70 kritik hız ve % 80 kritik hız olarak belirlenmiştir. Hız ve plakalar ile ilgili bilgiler aşağıda belirtildiği gibidir:

Plaka İsmi	Plaka Tasarımı
Plaka Tip 1	40 mm taşıyıcı plaka yüksekliği ve 37° taşıyıcı plaka açısı
	
Plaka Tip 2	40 mm taşıyıcı plaka yüksekliği ve 20° taşıyıcı plaka açısı
	

Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan plaka tipleri

Plaka Tip 3	40 mm taşıyıcı plaka yüksekliği ve 50° taşıyıcı plaka açısı
	
Plaka Tip 4	25 mm taşıyıcı plaka yüksekliği ve 37° taşıyıcı plaka açısı
	
Plaka Tip 5	55 mm taşıyıcı plaka yüksekliği ve 37° taşıyıcı plaka açısı
	

Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan plaka tipleri (devamı)

3.2.2. Deneysel Ölçekli Plaka Dizilimlerinin Yapılması

İmalatı yapılan astar plakalarının değirmene montajı her sırada 8 adet plaka olmak üzere toplam 4 sıra olarak yapılmıştır. Öğütülecek ürün beslemesi için şut montajı yapılmış olup, değirmen çıkışı bir apakla kapatılmıştır. Bu kapağın tam ortasında gözetleme camı konulmuştur. Ürün parti şeklinde beslenip, aynı şekilde değirmen boşaltılmaktadır.



Şekil 3.6. Değirmen plaka dizilimi

3.2.3. Değirmen Kritik Hızının Hesaplanması

Değirmenin kritik devrini bulmak için formül 2.15 kullanılacak olursa;

$$N_c = 42,3 / D_m^{1/2}$$

$$N_c = 42,3 / (0,545)^{1/2} = 57,30 \text{ devir/dakika}$$

57,3 devir/dakika olarak kritik devri deneysel platformda görebilmek için motor hız kontrol cihazı montajı yapılmıştır.

3.2.4. Maksimum Bilya Çapının Belirlenmesi, Değirmen Bilya Dolum Oranının Hesaplanması ve Bilya Şarjı Yapılması

Değirmende kullanılacak olan maksimum bilya çapının belirlenmesi için 2.16. numaralı denklem kullanılır. Bu denkleme göre;

$$D_{max} = 20,17 \cdot (D_{20}/K)^{1/2} \cdot 3 \cdot [W_i \cdot \varphi / N_c \cdot (D_u)^{1/2}]^{1/2}$$

$$D_{max} = 20,17 \cdot (40 / 350)^{1/2} \cdot 3 [9,7 \cdot 4,5 / 57,3 \cdot (0,555)^{1/2}]^{1/2}$$

$$D_{max} = 20,59 \text{ mm} \approx 20,00 \text{ mm}$$

Böylece maksimum bilya çapı 20 mm olarak seçilmiştir.

Bilya dolum oranını bulmak için ise 2.17. numaralı formülden yararlanılır. Buna göre;

$$Q = (\pi \cdot D_u^2 / 4) \cdot L \cdot d \cdot V_p$$

Bilya dolum oranı için ise değirmen tasarımcıları bilya dolum oranının değirmen hacminin %22-35 arasında bir değer olması gerektiğini açıklamaktadırlar [46].



Şekil 3.7. Değirmen bilya şarjı

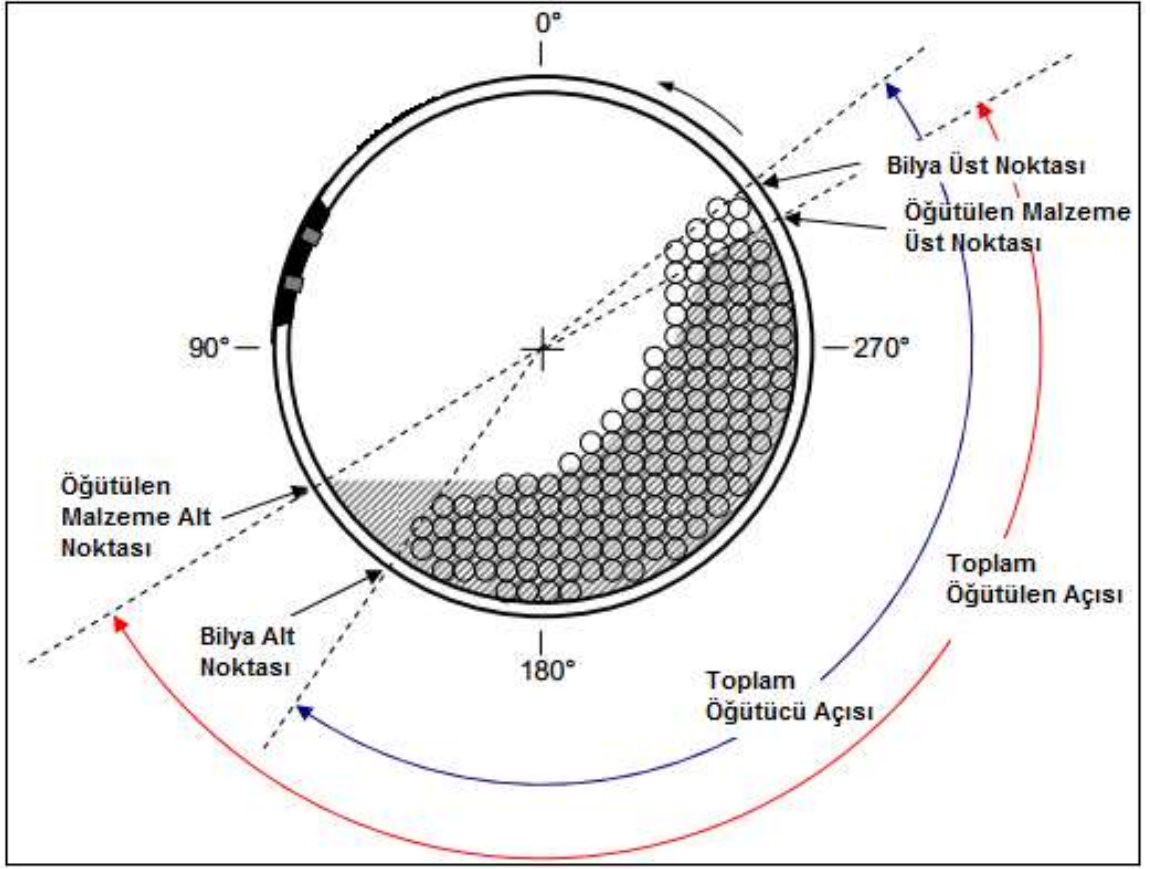
Yapılacak deneyler için bilya dolum oranı sabit tutulmuş olup değer % 25 olarak seçilmiştir. Bu değerler ile formül 2.17. çalıştırılacak olursa;

$$Q = (\pi \cdot 0,555^2 / 4) \cdot 1,30 \cdot 4300 \cdot 0,25$$

$$Q = 338 \text{ Kg}$$

Bilyalı değirmene çapları 10 ile 20 mm arasında değişen 340 Kg bilya şarjı yapılmış ve bilyalı değirmen deneye hazır hale getirilmiştir.

Bilyalı değirmen prosesinde öğütmenin optimum yapılabilmesi için öğütme çemberinin iyi oluşturulmasıyla sağlanabilir. Bilyalı değirmende öğütme çemberinin bileşenleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Bilyalı değirmende öğütme çemberi bileşenleri [44]

Aşağıda belirtilen veriler için yapılan her deneye numara verilmiştir. Her deney için hammadde beslemesi sabit tutulmuş ve değer saatte 75 kg kromit beslemesi olacak şekilde belirlenmiştir. Deney bulgularından olan, değirmen çıkışındaki ürün boyutunun belirlenmesi için değirmenden çıkan ürün boyut tayini için laboratuvara gönderilmiştir. Değirmene montajı yapılan ve öğütme esnasında tüketilen enerjiyi ölçmek için kullanılan cihaz ile de her deney için ayrı olmak üzere tüketilen enerjinin miktarı belirlenmiştir.

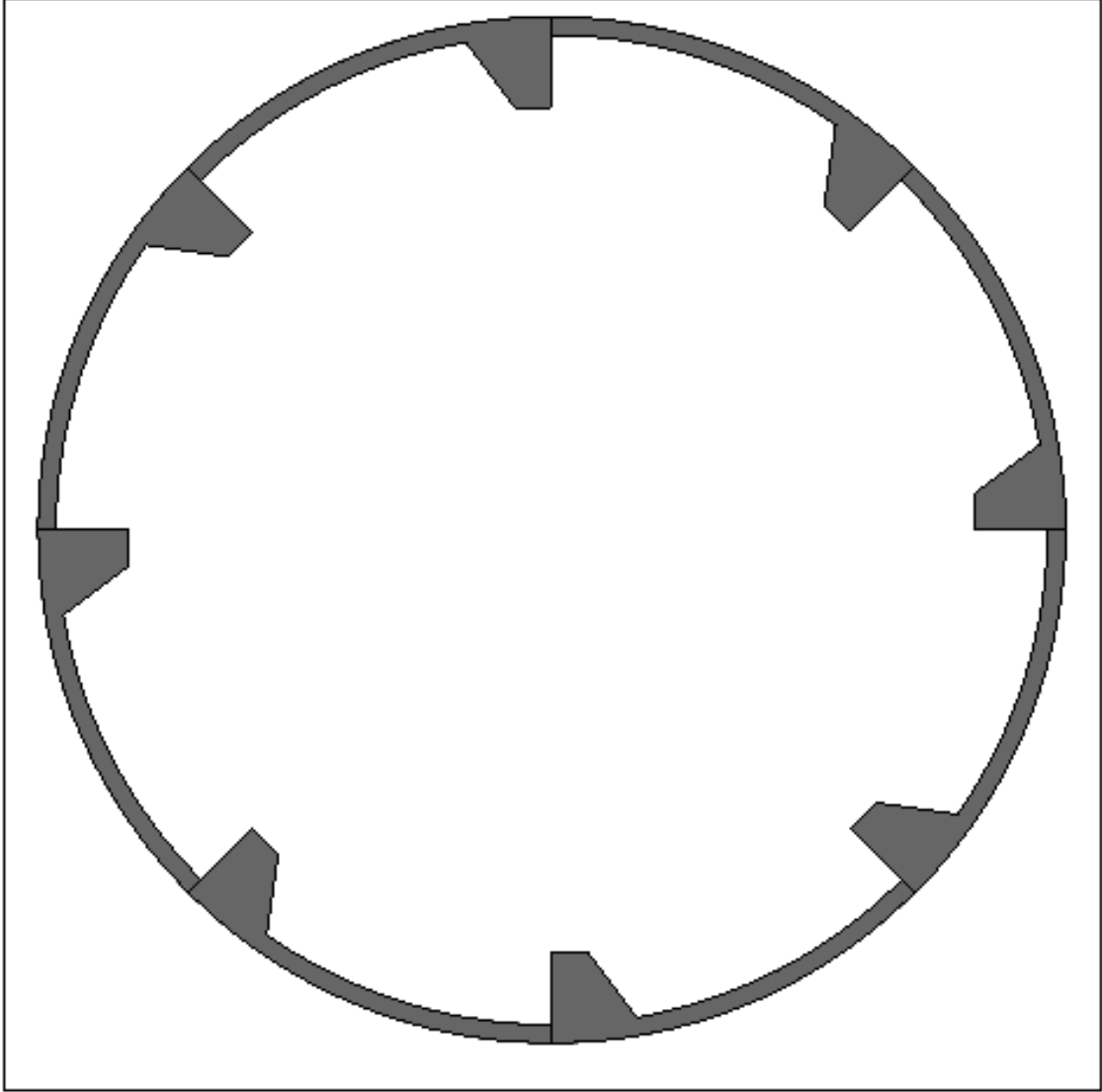


Şekil 3.9. Değirmen kromit beslemesi

Yapılacak olan deney sürelerini belirlemek için bir ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışmada uygun öğütme ortamı hazırlandıktan sonra sistem otuz dakika çalıştırılmıştır. Bu sürenin ardından malzeme numunesi alınmış ve laboratuvar analizine gönderilmiştir. Ardından değirmen otuz dakika daha çalıştırılmış ve tekrar malzeme numunesi alınmıştır. Alınan numuneler karşılaştırılmış ve malzeme boyutunun değerlendirilmesi yapılmıştır. Otuz dakika periyodunda çalıştırılan sistemden alınan numunelerin karşılaştırılması sonucunda; ikinci saatten çalışmadan sonra öğütmenin yapılamadığı gözlemlenmiştir. İki saatten sonra yapılan malzeme boyutu ölçümlerinin hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple yapılacak olan deneylerde toplam öğütme süresinin iki saat olmasına karar verilmiştir.

3.2.5. Plaka Tip 1 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (1. Deney)

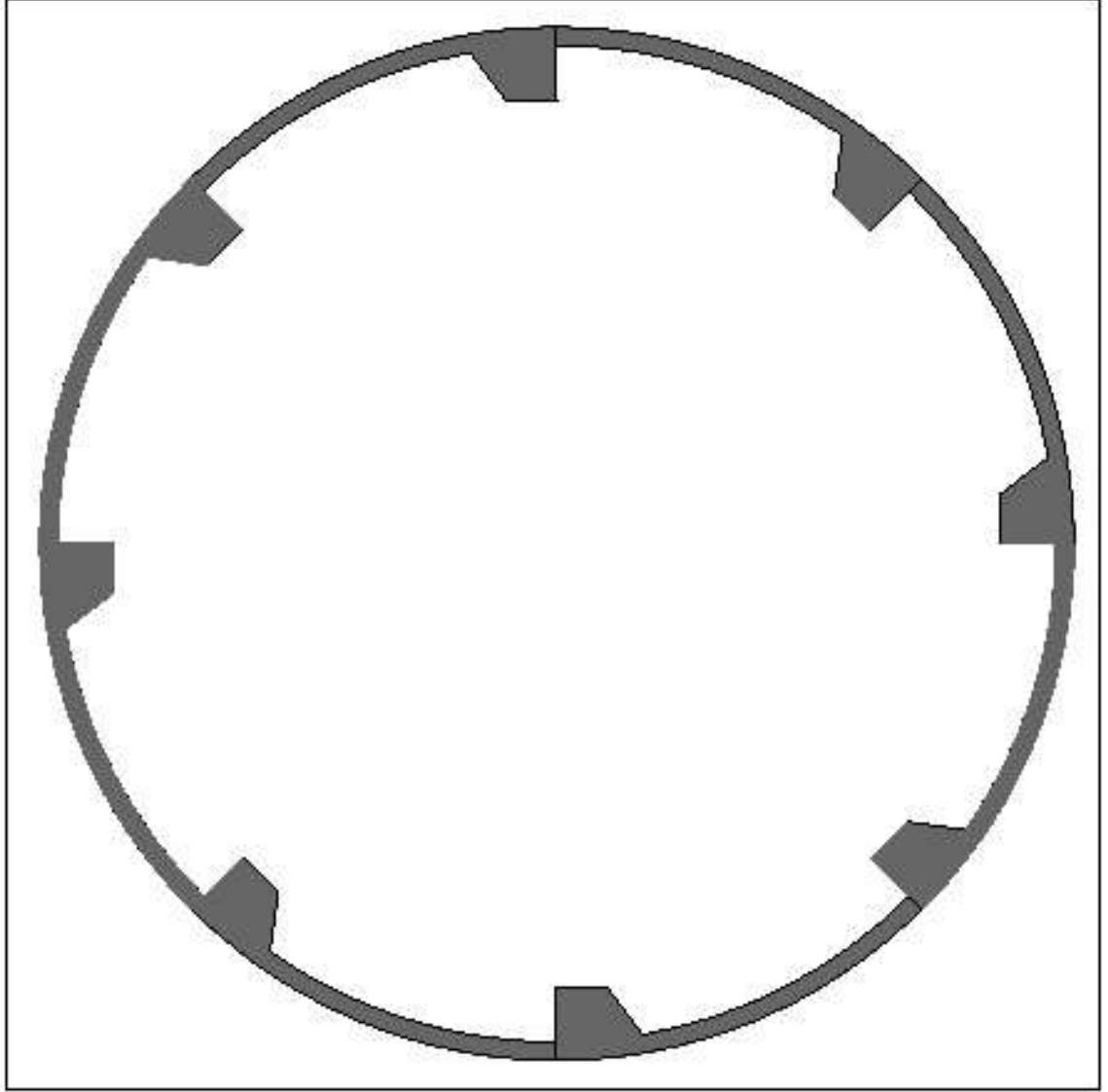
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 60 kritik hızda (34 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.10. 1. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.6. Plaka Tip 2 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (2. Deney)

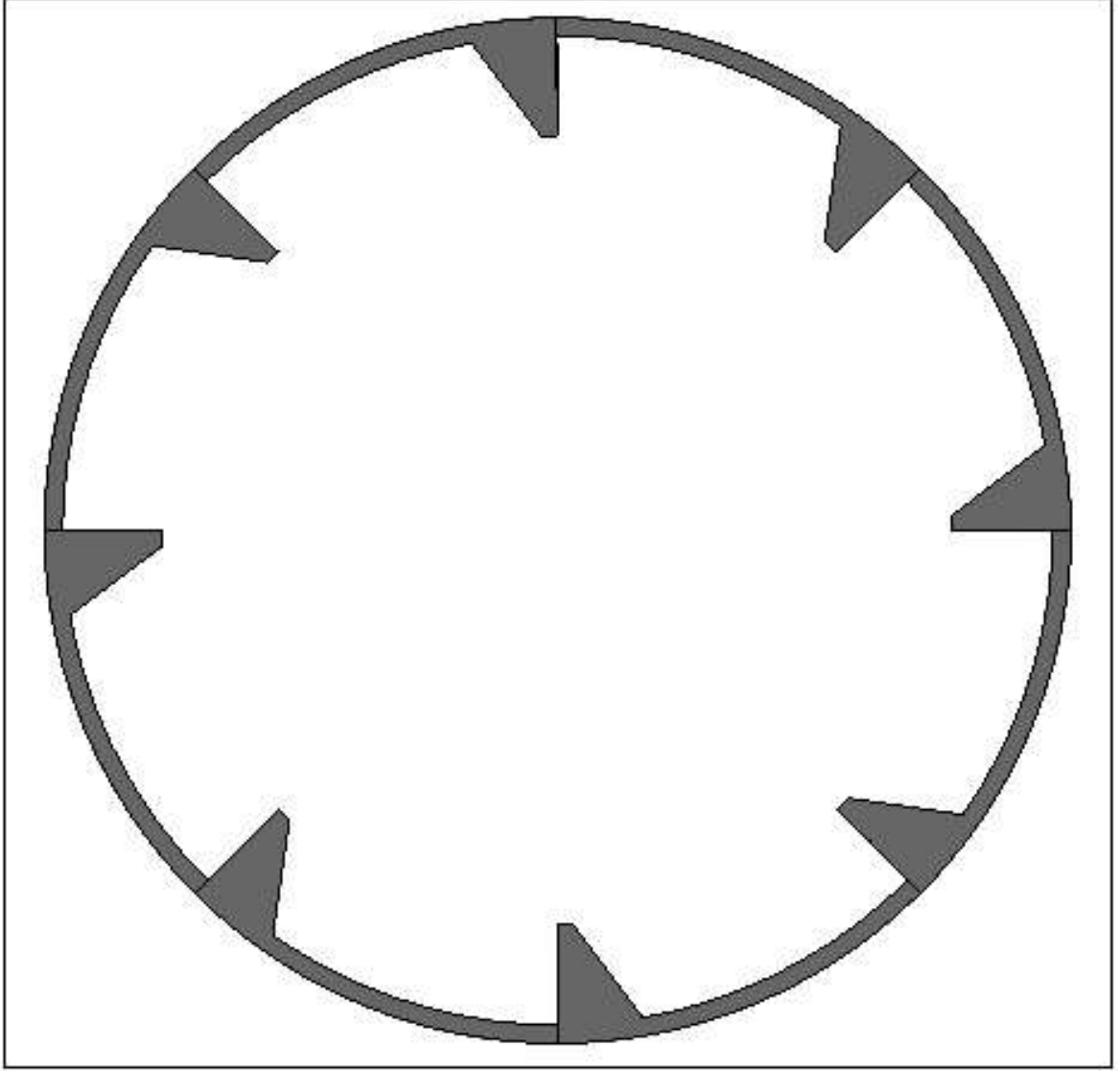
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 60 kritik hızda (34 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.11. 2. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.7. Plaka Tip 3 ile 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (3. Deney)

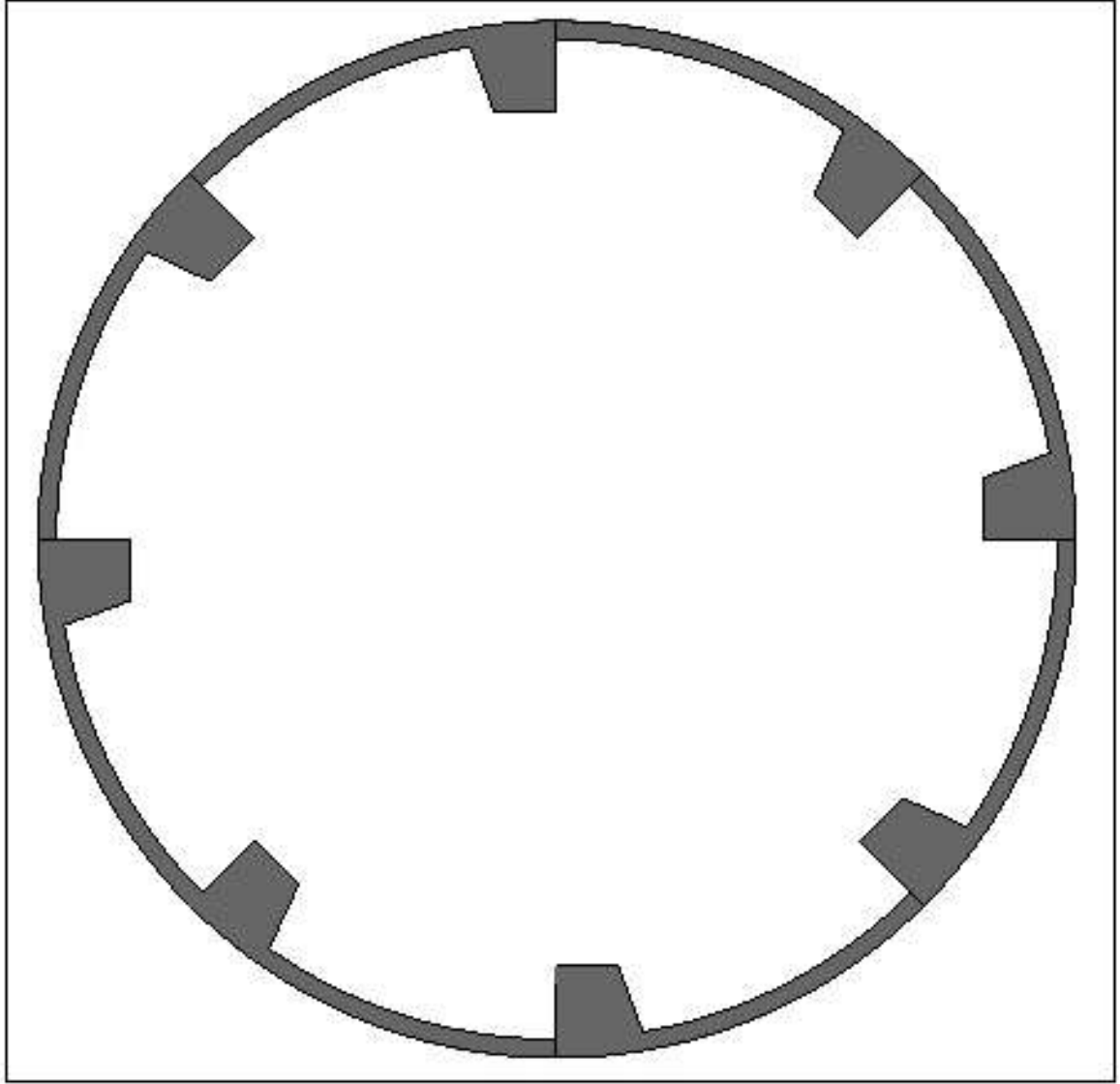
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 60 kritik hızda (34 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.12. 3. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.8. Plaka Tip 4 ile 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (4. Deney)

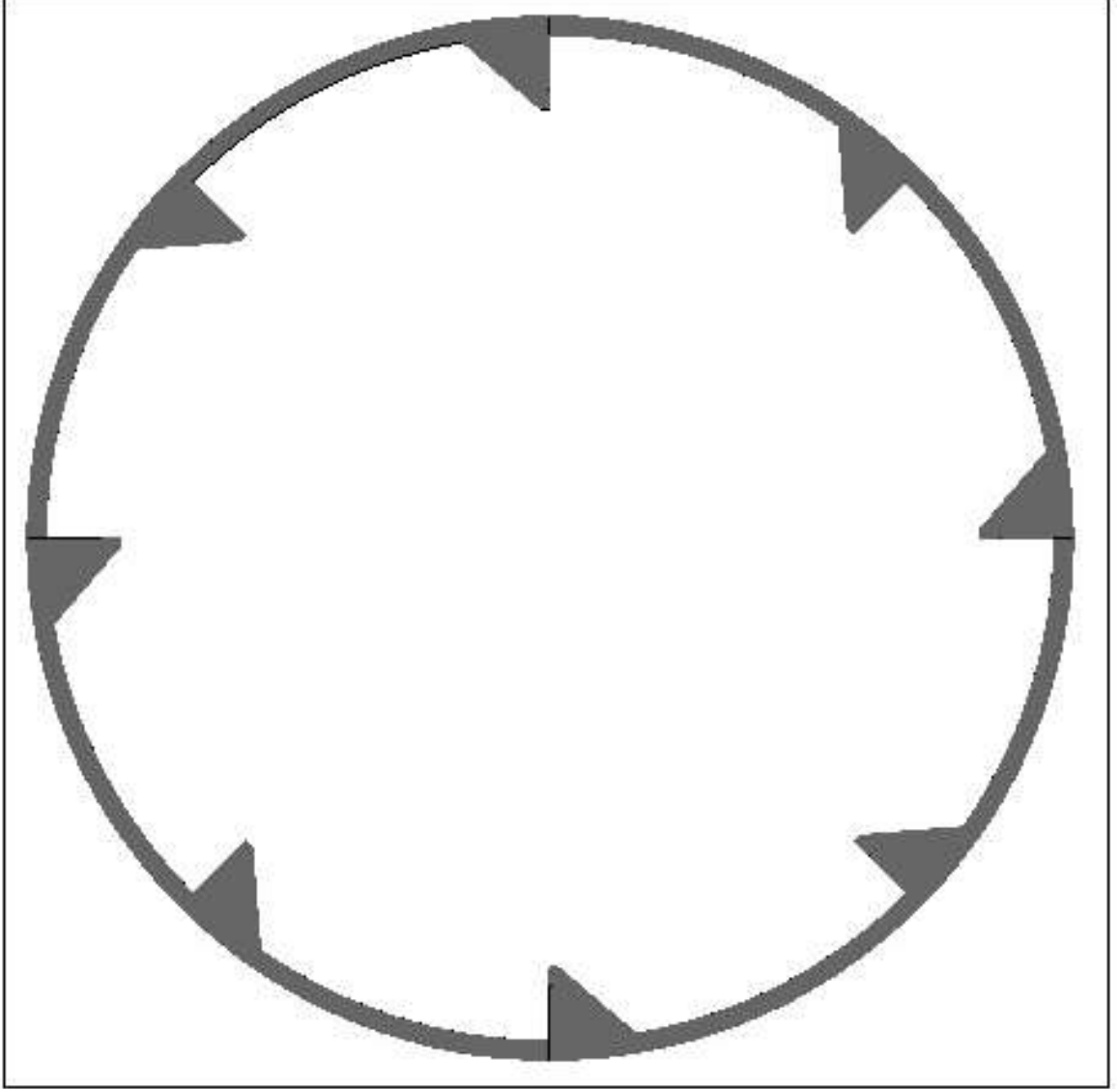
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 60 kritik hızda (34 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.13. 4. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.9. Plaka Tip 5 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (5. Deney)

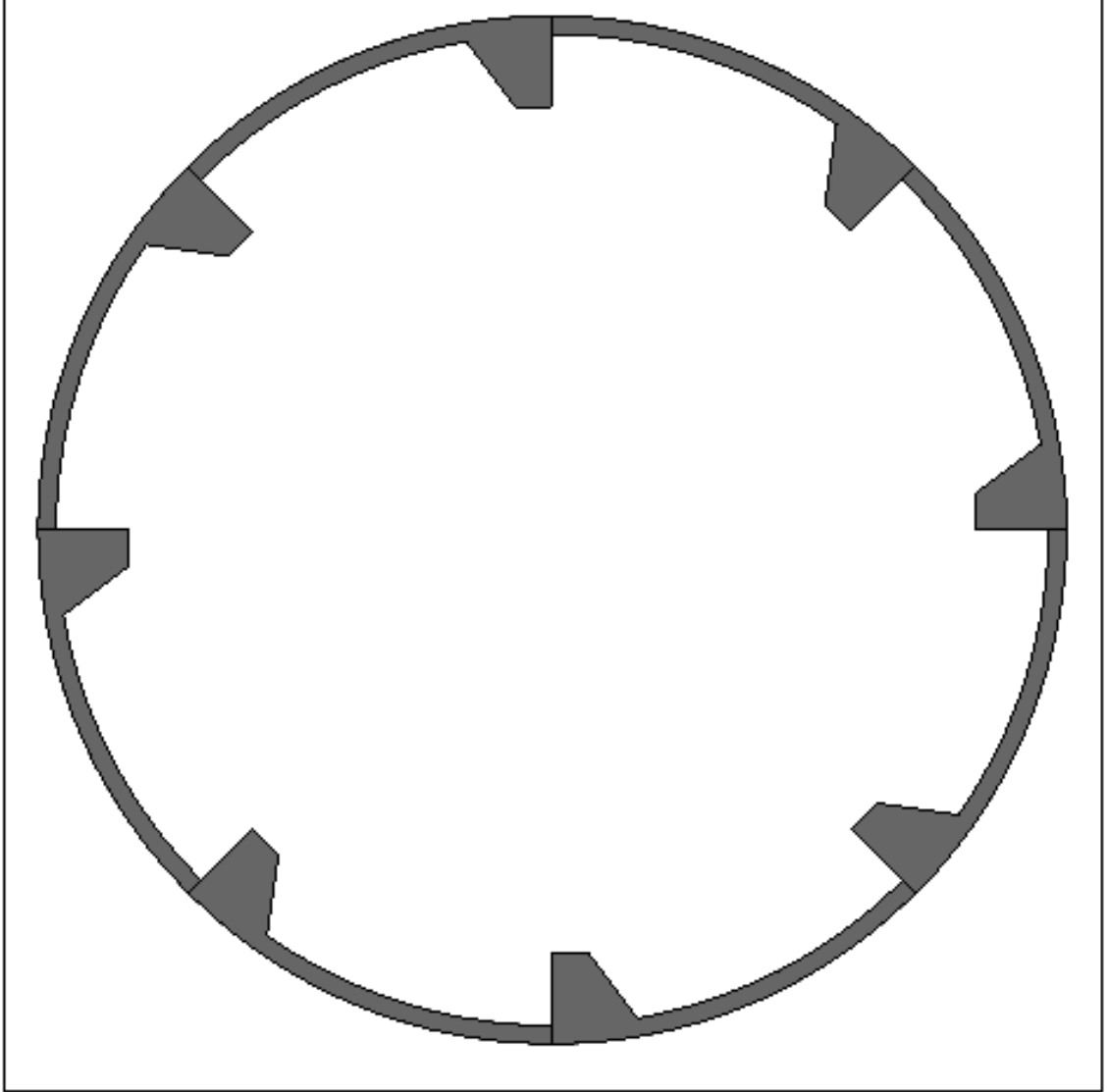
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 60 kritik hızda (34 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.14. 5. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.10. Plaka Tip 1 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (6. Deney)

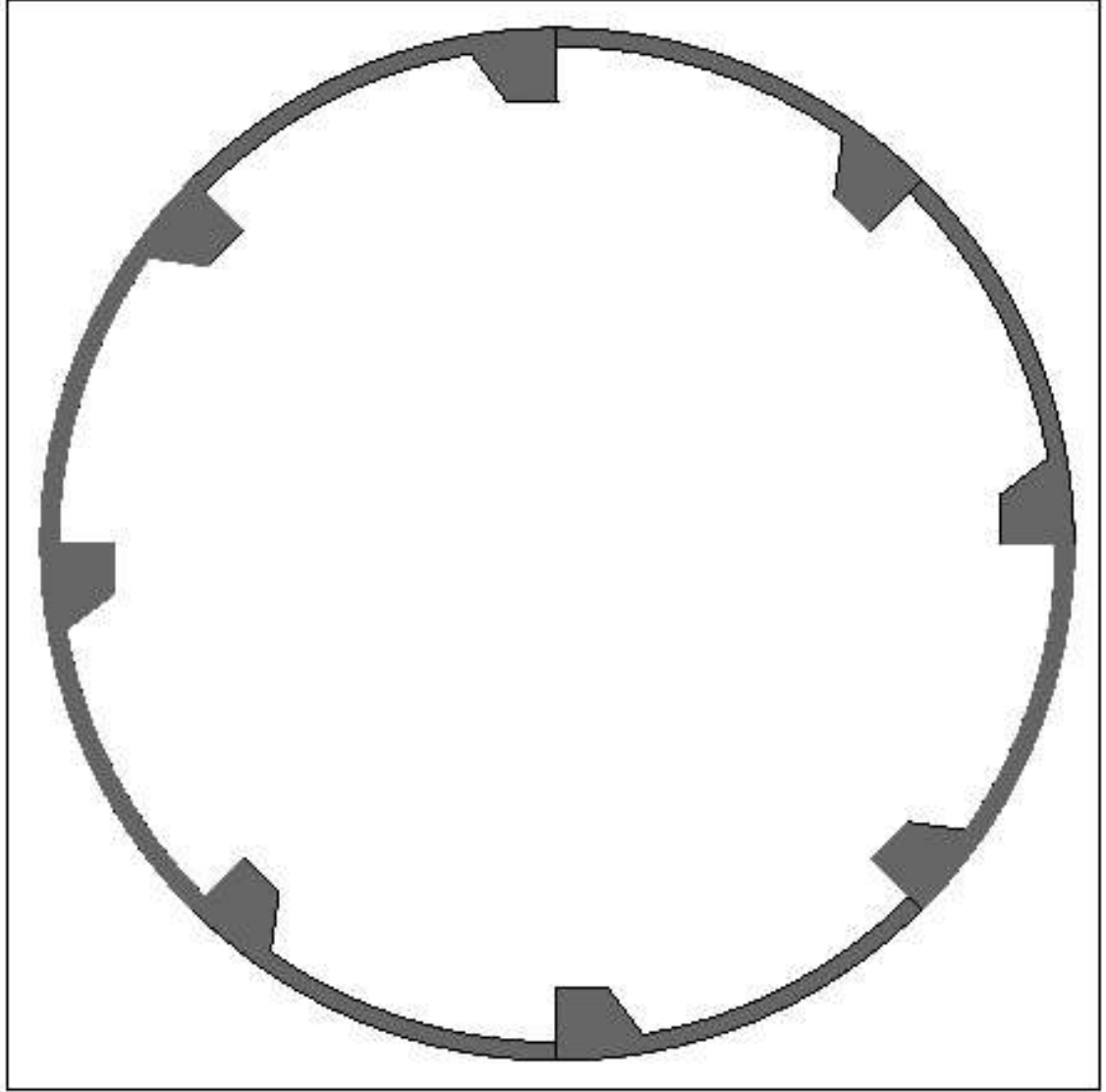
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 70 kritik hızda (40 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.15. 6. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.11. Plaka Tip 2 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (7. Deney)

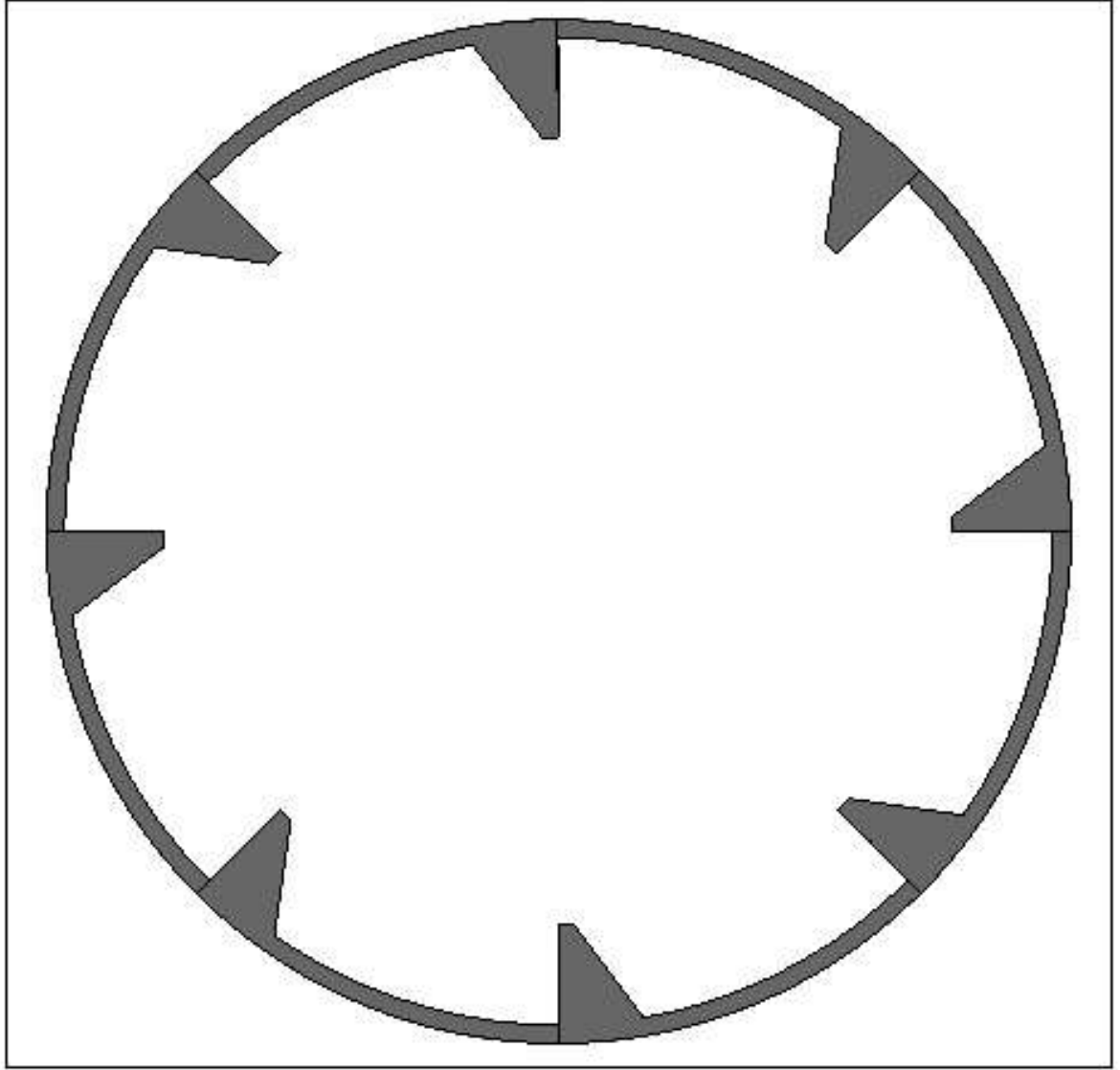
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 70 kritik hızda (40 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.16. 7. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.12. Plaka Tip 3 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (8. Deney)

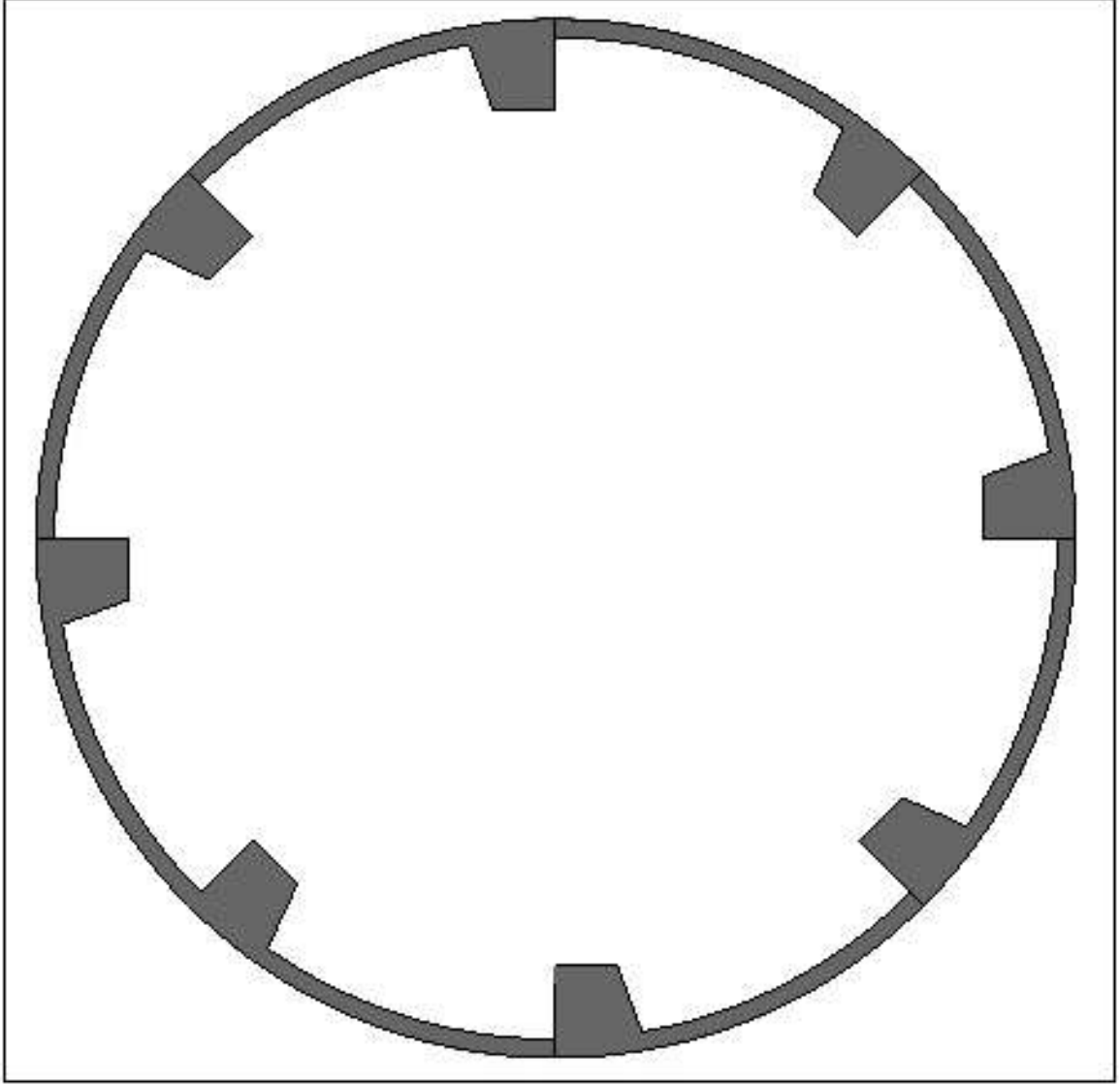
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 70 kritik hızda (40 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.17. 8. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.13. Plaka Tip 4 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (9. Deney)

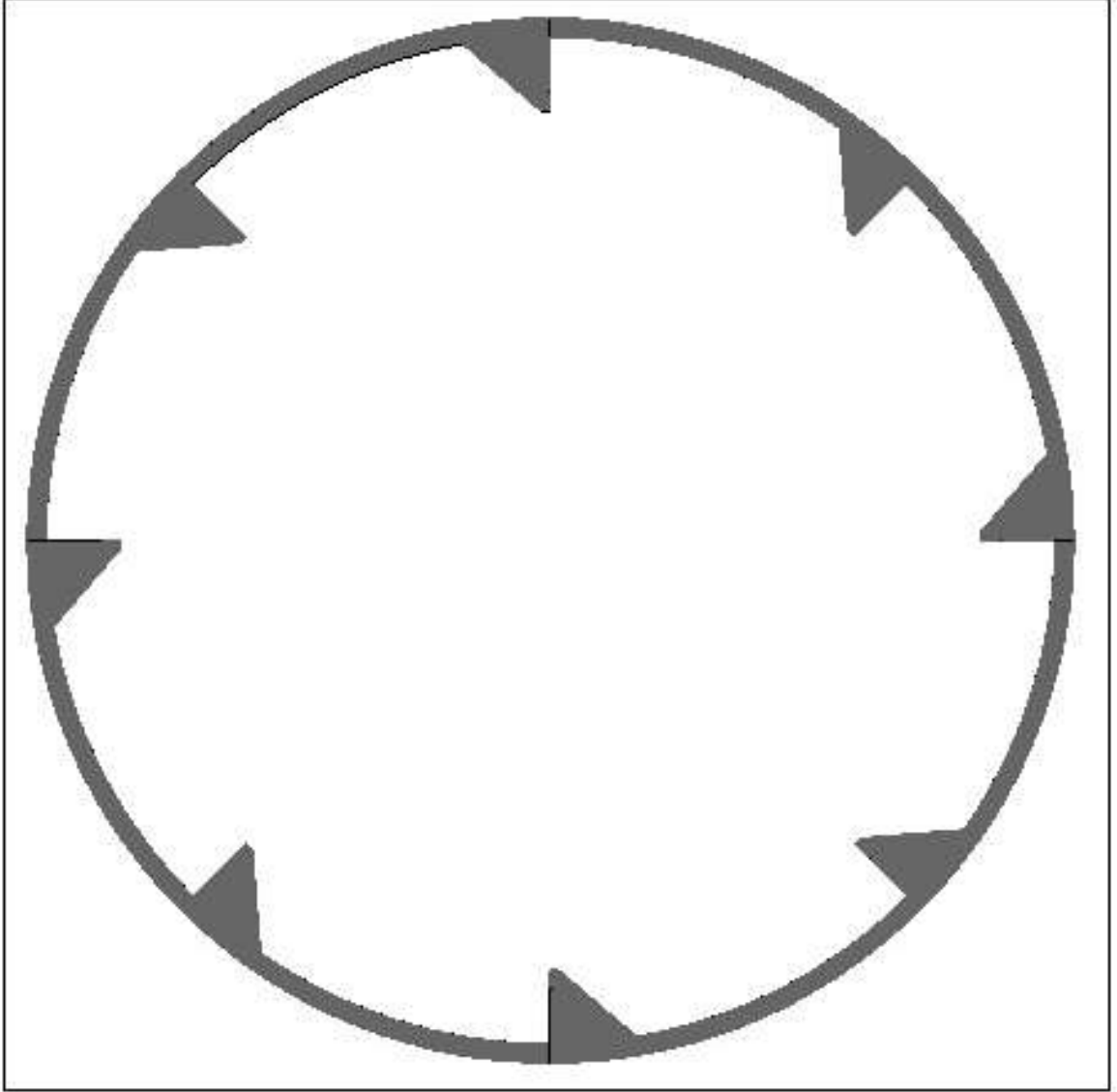
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 70 kritik hızda (40 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.18. 9. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.14. Plaka Tip 5 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (10. Deney)

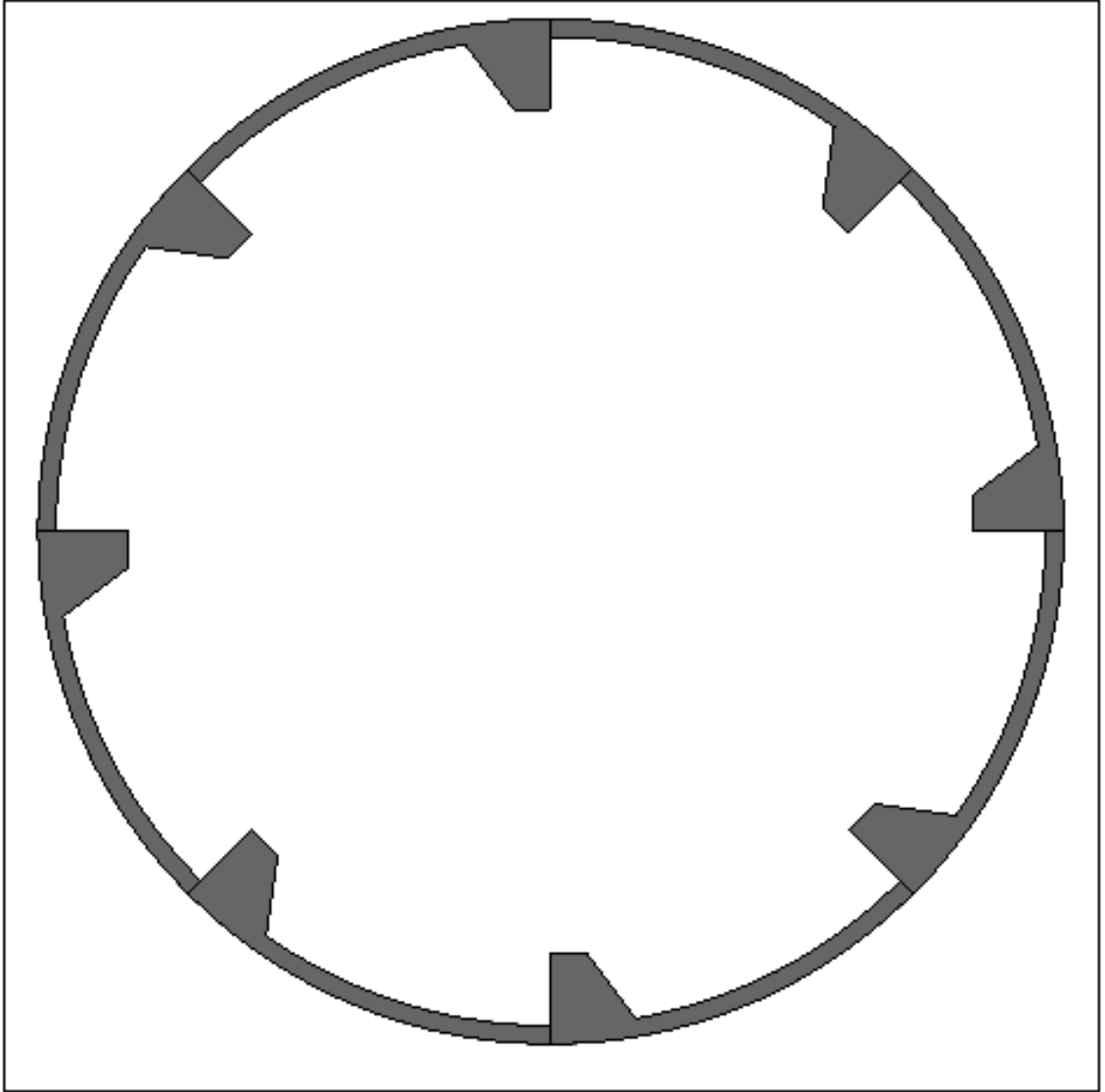
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 70 kritik hızda (40 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.19. 10. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.15. Plaka Tip 1 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (11. Deney)

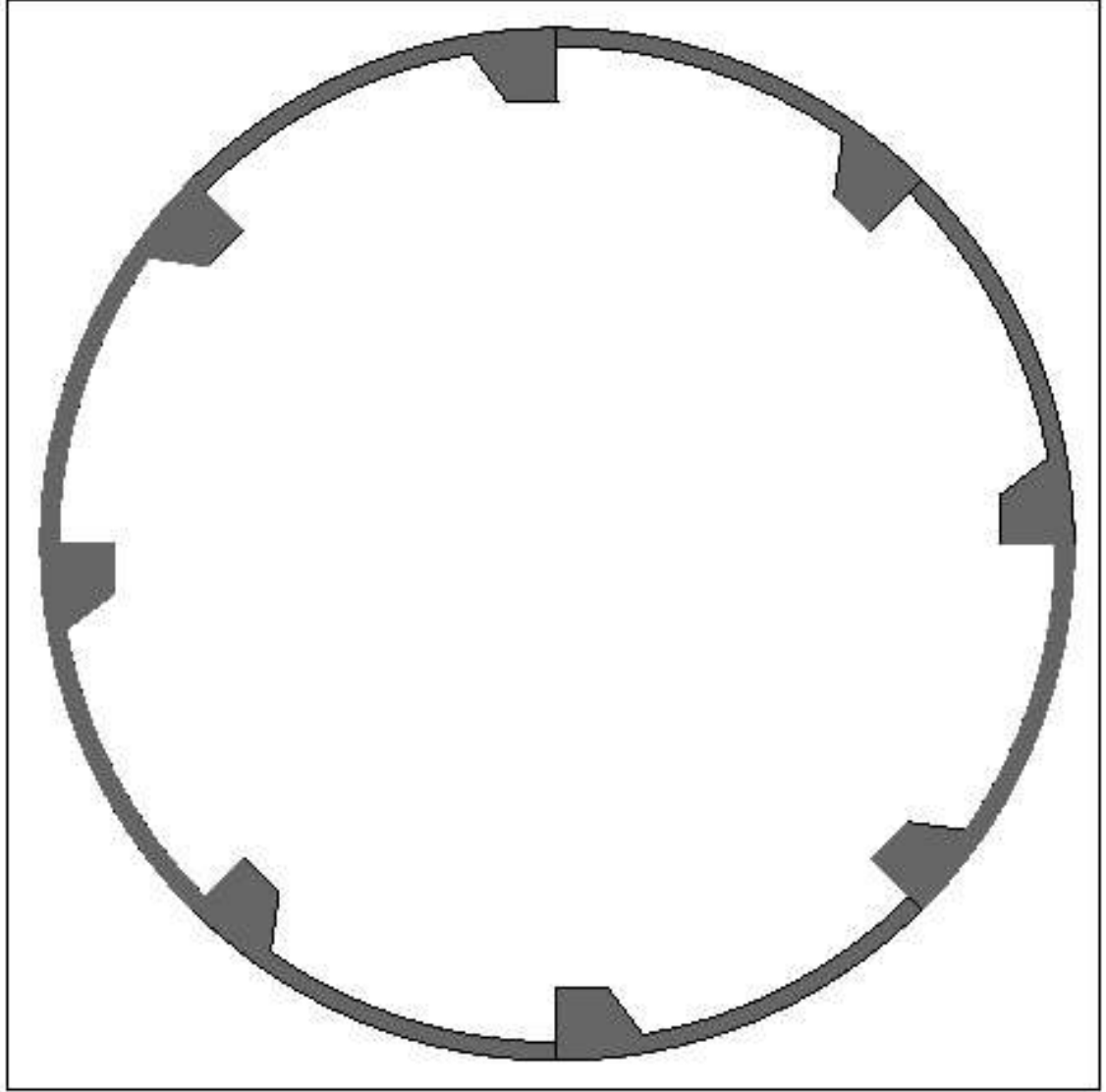
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 80 kritik hızda (46 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.20. 11. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.16. Plaka Tip 2 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (12. Deney)

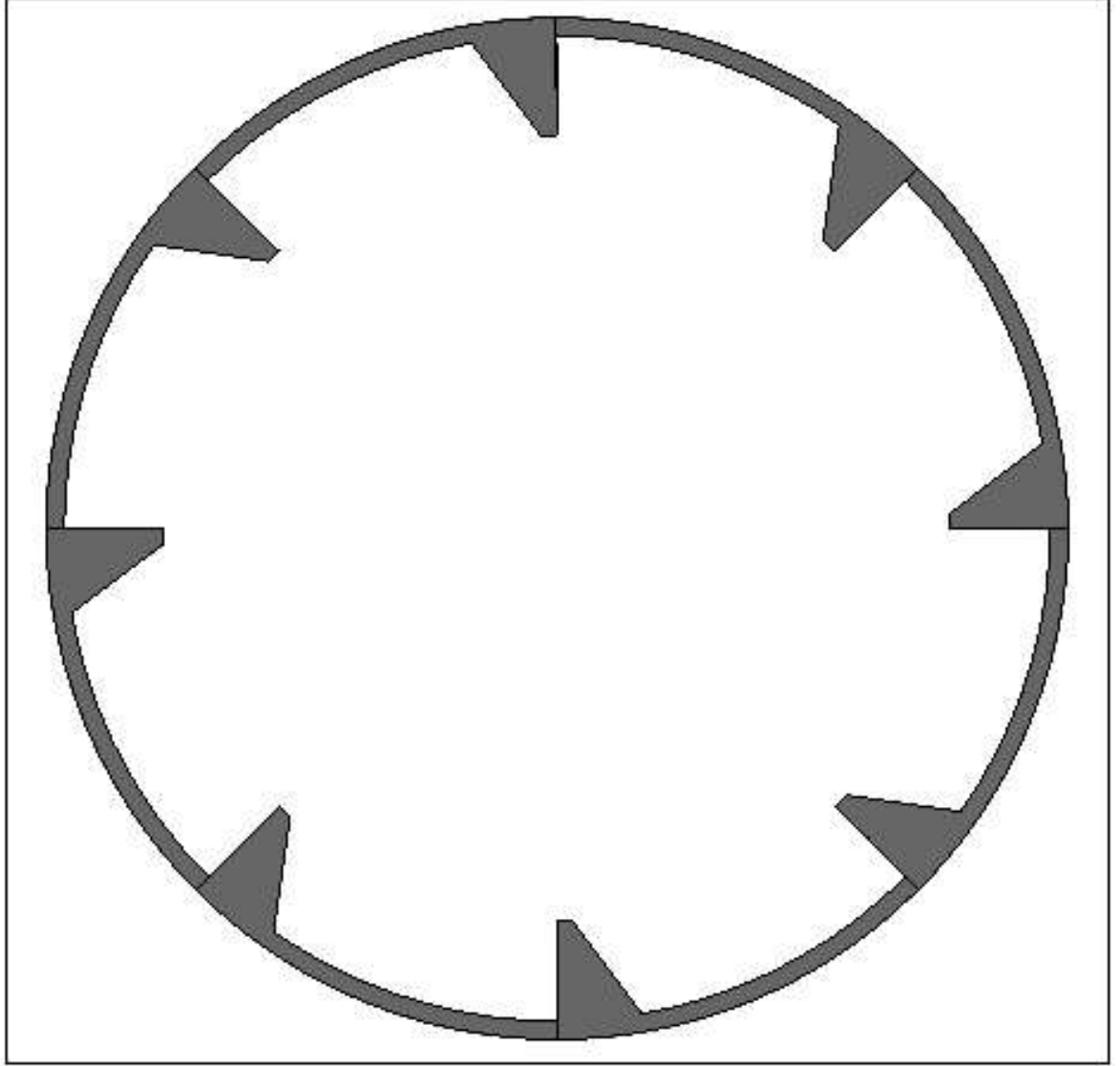
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 80 kritik hızda (46 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.21. 12. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.17. Plaka Tip 3 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (13. Deney)

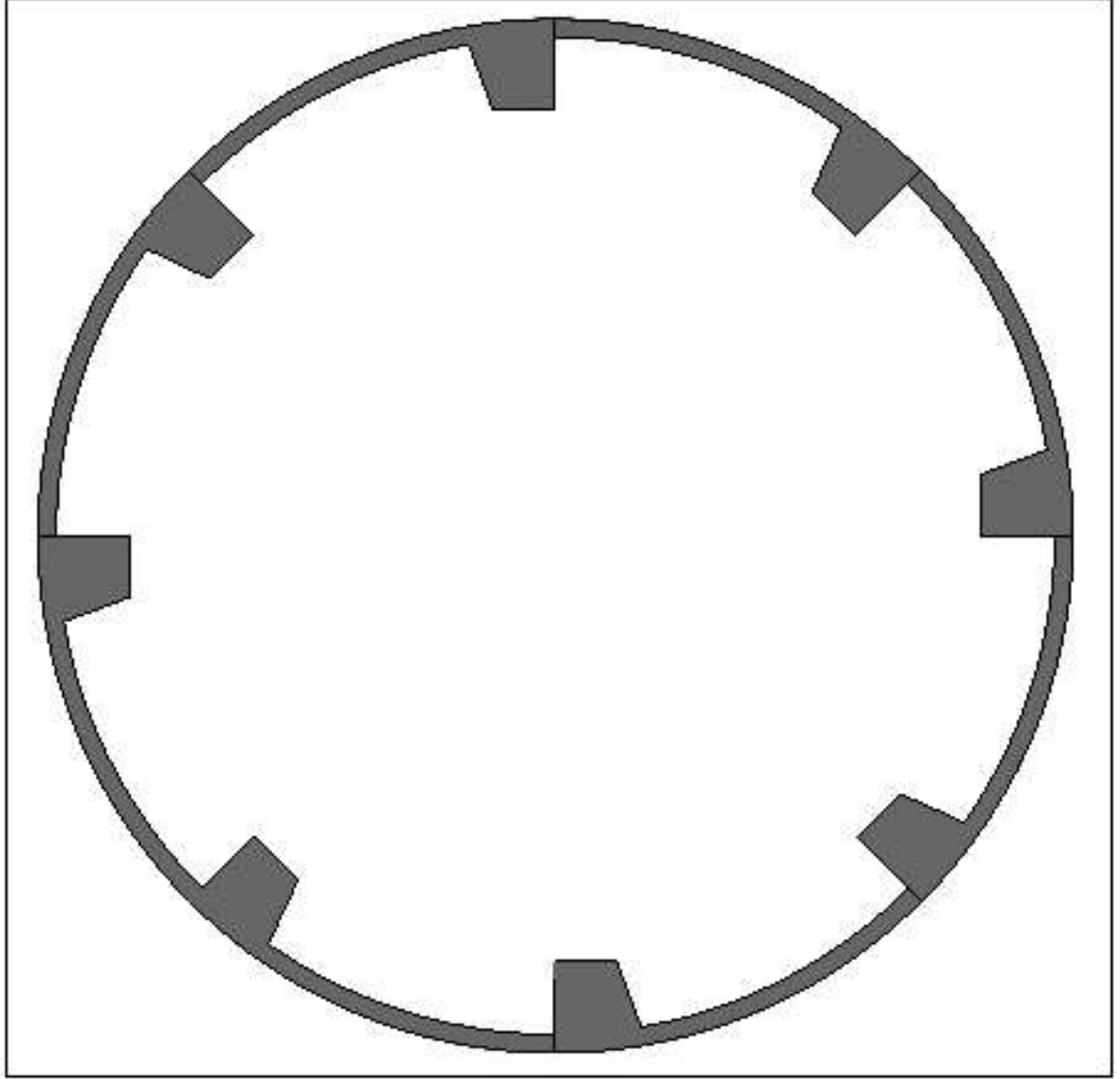
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 80 kritik hızda (46 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.22. 13. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.18. Plaka Tip 4 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (14. Deney)

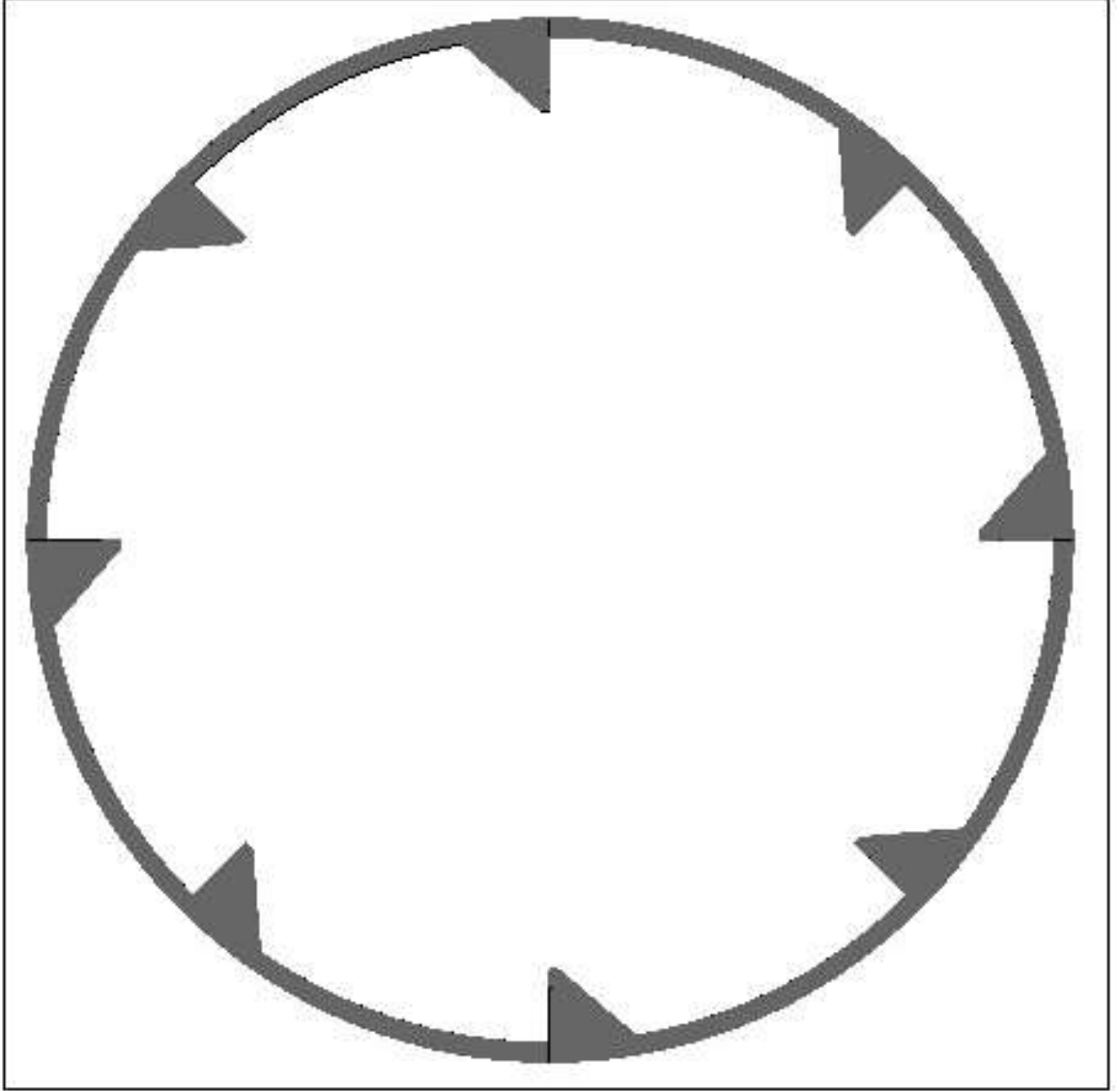
Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 80 kritik hızda (46 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.23. 14. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

3.2.19. Plaka Tip 5 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi (15. Deney)

Verilere göre imalatı yapılan ve aşağıda değirmen içerisindeki dizilimi görülen plakalar % 80 kritik hızda (46 devir / dakika) çalıştırılmıştır.



Şekil 3.24. 15. deney için plaka tasarımı ve tasarıma göre değirmendeki dizilimi

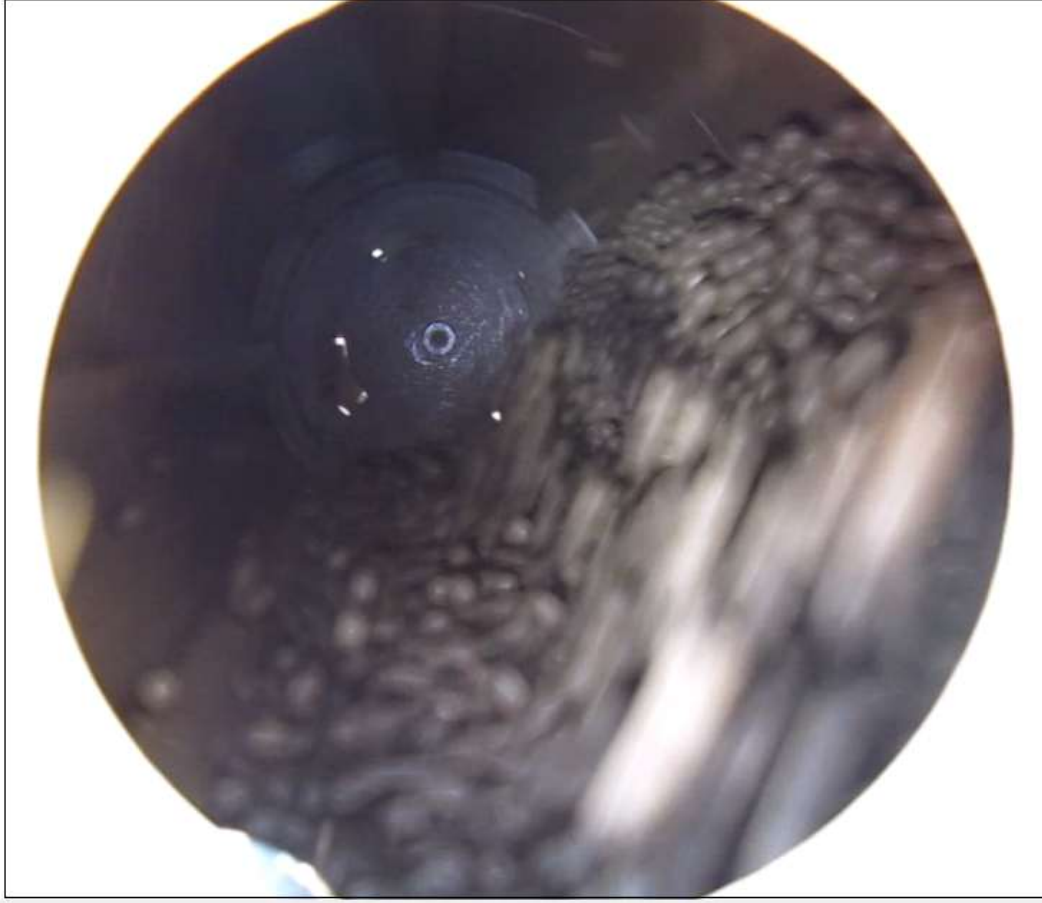
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. BULGULAR

4.1.1. Plaka Tip 1 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (1. Deney)

Çizelge 4.1. 1. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,20
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	120
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,30

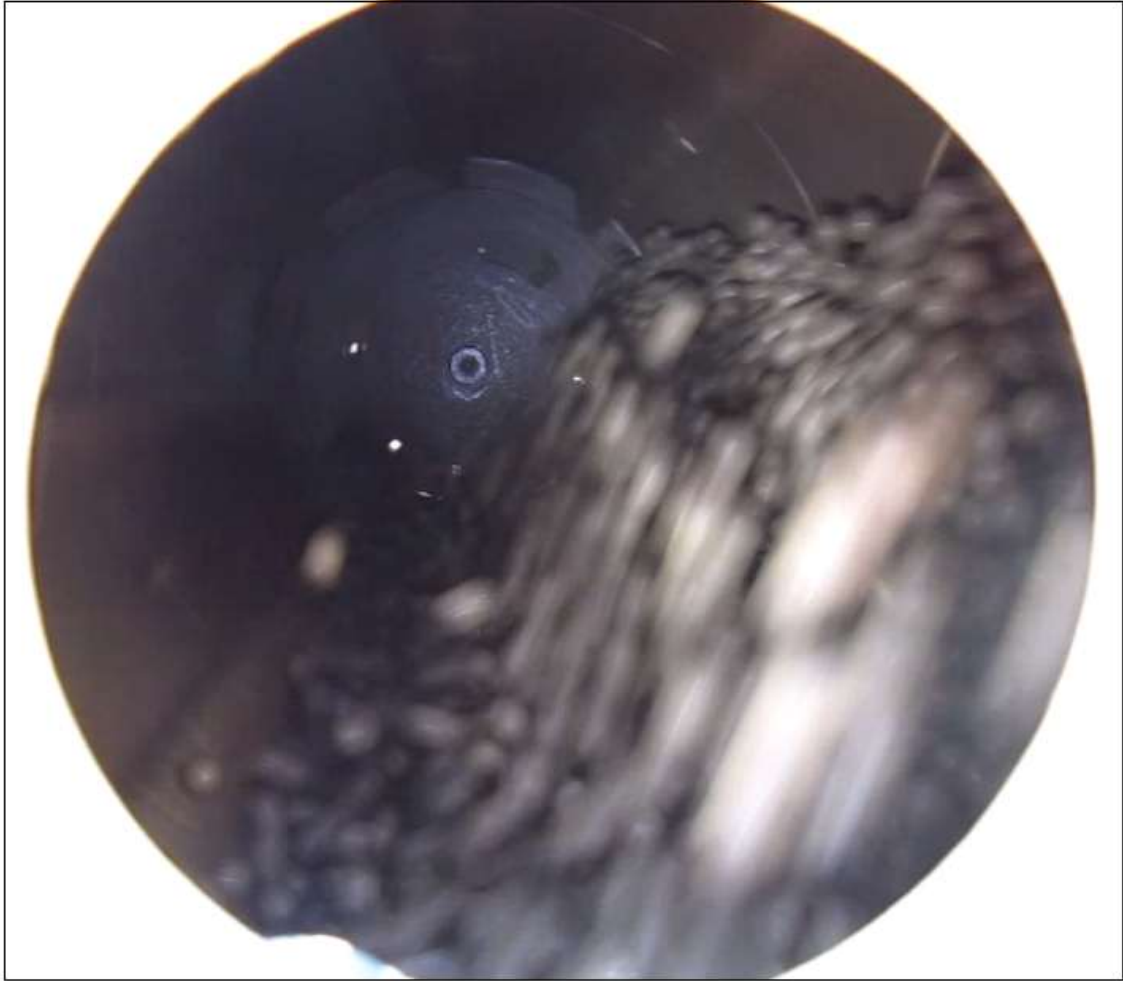


Şekil 4.1. 1. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.2. Plaka Tip 2 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (2. Deney)

Çizelge 4.2. 2. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	1,95
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	125
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,20

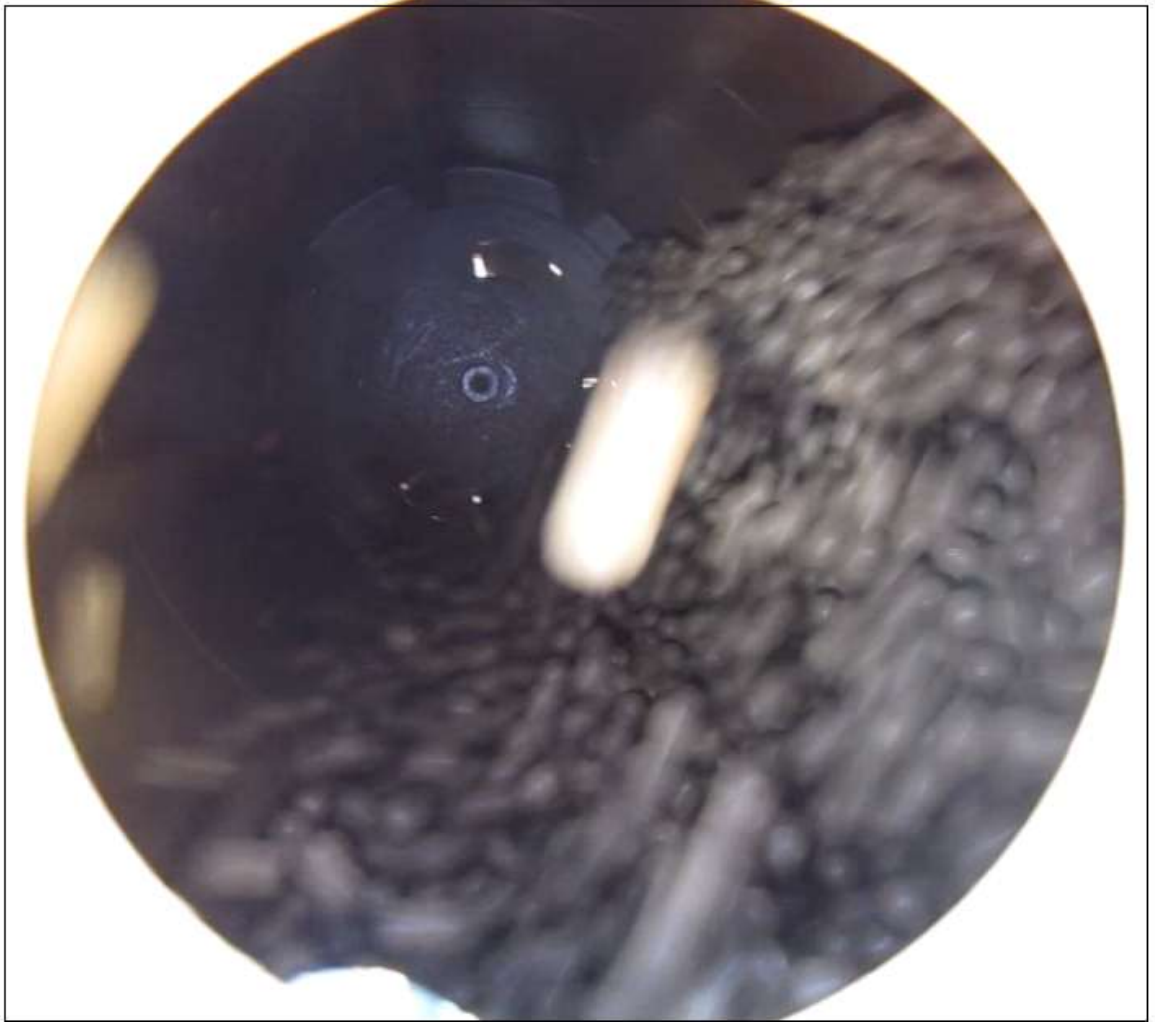


Şekil 4.2. 2. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.3. Plaka Tip 3 ile 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (3. Deney)

Çizelge 4.3. 3. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,30
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	115
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,10

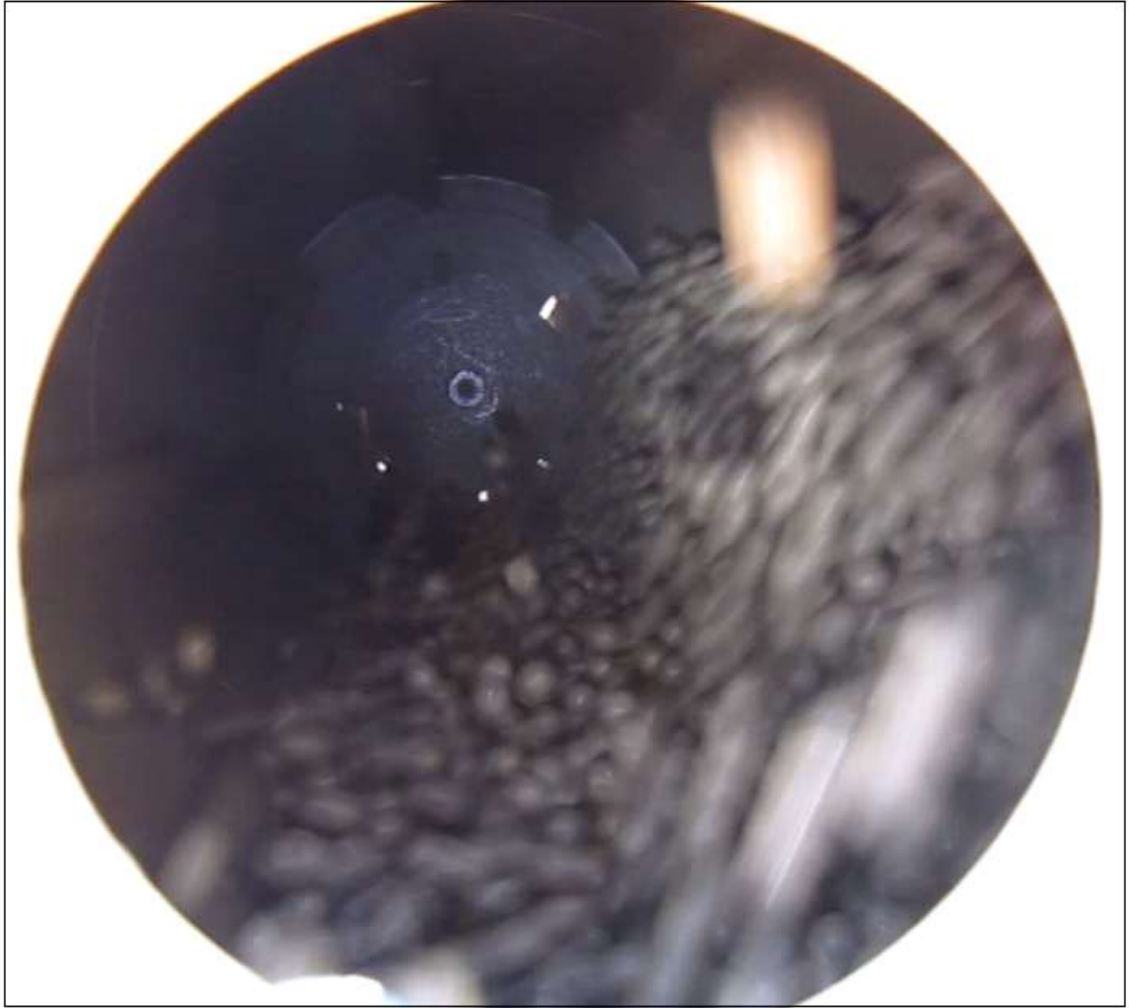


Şekil 4.3. 3. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.4. Plaka Tip 4 ile 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (4. Deney)

Çizelge 4.4. 4. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	1,90
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	130
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,15

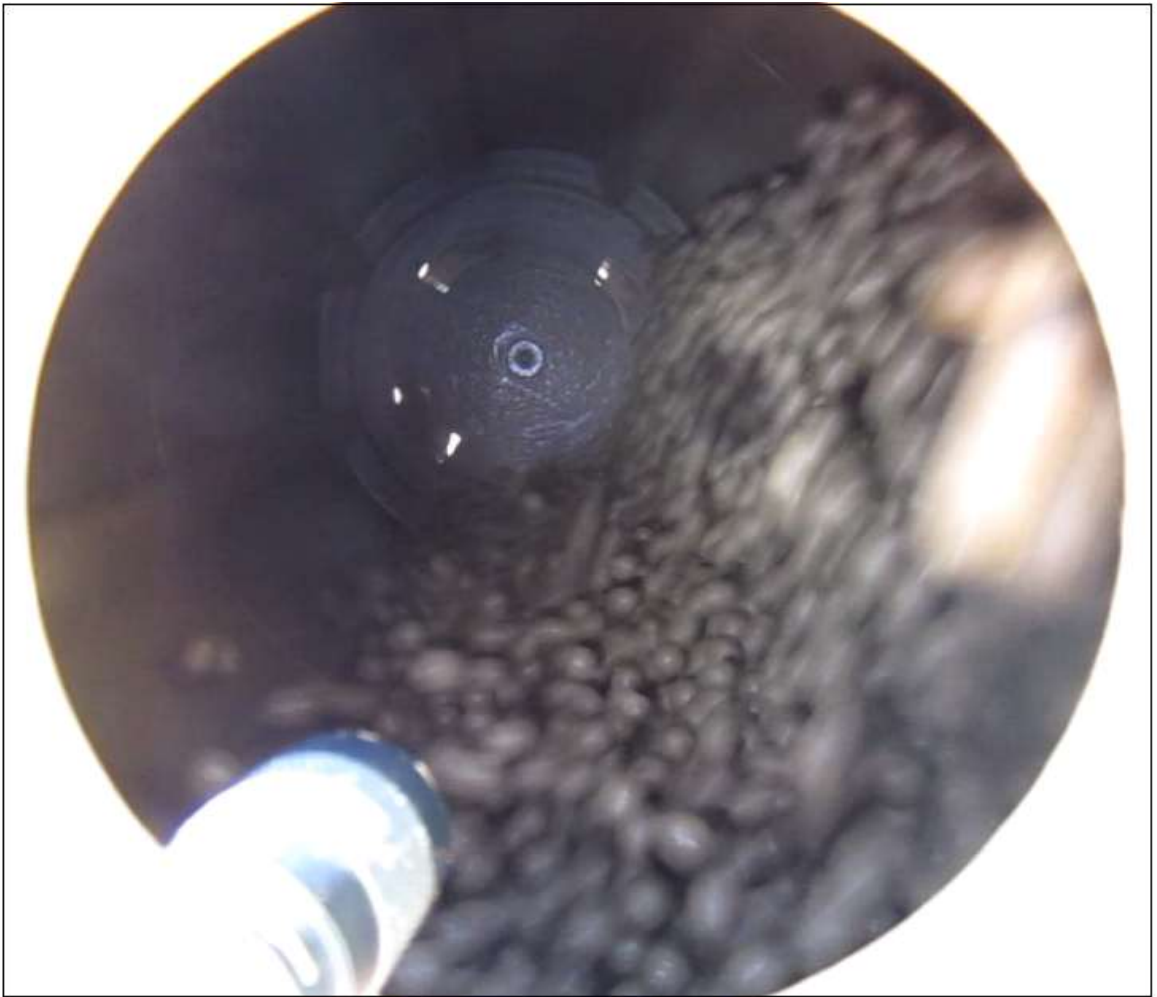


Şekil 4.4. 4. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.5. Plaka Tip 5 İle 34 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (5. Deney)

Çizelge 4.5. 5. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,40
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	110
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,25

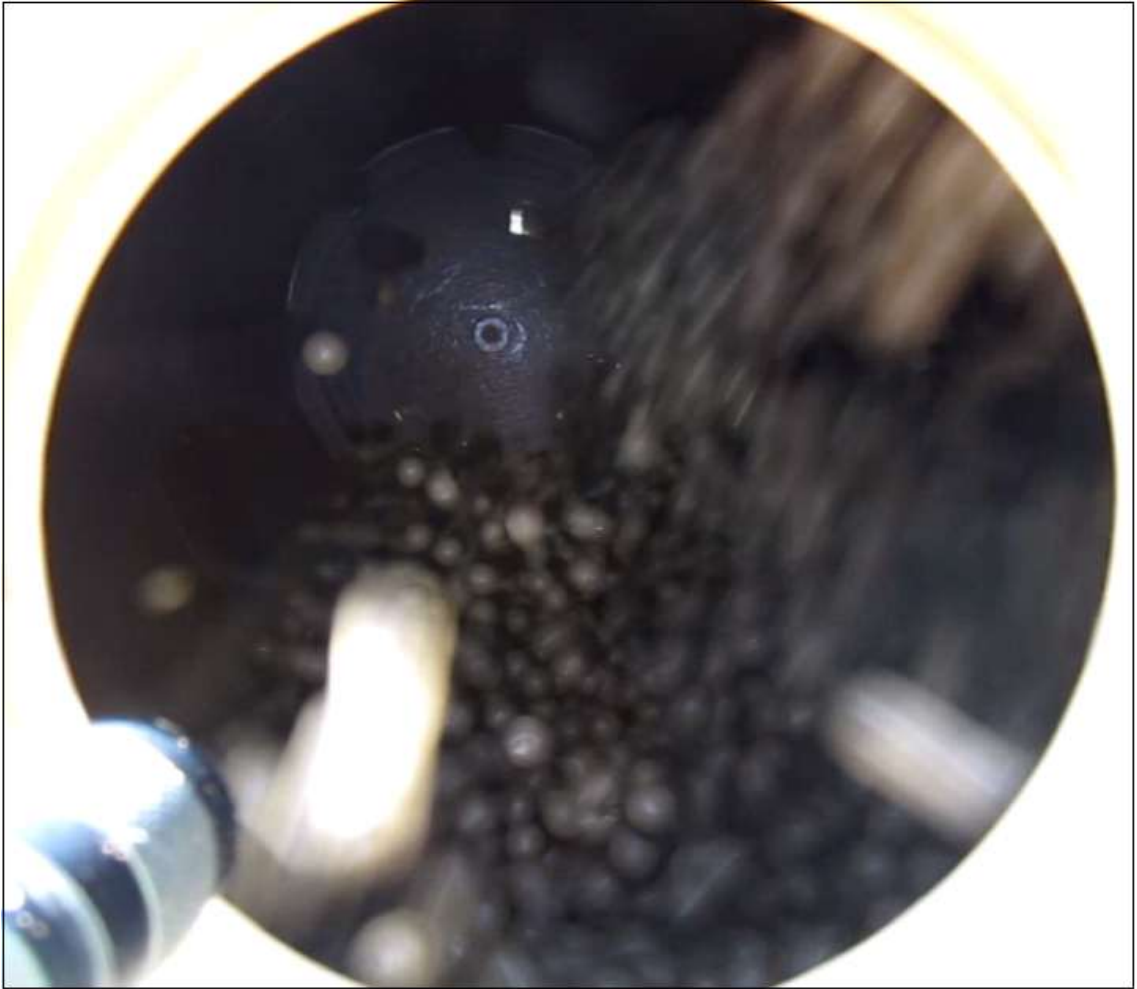


Şekil 4.5. 5. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.6. Plaka Tip 1 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (6. Deney)

Çizelge 4.6. 6. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,55
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	100
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,25

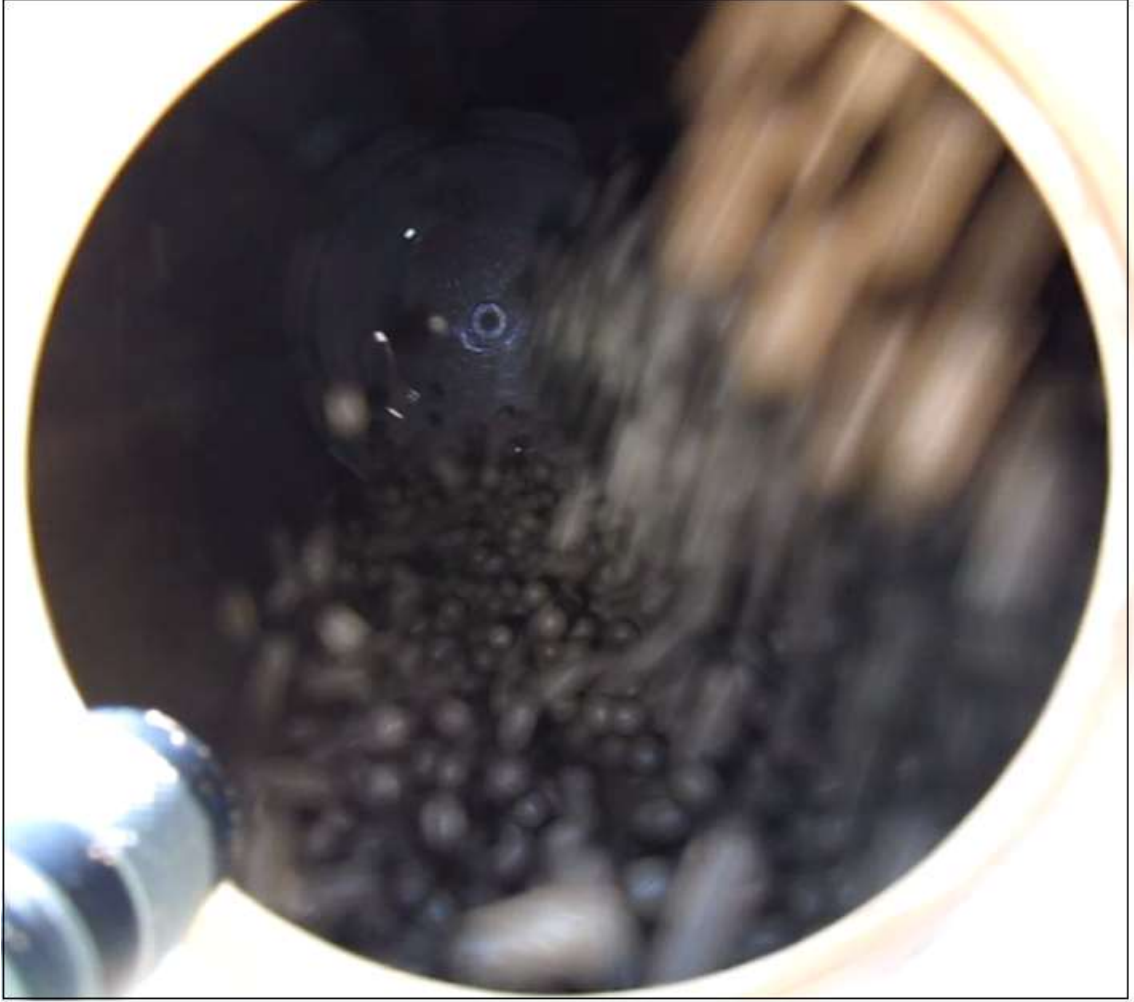


Şekil 4.6. 6. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.7. Plaka Tip 2 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (7. Deney)

Çizelge 4.7. 7. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,35
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	105
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,05



Şekil 4.7. 7. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.8. Plaka Tip 3 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (8. Deney)

Çizelge 4.8. 8. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,58
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	95
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,10



Şekil 4.8. 8. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.9. Plaka Tip 4 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (9. Deney)

Çizelge 4.9. 9. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,15
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	120
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	0,95

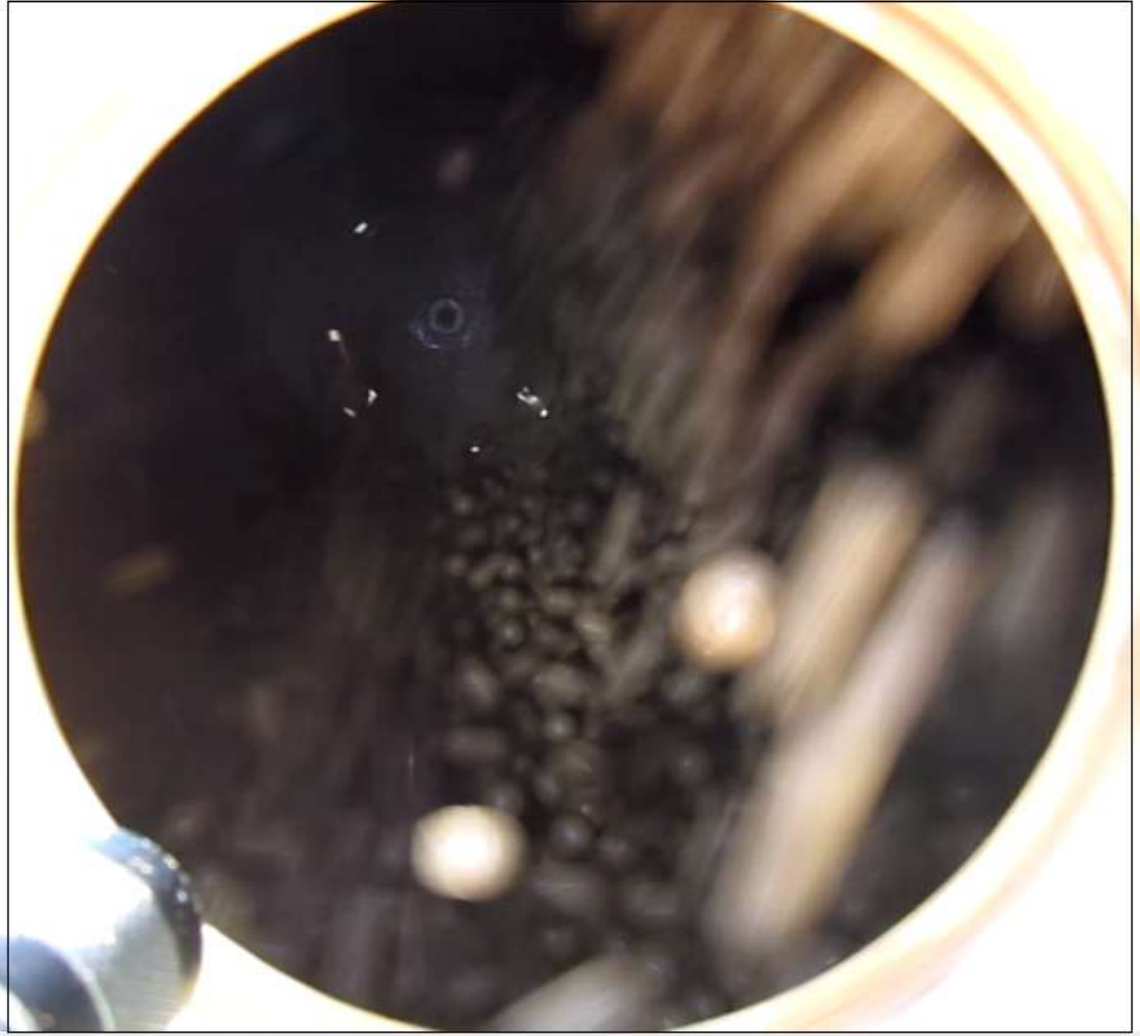


Şekil 4.9. 9. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.10. Plaka Tip 5 ile 40 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (10. Deney)

Çizelge 4.10. 10. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,72
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	80
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,40



Şekil 4.10. 10. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.11. Plaka Tip 1 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (11. Deney)

Çizelge 4.11. 11. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	3,09
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	110
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,80

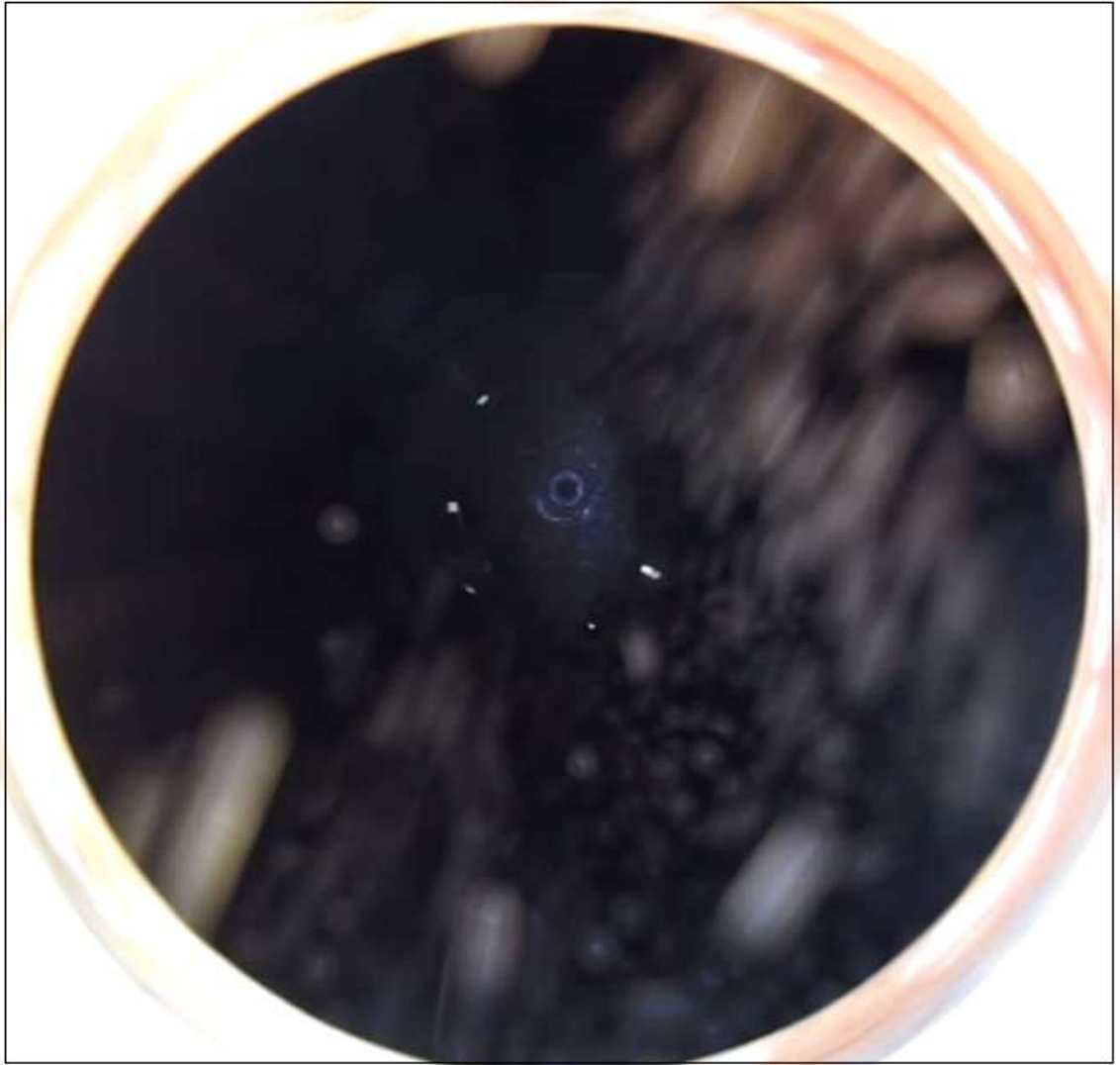


Şekil 4.11. 11. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.2.12. Plaka Tip 2 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (12. Deney)

Çizelge 4.12. 12. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,82
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	100
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	2,00

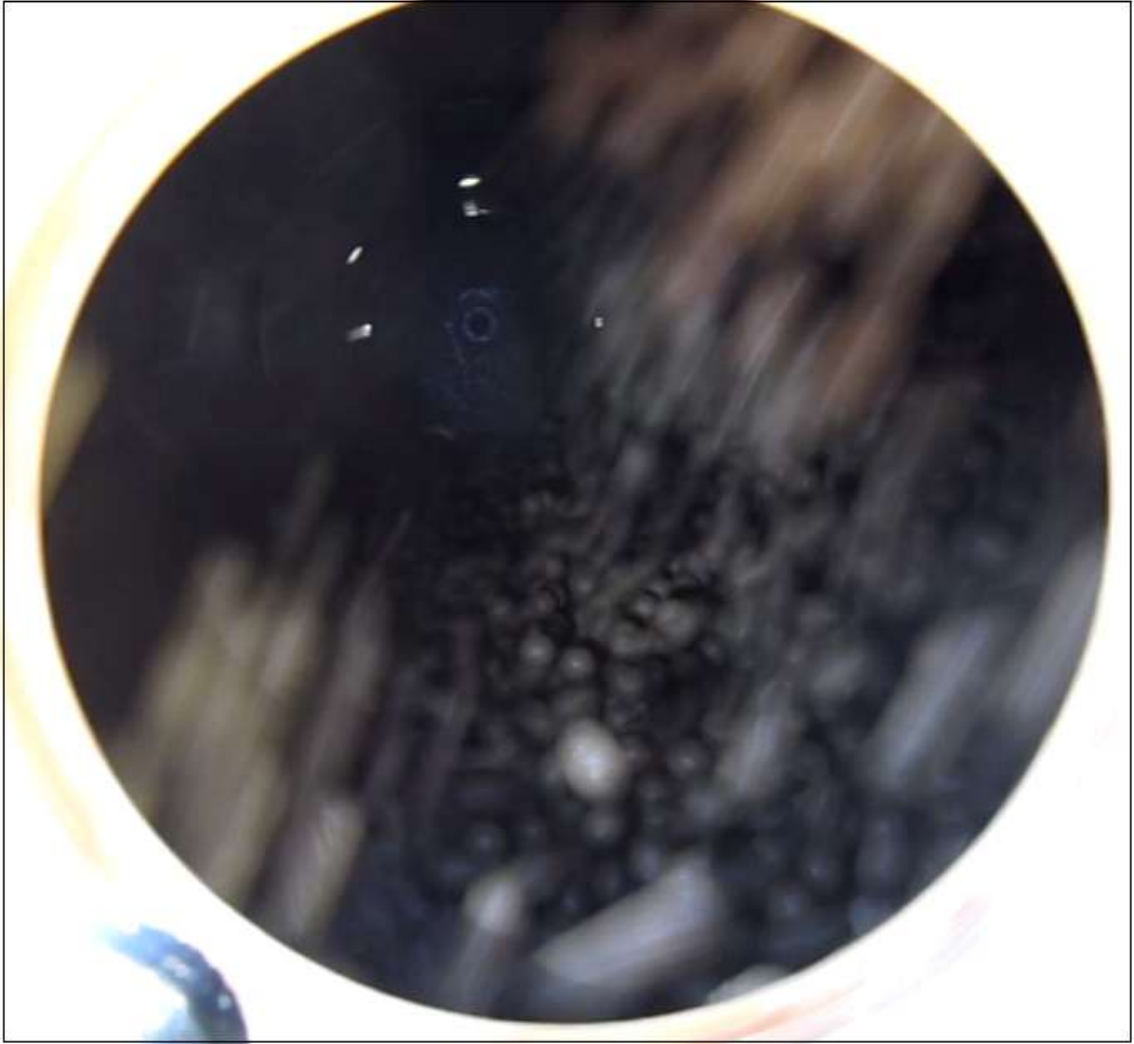


Şekil 4.12. 12. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.3.13. Plaka Tip 3 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (13. Deney)

Çizelge 4.13. 13. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	3,28
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	120
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	1,85



Şekil 4.13. 13. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.3.14. Plaka Tip 4 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (14. Deney)

Çizelge 4.14. 14. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	2,41
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	115
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	2,05

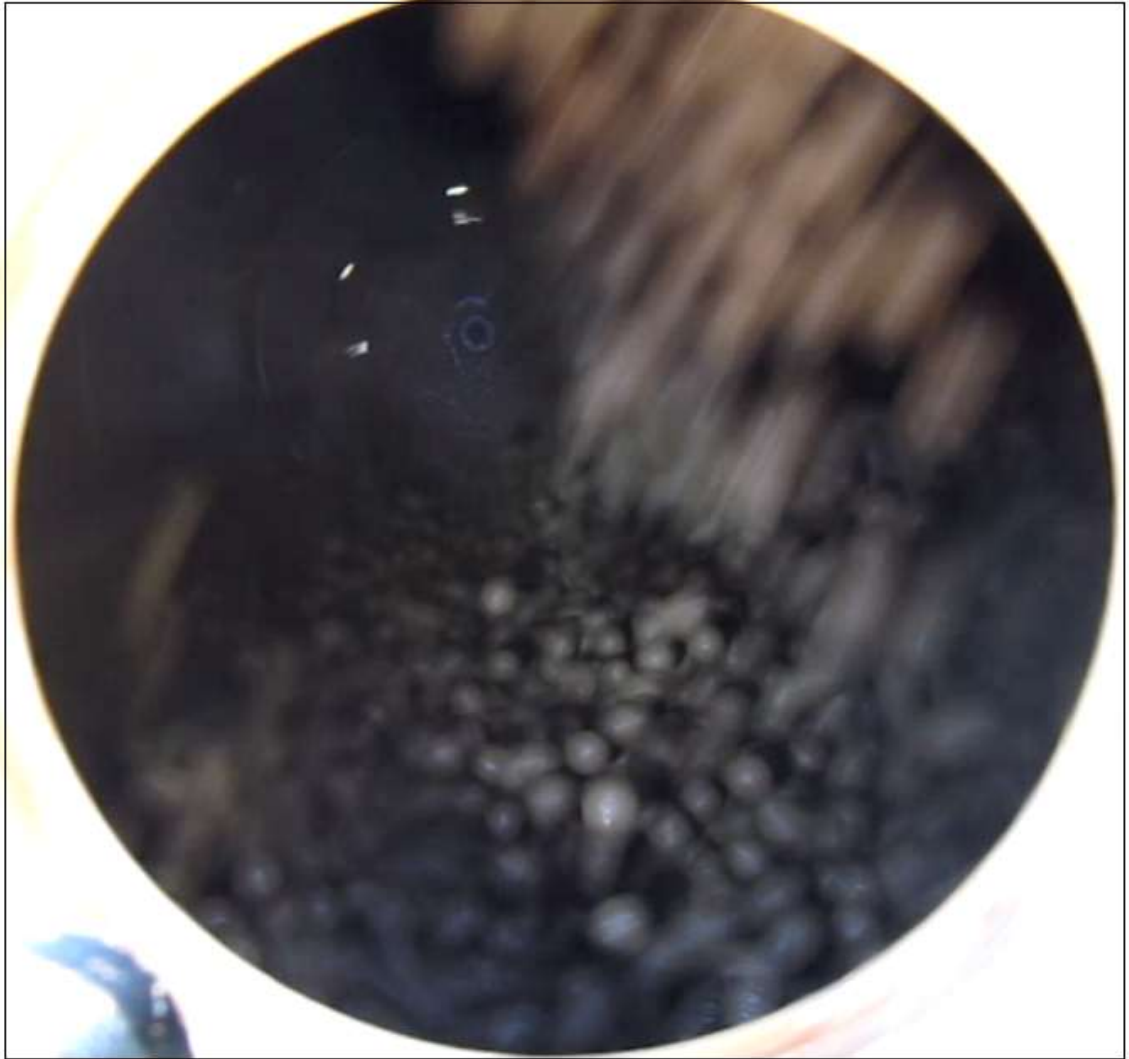


Şekil 4.14. 14. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü

4.3.15. Plaka Tip 5 ile 46 Devir / Dakika Hızda Öğütme Çemberinin Belirlenmesi Deneyi Bulguları (15. Deney)

Çizelge 4.15. 15. Deney sonuçları

	Bulgu
Öğütme Esnasında Tüketilen Enerji (kW)	3,90
Öğütme Sonrası Ürün Tanecik Boyutu (μ)	120
Öğütme Çemberi Dışında Kalan Bilya Oranı (%)	2,55



Şekil 4.15. 15. Deney esnasındaki anlık bilya hareketi görüntüsü



Şekil 4.16. Deneyler sonucunda öğütülmüş kromit



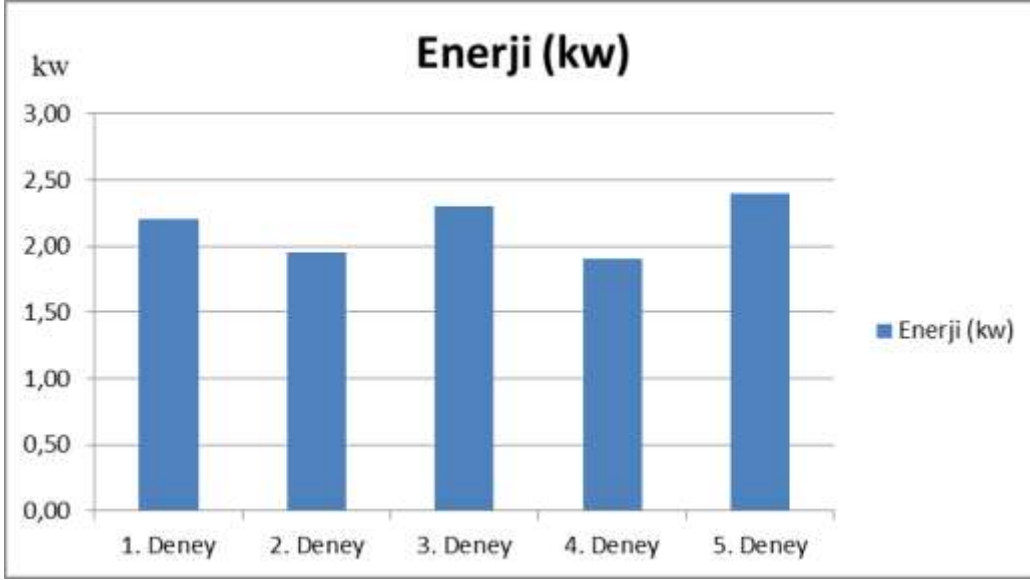
Şekil 4.17. Deneyler sonrası öğütülen malzemeden numune alınması

4.2. DENEY BULGULARININ KARŞILAŞTIRILMASI

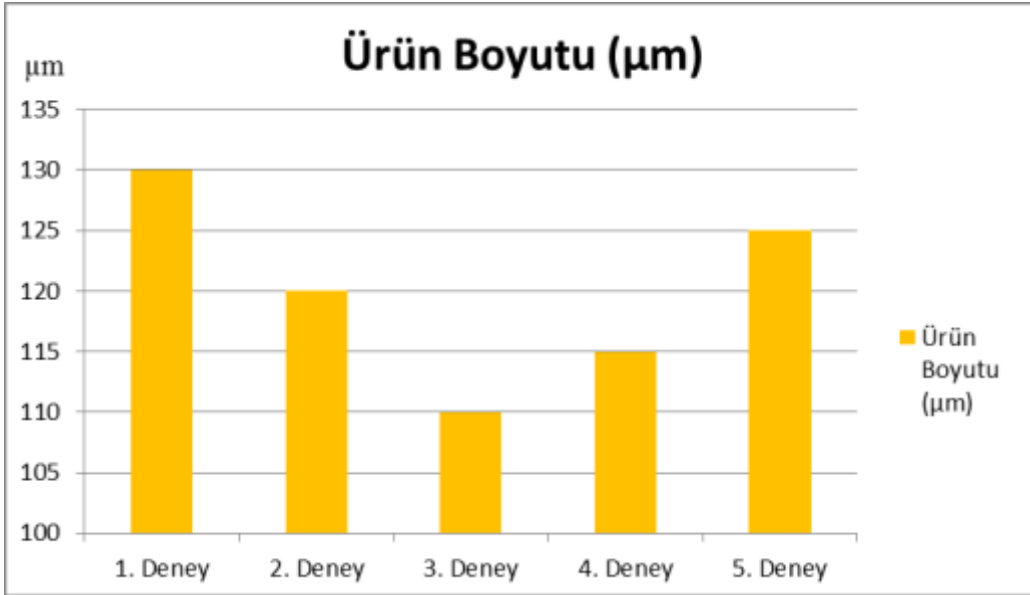
Çizelge 4.16. Yapılan deneylerdeki verilerin özet tablosu

Deney Sırası	Deneyde Kullanılan Plaka Tipi	Deneyde Kullanılan Plaka Tipi Özellikleri	Deney Hızı
1. Deney	Plaka Tip 1	Yükseklik: 40 mm Açı: 37°	34 devir / dakika % 60 Kritik hız
2. Deney	Plaka Tip 2	Yükseklik: 40 mm Açı: 20°	34 devir / dakika % 60 Kritik hız
3. Deney	Plaka Tip 3	Yükseklik: 40 mm Açı: 50°	34 devir / dakika % 60 Kritik hız
4. Deney	Plaka Tip 4	Yükseklik: 25 mm Açı: 37°	34 devir / dakika % 60 Kritik hız
5. Deney	Plaka Tip 5	Yükseklik: 55 mm Açı: 37°	34 devir / dakika % 60 Kritik hız
6. Deney	Plaka Tip 1	Yükseklik: 40 mm Açı: 37°	40 devir / dakika % 70 Kritik hız
7. Deney	Plaka Tip 2	Yükseklik: 40 mm Açı: 20°	40 devir / dakika % 70 Kritik hız
8. Deney	Plaka Tip 3	Yükseklik: 40 mm Açı: 50°	40 devir / dakika % 70 Kritik hız
9. Deney	Plaka Tip 4	Yükseklik: 25 mm Açı: 37°	40 devir / dakika % 70 Kritik hız
10. Deney	Plaka Tip 5	Yükseklik: 55 mm Açı: 37°	40 devir / dakika % 70 Kritik hız
11. Deney	Plaka Tip 1	Yükseklik: 40 mm Açı: 37°	46 devir / dakika % 80 Kritik hız
12. Deney	Plaka Tip 2	Yükseklik: 40 mm Açı: 20°	46 devir / dakika % 80 Kritik hız
13. Deney	Plaka Tip 3	Yükseklik: 40 mm Açı: 50°	46 devir / dakika % 80 Kritik hız
14. Deney	Plaka Tip 4	Yükseklik: 25 mm Açı: 37°	46 devir / dakika % 80 Kritik hız
15. Deney	Plaka Tip 5	Yükseklik: 55 mm Açı: 37°	46 devir / dakika % 80 Kritik hız

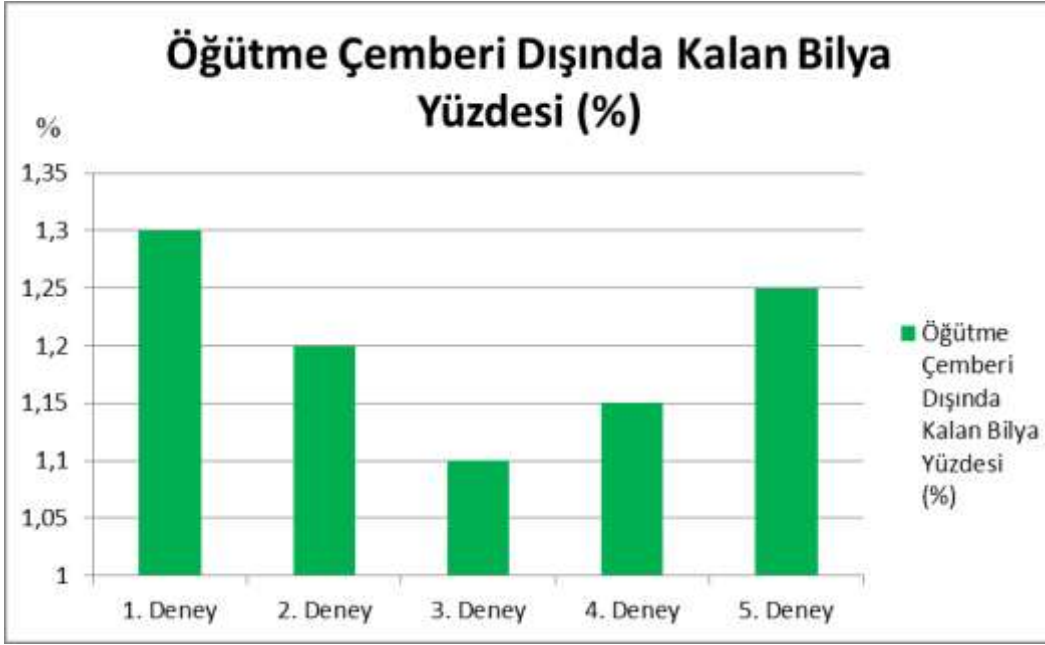
4.2.1. 34 Devir / Dakika'da (% 60 Kritik Hız) Deneysel Bulgularının Karşılaştırılması



Şekil 4.18. 34 devir/dakika hızda (%60 kritik hız) enerji tüketim tablosu

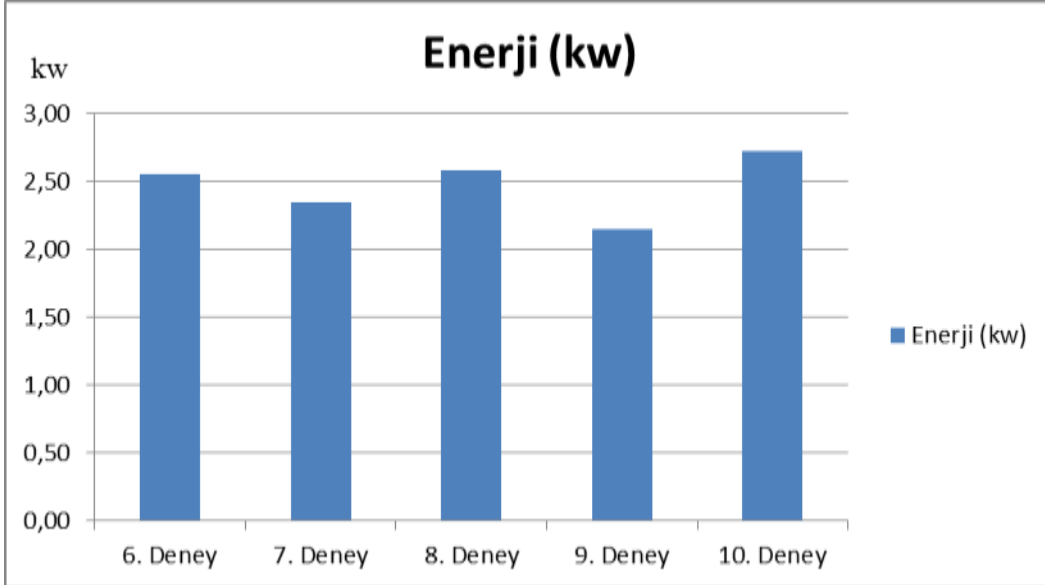


Şekil 4.19. 34 devir/dakika hızda (%60 kritik hız) ürün boyutu tablosu

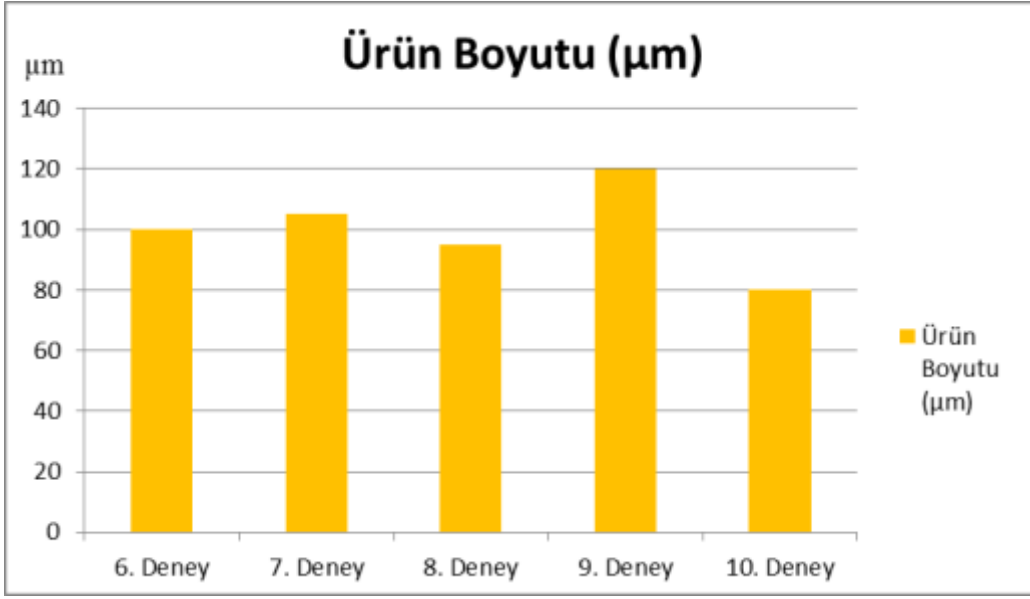


Şekil 4.20. 34 devir/dakika hızda (%60 kritik hız) öğütme çemberi dışında kalan bilya yüzdesi

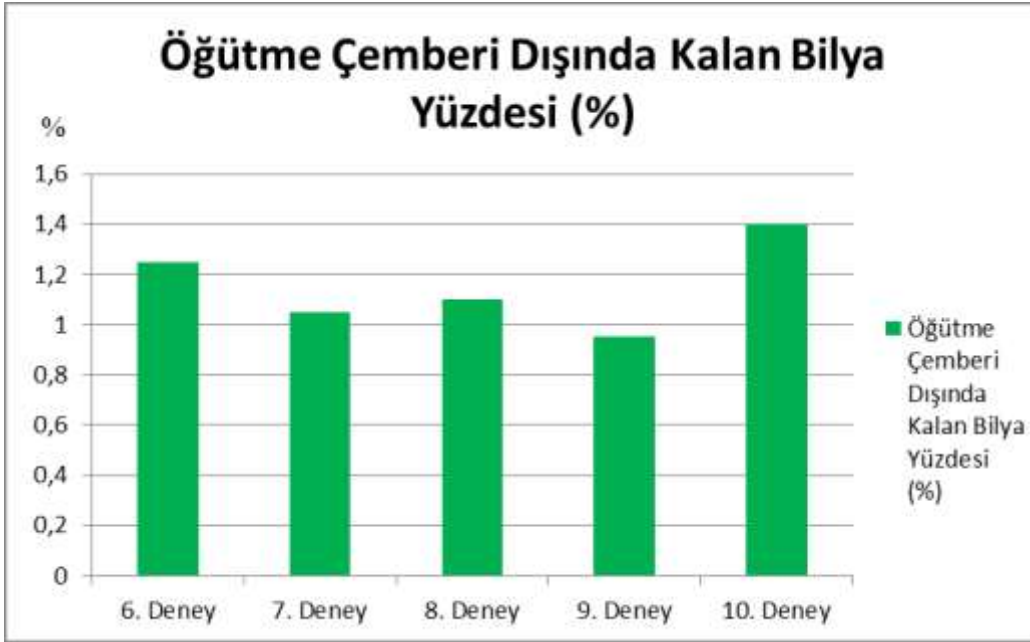
4.2.2. 40 Devir / Dakika'da (% 70 Kritik Hız) Deneş Bulgularının Karşılaştırılması



Şekil 4.21. 40 devir/dakika hızda (%70 kritik hız) enerji tüketim tablosu

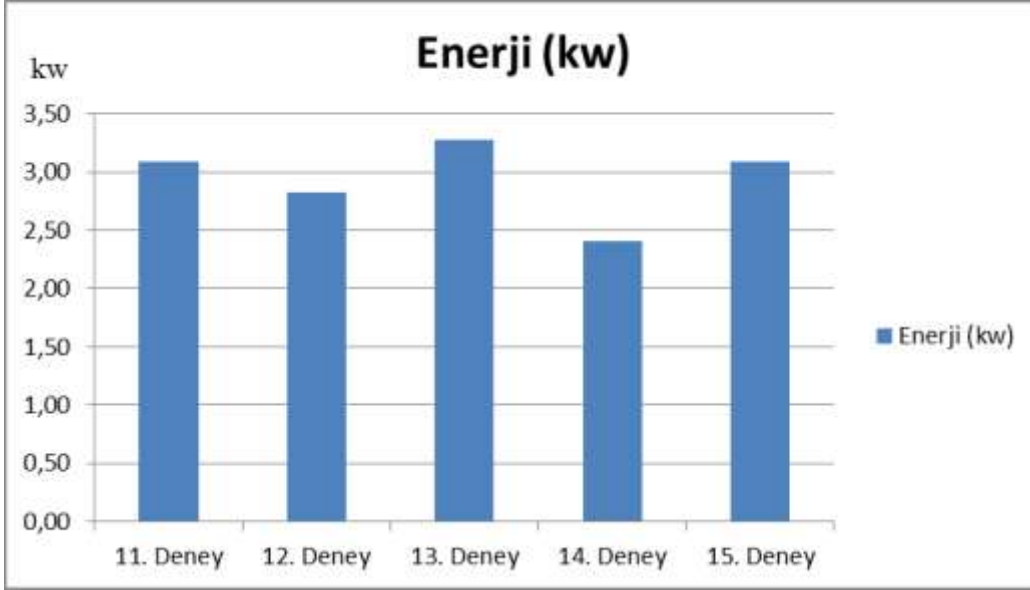


Şekil 4.22. 40 devir/dakika hızda (%60 kritik hız) ürün boyutu tablosu

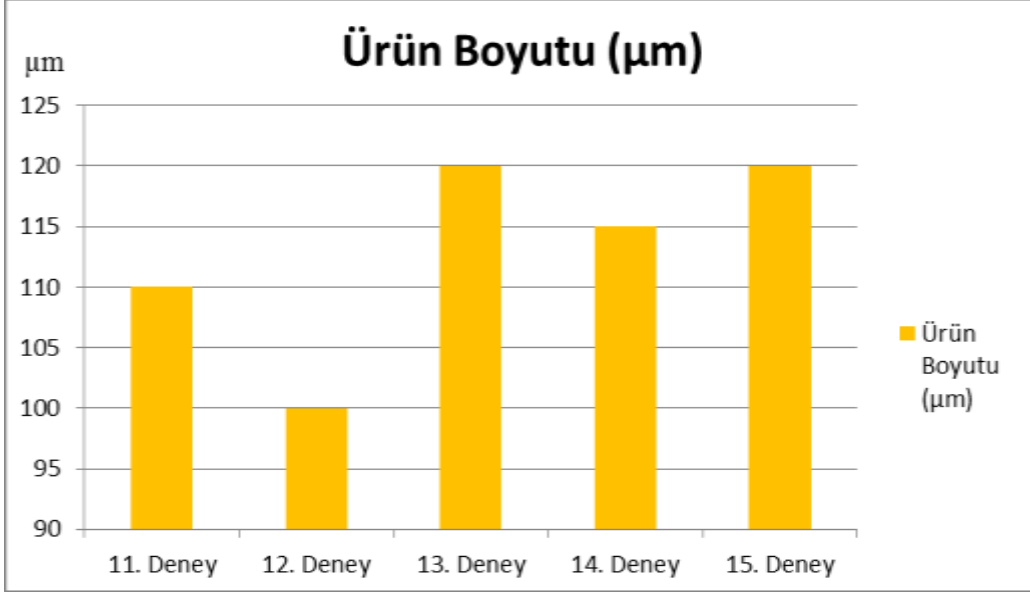


Şekil 4.23. 40 devir/dakika hızda (%70 kritik hız) öğütme çemberi dışında kalan bilya yüzdesi

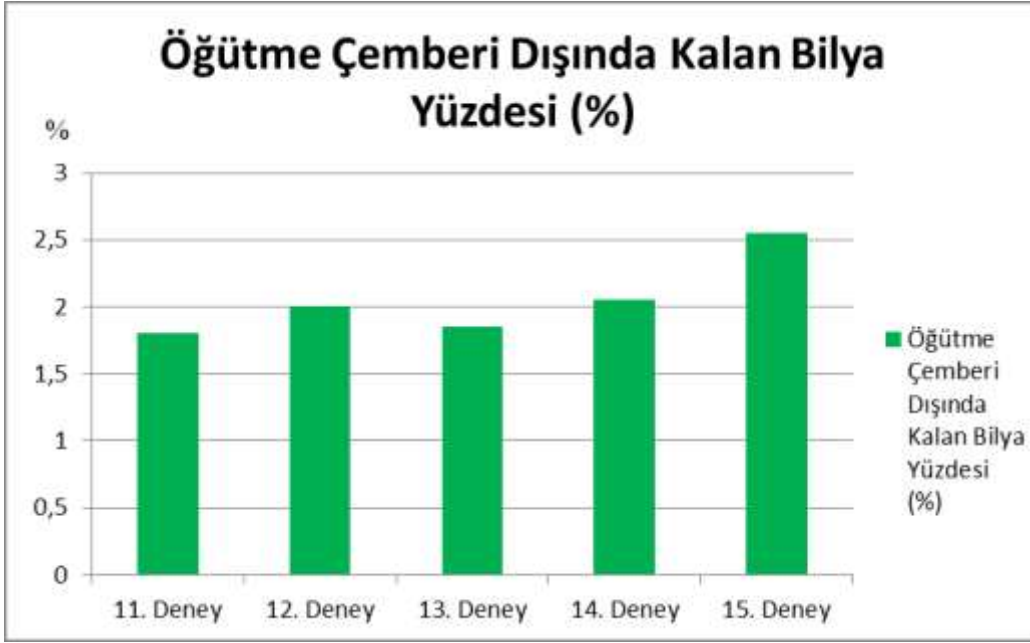
4.2.3. 46 Devir / Dakika'da (% 80 Kritik Hız) Deneysel Bulgularının Karşılaştırılması



Şekil 4.24. 46 devir/dakika hızda (%80 kritik hız) enerji tüketim tablosu

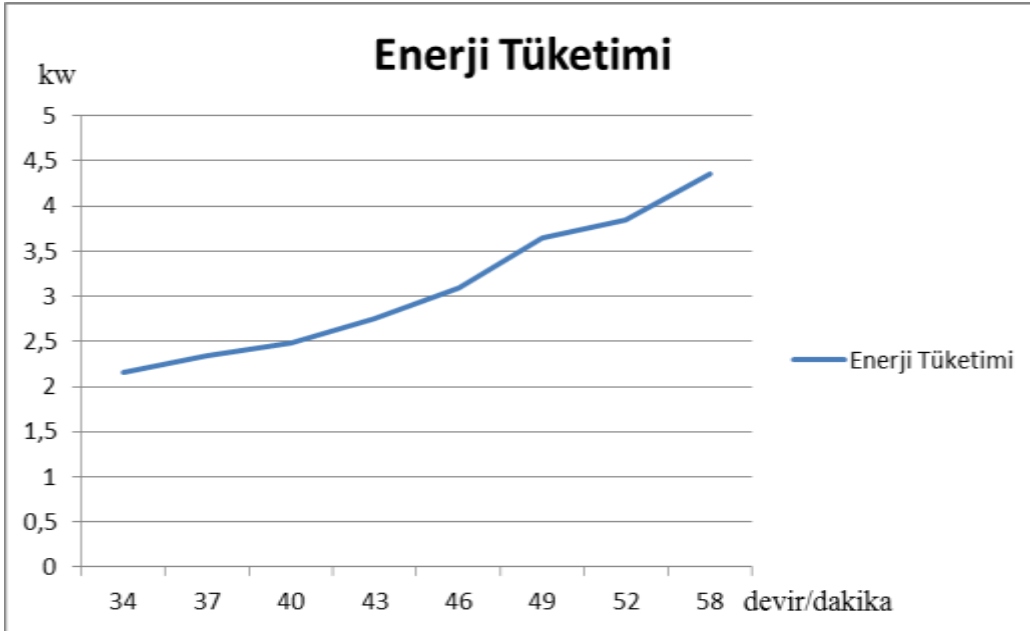


Şekil 4.25. 46 devir/dakika hızda (%80 kritik hız) ürün boyutu tablosu



Şekil 4.26. 46 devir/dakika hızda (%80 kritik hız) öğütme çemberi dışında kalan bilya yüzdesi

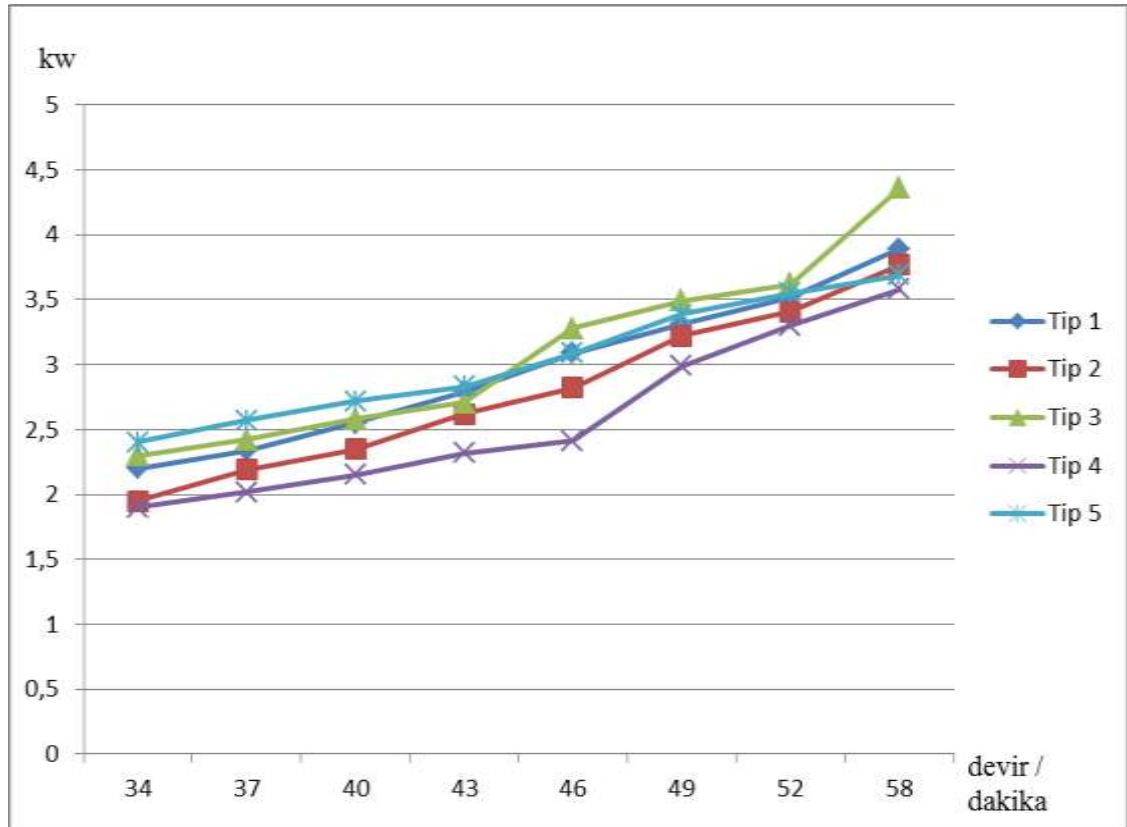
4.2.4. Hızın Enerji Tüketimine Olan Etkisinin İncelenmesi



Şekil 4.27. Hız ile ortalama enerji tüketimi karşılaştırılması

Çalışma esnasında değirmen hızını arttırdıkça tüketilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür. 51,50 devir/dakika hızda (%90 kritik hız) motor gücü olan 4 kW / saat enerjinin tamamı tüketilmektedir. Kritik hız olan 57,3 devir / dakika'ya (%100) ulaşıldığında ise enerji tüketiminin 4,36 kW / saat olduğu gözlenmiştir.

En az enerji tüketiminin 1,90 kW / saat ile 4. deneyde gözlemlenmiştir. Fakat bu deney sonucu elde edilen ürün 130 µm boyutundadır ve bu boyut yapılan bütün deneyler içerisinde en verimsiz sonuçtur. Aynı şekilde 2. deneyde tüketilen enerji miktarı 4. deneyden sonraki en az enerji harcanan deneydir ve bu deney sonucunda da elde edilen ürün boyutu 125 µm olup, yapılan deneyler içerisinde en verimsiz sonuçlardan bir tanesidir. 34 devir /dakika hızda öğütmenin verimsiz olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.28. Plaka tiplerinin çeşitli hızlarda enerji tüketimleri

Plaka tasarımı olarak 4. deney ile 9. deney (Plaka Tip 4) ve 2. deney ile 7. deney (Plaka Tip 2) birebir aynıdır. 40 devir/dakika hızda (%70 kritik hız) yapılan deneylerden elde edilen sonuçlardan en az enerji tüketen fakat en verimsiz deneyler sırasıyla, 9. deney ve 7. deneylerdir. 46 devir / dakika hızla (% 80 kritik hız) dönen değirmen için ise durum biraz farklıdır. Plaka Tip 4 ve Plaka Tip 2 ile yapılan 14. ve 12. deneylerde 46 devir / dakika hız için en az enerji tüketilmesine rağmen, 34 devir / dakika ve 40 devir / dakika hızlardaki gibi en kötü performansı sergileyen deneyler olmamıştır. Buradan çıkarılan sonuç; plaka tasarımının uygun olmadığı durumlarda değirmen hızının artması öğütme verimini olumlu etkileyebilir. Ayrıca plaka tasarımı için açının ve yüksekliğin düşük olması bilyaların yeterince yükselemediği dolayısıyla öğütmenin verimli olmadığına işaret etmektedir.

Yapılan deneyler içerisinde öğütmenin en fazla yapıldığı deneyler 40 devir / dakika yani % 70 kritik hızla yapılan deneyler olmuştur. Bu sınıfta yapılan 9. deneyde öğütme çemberi dışında kalan bilya oranını diğer bütün deneylere göre en azdır. Bu durum plaka aşınmasının en az olduğu tasarımın düşük yükseklikli plaka tasarımına işaret etmektedir.

4.2.5. Hızın Ürün Boyutuna Olan Etkisinin İncelenmesi

Yapılan deneylerde değirmen hızı ile öğütülen malzeme tanecik boyutu arasında doğrusal orantı olmadığı gözlenmiştir. Değirmen hızı arttıkça öğütme kapasitesinin nominal değere kadar yükseldiği, bu nominal değerden sonra değirmenin hızı arttıkça öğütme kapasitenin düştüğü gözlenmiştir. Yapılan deneylerde sistem için en uygun hızın 46 devir / dakika yani kritik hızın % 70'i olduğu gözlenmiştir. Hızın 46 devir / dakika yani % 80 kritik hız olması durumunda bilyaların savrulduğu ve öğütme çemberi dışında kaldığı gözlenmiştir. Bu sebeple değirmenin öğütme kapasitesi düşmüştür.

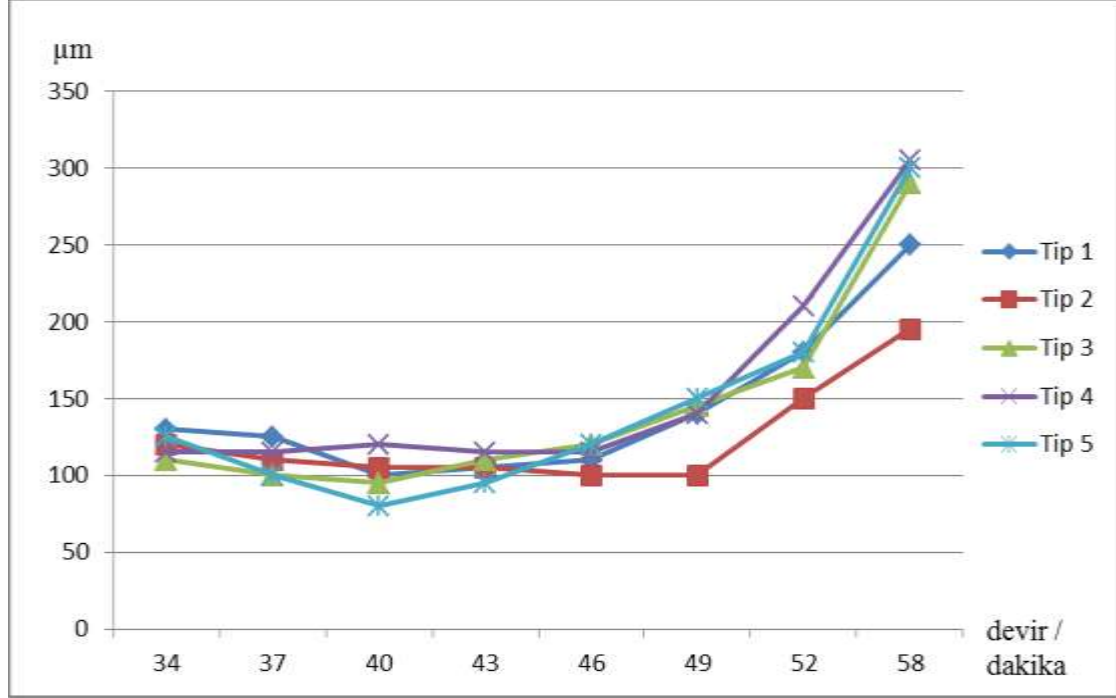


Şekil 4.29. Hız ile ortalama ürün boyutu karşılaştırılması

Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi ürün boyutu 40 devir / dakika'ya ulaşıncaya kadar azalmaktadır. Bu hızdan sonra devrin daha da yükselmesi ürün boyutuna dolayısıyla öğütme kapasitesine olumsuz olarak yansımıştır. 37 devir / dakika hız ile 49 devir / dakika hızda aynı tanecik boyutunda ürünler öğütülmüştür. 37 devir / dakika hız ile öğütmenin, 49 devir / dakika hız ile öğütmeye göre enerji tüketimi ve plaka sarfiyatı açısından daha verimli olduğu düşünülecek olursa, aynı öğütmenin daha ekonomik yollardan yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

En uygun tanecik boyutu 80 µm ile 10. deneyde elde edilmiştir. Fakat deneydeki diğer değişkenler olan enerji tüketimi ve öğütme çemberi dışında kalan bilya oranı en fazla bu deneydedir. Aynı plaka tasarımı olan Plaka Tip 5 ile yapılan 5. deney ve 15. deney incelendiğinde; 34 devir / dakika ve 46 devir / dakika hız ile yapılan 10 deney içinde en fazla enerji tüketimi ve en fazla öğütme çemberi dışında kalan bilya oranlarının 5. ve 15. deneylerde meydana geldiği görülmektedir. Fakat buna karşın öğütülen malzeme kalitesi 10. deneydeki gibi kendi hız sınıfındaki deneyler içerisinde en iyi değildir. Buradan doğru plaka tasarımının uygun hızda çalıştırılmadığı takdirde

öğütme veriminin düştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Çünkü aynı plaka tasarımı 40 devir / dakika hızla çalıştırıldığı zaman çok verimli bir öğütme yapmıştır.

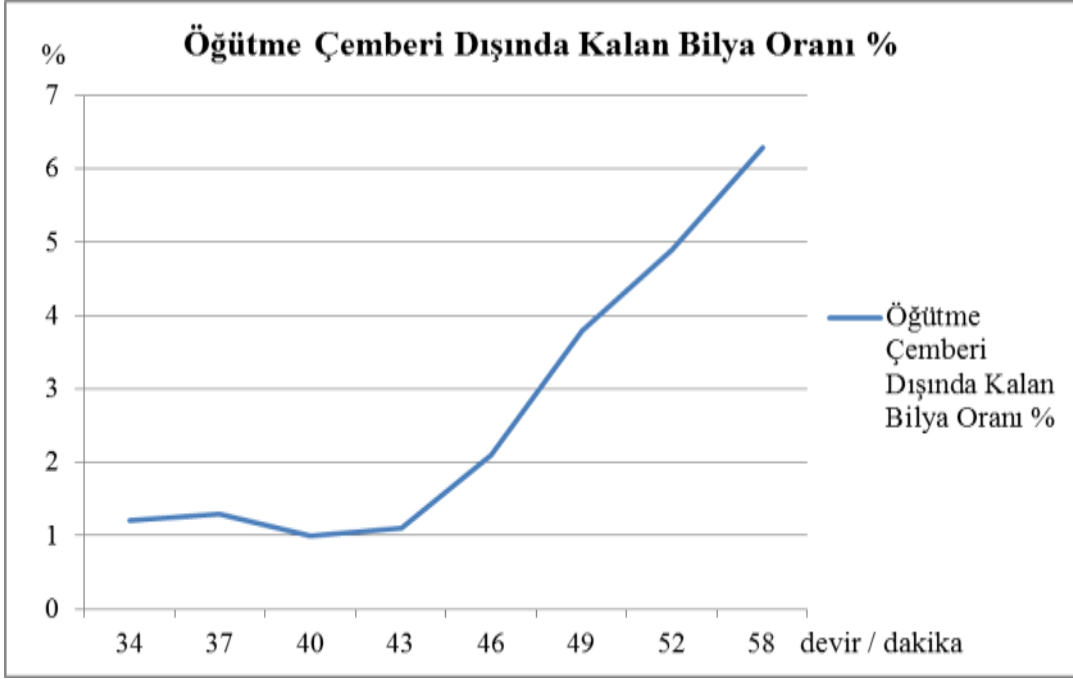


Şekil 4.30. Plaka tiplerinin değişken hızlardaki öğütmiş oldukları ürün boyutları

En uygun tanecik boyutunun elde edildiği 10. deney göz önüne alınırsa, hız sabit kalmak kaydıyla daha küçük tanecik boyutunu elde etmek için plaka yüksekliğinin ve açısının artması gerektiği sonucuna ulaşılır. Böylelikle öğütme çemberi optimum düzeyde gerçekleşecektir.

Ürün boyutu açısından en verimsiz deney, enerji tüketimi açısından bütün deneyler en az enerji tüketen deney olarak sonuçlanan 4. deneydir. 4. deneyin gözlenen handikapı taşıyıcı plaka yüksekliğinin düşük olmasıdır. Böyle bir durumda öğütme belirli sınırlar dahilinde yapılmaktadır. İşletme ihtiyaçları da göz önüne alınarak öğütülen malzemenin tanecik boyutu yeterli ise enerji tasarrufu açısından en uygun tasarımın plaka yüksekliğinin düşük olduğu plaka tasarımı olduğu sonucuna varılmıştır.

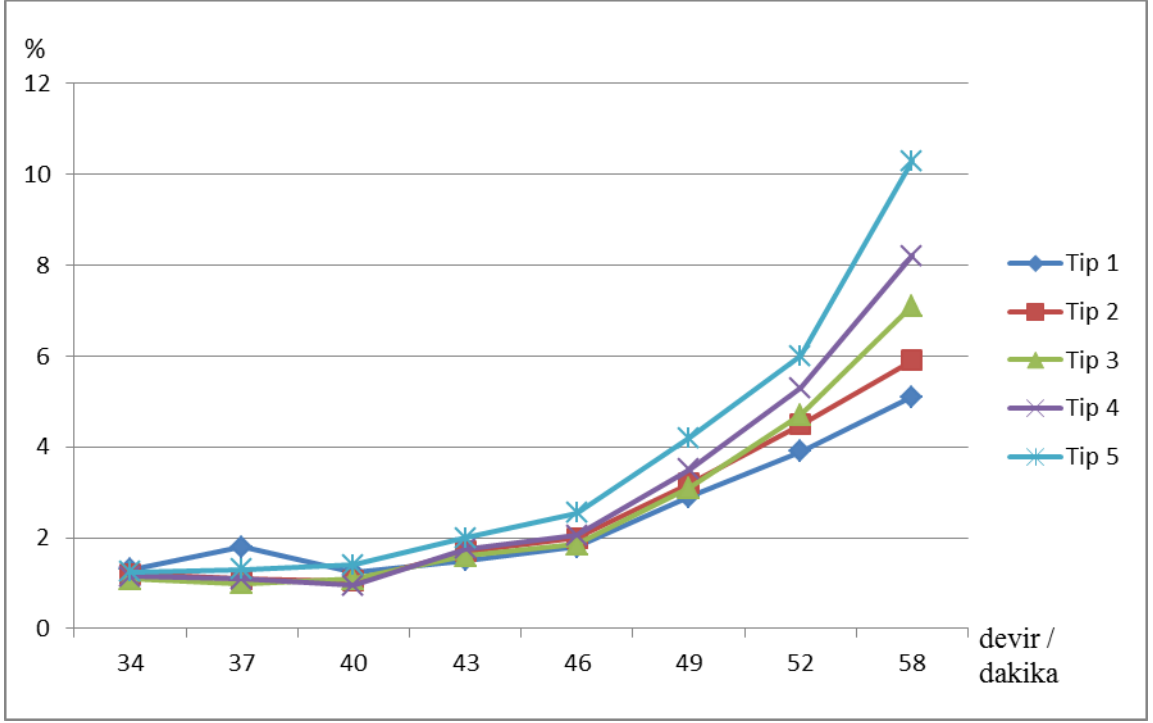
4.2.6. Hız ile Öğütme Çemberi Karşılaştırılması



Şekil 4.31. Hız ile öğütme çemberi karşılaştırılması

Öğütme çemberi belirlenmesi için değirmen 34 devir / dakika hız ile 46 devir / dakika arasında döndürülmüştür. Deneylerin ardından 46 devir / dakika hızın üzerine çıkılarak sistem 58 devir / dakika kritik hıza kadar döndürülmüştür.

Öğütme çemberi dışında kalan bilya oranı en az 9. deney de gözlemlenmiştir. Bu oranın en fazla olduğu deney ise % 2,55 oranla 15. deneydir. 46 devir / dakika yani % 80 kritik hızla yapılan deneylerin hepsinde öğütme çemberi dışında kalan bilya oranlarının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Buradan, değirmen hızının optimum çalışma hızını geçtikten sonra bilyaların öğütme çemberi dışına çıkma olasılığının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Zaten deneylerin ardından hızın kritik hıza kadar yükseltilmesi ile hızın artması ile birlikte bilyaların savrulduğu sonucu Şekil 4.14.'de görülmektedir. Hızın sabit kaldığı düşülüp, plaka yüksekliğinin 55 mm olduğu Plaka Tip 3 ile yapılan deneylerde öğütme çemberi dışına çıkan bilya oranının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.32. Plaka tiplerinin değişken hızlardaki öğütme çemberi dışında kalan bilya yüzdesine etkileri

Bununla birlikte Şekil 4.15.'te görüldüğü üzere plaka taşıyıcı plaka yüksekliğinin artması ile öğütme çemberi dışında kalan bilya oranının arttığı sonucuna varılmıştır. Bu durumun en önemli kanıtı 5. deneyde öğütmenin en verimli olmasına karşılık, taşıyıcı plaka yüksekliğinin fazla olmasından dolayı öğütme çemberi dışarısına çıkan bilya oranının yüksek olmasıdır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan deneylerde incelenen faktörlerden biri olan değirmen dönüş hızının bilyaların daha yüksek noktaya çıkmasında etken rol oynadığı gözlenmiştir. Bu durum kritik hıza kadar öğütme kapasitesini arttırmıştır. Fakat bu hız işletme ihtiyacından daha yüksek olursa bilyaların savrulduğu ve öğütücü malzemeye temas etmeden doğrudan plakaya vurduğu tespit edilmiştir. Bu durum plaka aşınma süresini arttıracığından istenen bir durum değildir. Çalışmada yapılan her deney için incelen ortak bulgu öğütme çemberinin durumudur. Değirmen dönüşünde bilyalar kütesinden dolayı öğütülen malzemedan daha yükseğe taşınabilirler. Fakat öğütme çemberinin verimli olması ve yükselen bilyanın doğrudan plaka üzerinde düşmemesi için öğütülen malzemenin alt noktasının her zaman öğüten malzemenin alt noktasından daha geride olması gerekmektedir. Taşıyıcı plaka yüksekliğinin ve açısının optimum seviye kadar artması enerji tüketimini arttırmaktadır fakat bununla birlikte öğütme kapasitesi de artmaktadır. Optimum seviyeden sonra artış yapılan plaka yüksekliği ve açısı plakaların daha fazla bilya çevirmesinden dolayı enerji tüketimini arttırmaktadır. Fakat bu bilyaların bir kısmı öğütülen malzeme ile temas etmediği için gereksiz yere taşınmış anlamını kazanmaktadır.

Yapılan deneyler içerisinde en verimli öğütmelerin gözleendiği deneyler 6. deney, 7. deney ve 8. deney olduğu görülmüştür. Her üç deney de 40 devir / dakika hızda yani % 70 kritik hızda yapılan deneylerdir. Deneysel düzenek, mevcut değirmene model olarak yapılmıştır. Değirmenin % 60 olan kritik hız olan dönüş hızı, % 70 olarak değiştirilmesi gerektiği kanaatine varılmıştır. Bu kapsamda sisteme hız kontrol cihazı montajı ya da değirmen tahrik grubu revizyonu gerekebilir. Fayda maliyet analizi yapılarak çıkacak sonuca göre sistemde revizyon yapılabilir.

Bu çalışmadan, mevcut sistem için % 70 kritik hızın % 60 kritik hıza göre daha uygun olacağı ve daha verimli öğütme yapılabileceği sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca

sistemde kullanılan 37 ° plaka açısı ve 40 mm yüksekliğe sahip Plaka Tip 1 çevre plakasının yerine, ürün çıkış boyutunun daha küçük olduğu Plaka Tip 3'ün kullanılması daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

Bu deneyler bilyalı değirmen tasarımı yaparken değirmen hızının öğütebilirlik açısından en önemli faktörlerden birisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kötü bir plaka tasarımının uygun bir değirmen hızı ile belirli bir noktaya kadar giderilebileceği gözlemlenmiştir. Bunun tersi olarak iyi bir plaka tasarımının uygun değirmen hızında çalıştırıldığında verimsiz öğütme yaptığı görülmüştür. Değirmen tasarımında imalat esnasında plaka tasarımının işletme koşullarına göre optimum düzeyde belirlenmesi gerekmektedir. İyi bir plaka tasarımının uygun değirmen hızı ile çalıştırılması en verimli sonuçları vermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Ağaçayak, T., “Topraktepe (Yeşildağ – Beyşehir – Konya) Kromitlerinin Araştırma Yöntemlerinin Araştırılması”, Selçuk Üniversitesi Yayınları, 3-4 s., (2004).
- [2] Çakmak, İ., “Elazığ-Guleman Yöresi Kromit Cevheri Yataklarının Analizi ve Analiz Sonuçlarına Göre Kullanım Alanlarının Araştırılması” Fırat Üniversitesi Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi, 20 s., (2006).
- [3] Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), “Sekizinci 5 Yıllık Kalkınma Planı” Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Metal Madenler Alt Komisyonu Krom Çalışma Grubu Raporu, , 8 s., (2001).
- [4] Çayırılı, N., “Farklı Tür Pomzaların Kesikli Öğütme Ortamındaki Davranışların İncelenmesi ve Modellenmesi” Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 25-32 s., (2008).
- [5] Akçiçek, N., “Bilyalı Değirmenlerde Bazı Öğütme Parametrelerinin Modellenmesi ve Optimizasyonu” Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 10 s., (2007).
- [6] Wills, B.A., “Mineral Processing Technology” Sixth Edition Pregmon International Library, 142 s., (1997).
- [7] Austin, L., G., “A Commentary on the Kick, Bond and Rittinger Laws of Grinding”, Powder Technology Volume 7, 315-317, (1973).
- [8] Demirel, H., “Cevher Hazırlama El Kitabı”, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları, 58- 61, (1994).
- [9] Karadeniz, M., “Cevher Zenginleştirme Tesis Artıklarının Çevreye Etkileri ve Önlemleri”, MTA Genel Müdürlüğü MAT Daire Başkanlığı Cevher Zenginleştirme Servisi Raporu, Ankara, 41 s., (1996).

- [10] Metso Minerals Company, “Rod Mill”, [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/38EE207BADF4A973C1256C5A002DB313/\\$File/Rod%20Mill%20EN.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/38EE207BADF4A973C1256C5A002DB313/$File/Rod%20Mill%20EN.pdf), (26.06.2013).
- [11] Yüce, E., “Boyut Küçültme ve Sınıflandırma Teknolojisi, Yenilikler ve Proses Maliyetlerini Etkileri Kurs Notları”, YMGV Yayını, 6s., (2008).
- [12] Riera, X., Schaefer, H., U., “Optimization Of Mills For Energy Savings” Christian Pfeiffer Company Sharjah Cement U.A.E. Working Report, 2 s., (2005).
- [13] Yıldız, N., “Cevher Hazırlama”, Ertem Basım ve Yayım Dağıtım Sanayi, 50 s., (2007).
- [14] Outotec Company, “Grinding Technologies”, Outotec Oyj. Press, 9 s., (2012).
- [15] Pilevneli, C. C., “Bilyalı Bir Karıştırmalı Değirmende İnce Boyutlu Klinker Öğütmesinin İncelenmesi”, Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Tezi, 159 s., (2003).
- [16] Gebr. Pfeiffer Company, “Operating Experience With The Pfeiffer MVR Vertical Roller Mill And The MultiDrive”, <http://www.gpse.de/index.php?id=327&L=1>, (2013).
- [17] Aydoğan, N., Ergün, L., “Yüksek Basınçlı Merdaneli Değirmenler”, Maden Mühendisleri Odası Madencilik Dergisi, Sayı:3, 27s., (2004).
- [18] Patzelt, N., “High Pressure Grinding Rollers a Survey of Experience”, IEEE Cement Industry Technical Conference, Texas, 180 s., (1992).
- [19] Falzıoğlu, H., “İnce Ve Çok İnce Öğütme İçin Alternatif Değirmen Tiplerinin Tanıtılması”, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2009-01, 17-30 s., (2009).
- [20] Szegvari, A., Yang, M., “Attritor Grinding and Dispersing Equipment”, Union Process Inc. Akron, 5 s., (1999).
- [21] MAR Machinery Company, “Agitated Media Mill”, Product Catalogue, <http://www.machineryautomation.com.au/applications/processing/blending/grinding/>, (2012).

- [22] Yıldız, N., “Cevher Hazırlama”, Ertem Basım ve Yayım Dağıtım Sanayi, 53-55, (2007).
- [23] Sturtevant Inc., “Contamination – Free Milling”, Product Catalogue, <http://www.sturtevantinc.com/articles/articles7.php>, (2004).
- [24] General Kinematics, “Grinding, Crushing, and Leaching Solutions”, <http://www.generalkinematics.com/mining-equipment/grinding-mill/>, (2013).
- [25] Ding, J., Tsuzuki, T., Cormick, P.G., “Mechanochemical Synthesis of Ultrafine ZrO₂ Powder”, *Nanostructure Materials*, 8(1): 75-81, (1997).
- [26] MTI Corporation, “Bench Top Planetary Automatic Ball Mill”, <http://www.mtixtl.com/bench-topplanetaryautomaticballmillswith4aluminajars-m-sk-sfm-1.aspx>, (2012).
- [27] Hoyer, D., I., Boyes, J., M., “High Intensity Fine and Ultra Fine Grinding in the Hicom Mill”, *Proceeding of the VXth CMMI Congress SAIMM, Johannesburg*, 435-441, (1994).
- [28] Hicom International, “High Intensity Grinding Mills”, *Hicom Technical Papers*, 2 s., (2012).
- [29] Canbazoğlu, M., Cebeci, Y., Aslan, N. “Cevher Hazırlama-Zenginleştirme Problemleri ve Çözümleri” *Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları Yayın No: 50, 17s.*, (2002).
- [30] Polysius Company, “Tube Mills For Dry Grindings”, *ThyssenKrupp Press*, 5 s., (2010).
- [31] Lolschou, P., K., “Ball Mill Maintenance Seminar”, *FLSMIDTH Institute Press*, 23 s., (2004).
- [32] Elmofty, S., “Lecture Notes of Material Technology, Part-2 Grinding.” *Mining and Environmental Engineering Department of Cairo University Publish*, 18 s., (2004).
- [33] Christian Pfeiffer Company, “ Mill Shell Lining”, http://www.christianpfeiffer.net/fileadmin/user_upload/downloads/brochures/cpb-brochure-liner-en.pdf, (2013).

- [34] FLSmidth Company, “Ball Mill for Cement Grinding”, FLSmidth Institute Press, 4-5, (2010).
- [35] Powell, M.S., Smit, I., Radziszewski, P., Cleary, P., Rattray, B., Eriksson, K. G., Schaeffer, L., “Advances in Comminution- The Selection and Design of Mill Liners”, Colorado, (Editör: Kawatra, S.), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 331-376, (2006).
- [36] McIvor, R.E., “Effects of Speed and Liner Configuration on Ball Mill Performance.”, Mining Engineering Volume:35, No:6, 617-622, (1983).
- [37] Outotec Company, “Ball Mill Operation and Maintenance Seminar Notes”, Outotec Oyj. Press, 38 s., (2010).
- [38] Deya Mining Company, “Ball Mill Working Principle”, <http://www.deyamining.com/ball-mill-working-principle/>, (2013).
- [39] Rattary, B., “Mill Liner Evolutions in Recent Times”, Proceeding of Seventh Mill Operators Conference, Kalgoorlie, Australia, 57-62, (2000).
- [40] Kendrick, M. J. And Marsden, J. O., “Candelaria Post Expansion Evolution of Sag Miller Design and Milling Performance”, Proceedings International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, Published CIM, 280-287 s., (2001).
- [41] Dahner, J., Van Den Bosch, A., “Total Primary Milling Cost Reduction by Improved Liner Design.” ,The 4th International Platinum Conference, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Sun City, 1-5 s., (2010).
- [42] King, R., P., “Modeling and Simulation of Mineral Processing System”, Oxford University Press, 222-289 s., (2001).
- [43] Çalkaya, M., “Bilyalı Değirmende Zeolitin İnce Yaş Öğütmesinin Analizi”, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 29 s., (2008).
- [44] Clermont B., De Haas, B., Hancotte, O., “Real Time Mill Management Tools Stabilizing Your Milling Process”, The 3rd International Platinum Conference, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Sun City, 13-20s., (2008).

- [45] Powell, M., S., “The Effects of Liner Design on the Motion of the Outer Grinding Elements in a Rotary Mill”, *International Journal of Mineral Processing*” 31 : 163-193s., (1991).
- [46] Magdalinovic, N., Trumic, M., Andric, L., “The Optimal Ball Diameter in a Mill”, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 48 (2) : 329 – 339s., (2012).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatih DÖKME

Doğum Tarihi : 02.05.1984

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm / Program	Eğitim Kurumu	Yıl
Lise	Lise	A.Kerim Bengi Anadolu Lisesi	1995 - 2002
Lisans	Makine Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2002 - 2007
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2009 -

(Varsa) Görevler:

Görev Ünvanı	Görev Kurumu	Yıl
Mekanik Bakım Onarım Mühendisi	Şişecam Kimyasallar Grubu Soda Sanayii A.Ş. Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası	2008 -

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1.

2.

3.