

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MADEN TRANSFER EKİPMANLARININ AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE AŞINMA
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim Can DUMAN

**EKİM 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MADEN TRANSFER EKİPMANLARININ AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE AŞINMA
ANALİZİ**

İbrahim Can DUMAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 / 09 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 21 / 10 / 2021

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet İTİK

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Endüstride yığın halinde katı parçacık bulunan uygulamalarda parçacık akış problemleri, tesislerin üretim kapasitelerini, verimliliğini ve ekipman ömürlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, tesis giderlerinin önemli bir kısmı olan bakım ve onarım masraflarını da arttırmaktadır. Bu çalışma, katı parçacık davranışının anlaşılmasını, parçacık halinde malzeme içeren sistemlerin analiz edilebilmesini, tasarım veya operasyonun iyileştirilmesini ve söz konusu problemlerin çözülmesine yardımcı olmayı hedeflemektedir.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi ve Çolakoğlu Mühendislik Makina San. ve Tic. Ltd. Şti. üniversite – sanayi iş birliği çerçevesinde yürütülen 3181181 – Cevher Aktarım Oluklarının Performans İyileştirmesi ve Aşınma Takip Sistemi Geliştirilmesi isimli 1501 – TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Proje çalışmalarım boyunca bana her türlü imkânı sağlayan, her konuda yol gösteren, ihtiyacım olan tüm bilgileri ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli akademik danışmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet İTİK’e saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım boyunca yardım ve ilgilerini esirgemeyen Çolakoğlu Mühendislik Makina San. ve Tic. Ltd. Şti. ailesine ve tüm destekleri için TÜBİTAK’a teşekkür ederim. Ayrıca tüm yaşamım ve eğitim hayatım boyunca maddi manevi destekleriyle bu günlere gelmemi sağlayan, moral desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme en içten saygı, teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

İbrahim Can DUMAN

Trabzon, 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Maden Transfer Ekipmanlarının Ayrık Elemanlar Yöntemi ile Aşınma Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Mehmet İTİK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/10/2021

İbrahim Can DUMAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Aşınma	3
1.2.1. Abrazif Aşınma.....	4
1.2.1.1. Kayma Aşınması.....	5
1.2.1.2. Darbe Aşınması.....	6
1.2.2. Erozyon Aşınması.....	7
1.2.3. Korozyon Aşınması	8
1.2.4. Adhezif Aşınma	9
1.2.5. Yorulma Aşınması	10
1.3. Madencilik Sektöründe Aşınma.....	11
1.4. Madencilik Sektöründe Aşınmaya Dayanıklı Malzemeler	11
1.4.1. Demir ve Çelikler.....	12
1.4.2. Yüzey İşlemleri.....	12
1.4.3. Elastomerler ve Plastikler	13
1.4.4. Seramik ve Sermetler	13
1.4.5. Kompozit Malzemeler	13
1.5. Aşınmaya Dayanıklı Çelikler.....	13
1.6. Ayırık Elemanlar Yöntemi (DEM)	16
1.7. Ayırık Elemanlar Yönteminde Fiziksel Modeller.....	18
1.7.1. Temas Kuvveti Modelleri	18

1.7.1.1.	Normal Kuvvet Modelleri.....	18
1.7.1.1.1.	Histeretik Doğrusal Yay Modeli.....	19
1.7.1.1.2.	Doğrusal Yay-Sönüm Modeli	19
1.7.1.1.3.	Hertzian Yay-Sönüm Modeli.....	20
1.7.1.2.	Teğetsel Kuvvet Modelleri	20
1.7.1.2.1.	Doğrusal Yay Coulomb Limit Modeli.....	20
1.7.1.2.2.	Coulomb Limit Modeli	21
1.7.1.2.3.	Mindlin-Deresiewicz Model	22
1.7.2.	Ab-t10 Kırılma Modeli	22
1.7.3.	Aşınma Modeli.....	23
1.8.	DEM Giriş Parametrelerinin Belirlenmesi.....	25
1.8.1.	Eğik Düzlem Testi	26
1.8.2.	Geri Sıçrama Katsayısı Testi	29
1.8.3.	Yığın ve Düşme Açısı Kalibrasyon Testi	30
1.8.4.	Ağırlık Düşürme Kalibrasyon Testi.....	32
1.8.5.	Aşınma Kalibrasyon Testi.....	34
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	36
2.1.	DEM Parametre Testleri	36
2.1.1.	Eğik Düzlem Testi	36
2.1.2.	Geri Sıçrama Katsayısı Testi	43
2.1.3.	Yığın ve Düşme Açısı Kalibrasyon Testi	47
2.1.4.	Ağırlık Düşürme Kalibrasyon Testi.....	51
2.1.5.	Aşınma Kalibrasyon Testi.....	55
2.2.	DEM Simülasyonu Kalibrasyon Çalışmaları.....	59
2.2.1.	Yığın ve Düşme Açısı Kalibrasyonu	59
2.2.2.	Ağırlık Düşürme Kalibrasyonu.....	60
2.2.3.	Aşınma Kalibrasyonu.....	61
2.3.	Aktarım Oluğu Aşınma Simülasyonu.....	62
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	64
3.1.	Yığın ve Düşme Açısı Kalibrasyon Sonuçları	64
3.2.	Ağırlık Düşürme Kalibrasyonu Sonuçları	68
3.3.	Aşınma Kalibrasyonu Sonuçları	70
3.4.	Test ve Simülasyonlar Sonucu Elde Edilen DEM Girdi Parametreleri	73

3.5.	Aktarım Oluğu Aşınma Simülasyon Sonuçları.....	75
4.	SONUÇLAR	79
5.	ÖNERİLER.....	81
6.	KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ		



ÖZET

MADEN TRANSFER EKİPMANLARININ AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
AŞINMA ANALİZİ

İbrahim Can DUMAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mehmet İTİK
2021, 88 Sayfa

Taneli malzemelerin parçacık akış problemleri, endüstride aşınma, tıkanıklık, darboğaz, taşma, dökülme ve toz oluşumu gibi sorunlara yol açabilir. Bu katı parçacık akış problemleri, ekipman ömrünün azalmasına neden olurken malzeme transferini de olumsuz yönde etkiler. Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM), dökme katıların akış davranışlarını tahmin etmek, hareketli sınırları kolayca modellemek, malzeme taşıma sistemlerini tasarlamak, analiz etmek ve iyileştirmek için sıklıkla kullanılan sayısal bir tekniktir. DEM simülasyonları ile, parçacık-yüzey etkileşimleri sonucu ortaya çıkabilecek problemlerin tahmin edilmesi ve bu etkilerin azaltılması mümkündür. Böylece tesis üretim kapasitesinde artış sağlanırken ekipman bakım onarım maliyetleri de düşürülür. Bir katı parçacık akış sisteminin davranışı, parçacık-parçacık ve parçacık-yüzey etkileşimlerine bağlıdır ve bu nedenle DEM girdi parametreleri DEM simülasyonları için kritik bir rol oynar. Bununla birlikte, herhangi bir DEM modelinin doğruluğu, bir kalibrasyon süreci ile belirlenen parametrelere atanan girdi değerlerine bağlıdır. Bu parametrelerin büyük bir kısmı akış analizi gerçekleştirilecek olan bakır cevherinin, çarpma, serbest düşme ve parçacık ile yüzey üzerindeki etkileşimlerin incelenmesi ile elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, katı yığın halinde bulunan ve belirli aralıktaki parçacık boyutlarında dağılım gösteren bakır cevherinin maden transfer ekipmanları üzerindeki aşınma etkisi DEM simülasyonları ile incelenmiştir. DEM yazılımı olarak Rocky-DEM kullanılmıştır. DEM simülasyonlarının gerçekleştirilebilmesi için malzemenin parçacık-parçacık ve parçacık-yüzey etkileşim parametreleri belirlenmiştir. Bu kapsamda malzeme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla eğik düzlem, geri sıçrama katsayısı, yığın ve düşme açısı, ağırlık düşürme ve aşınma deney ve kalibrasyon test düzenekleri tasarlanmış ve bu ekipmanlar üzerinde testler gerçekleştirilerek test ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak girdi parametreleri doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ayrık Elemanlar Yöntemi, DEM, Aşınma, Kalibrasyon, Rocky-DEM

Master Thesis

SUMMARY

WEAR ANALYSIS OF MINING TRANSFER EQUIPMENTS BY DISCRETE ELEMENT METHOD

İbrahim Can DUMAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Mehmet İTİK
2021, 88 Pages

Particle flow may cause issues like wear, blockage, bottleneck, overflow, dust and spillage in industries. These particle flow issues reduce the lifespan of equipments while having negative impact on the material transfer process. The Discrete Element Method (DEM) is a numerical technique which is often used to predict the flow behavior of bulk solids, to model dynamic boundaries with ease and to design, analyze and improve material handling systems. Together with DEM simulations, it is possible to predict the problems that may arise as a result of particle-surface interactions and reduce these effects. As a result of DEM simulations, capacities of the facilities can be increased while maintenance costs are reduced. The behavior of a solid particle flow system depends on particle-particle and particle-surface interactions, and therefore DEM input parameters play a critical role for DEM simulations. Beside, the accuracy of any DEM model depends on the input values assigned to the parameters determined by a calibration process. Most of the parameters can be obtained by examining the impact, free fall, and particle-on-surface interactions of copper ore which is going to be analyzed. In this study, the wear effect of copper ore, which is in the form of solid bulk and dispersed in a certain range of particle sizes, upon mining transfer equipment was investigated by DEM simulations. Rocky-DEM software is used for the DEM simulations. The particle-particle and particle-surface interaction parameters are determined in order to perform DEM simulations for the bulk copper material. In this context, inclined plane, restitution coefficient, angle of repose and the drawdown angle, drop weight and wear experiments and calibration test setups are designed for the purpose of determining the material parameters, and tests were carried out on these equipments. The input parameters were verified by comparing the experiments and simulation results.

Keywords: Discrete Element Method, DEM, Wear, Calibration, Rocky-DEM

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tribolojik Sistem Şeması [8].....	3
Şekil 2. Aşınma tipleri ve temel özellikleri [10].	4
Şekil 3. İki elemanlı ve üç elemanlı abrazif aşınmanın gösterimi [9].	6
Şekil 4. Parçacık erozyonu [6].....	7
Şekil 5. Düz yüzeye çarpan sert parçacıkların oluşturduğu erozyon aşınması [9].	8
Şekil 6. Korozyon aşınması [13].	9
Şekil 7. Adhezif aşınma mekanizması [11].	10
Şekil 8. Yorulma aşınması mekanizması [13].	10
Şekil 9. Bir DEM yazılımının şematik algoritması [33].....	17
Şekil 10. Bir yüzeyin aşınmasının şematik gösterimi [33].....	24
Şekil 11. Statik ve kinetik sürtünme kuvvetlerinin uygulanan dış kuvvetle ilişkisi [48]. ...	27
Şekil 12. Eğik düzlem testi [49].	28
Şekil 13. Geri sıçrama katsayısı test cihazı şematik gösterimi [51].	29
Şekil 14. Yığın ve düşme açısı kalibrasyon testi [52].	31
Şekil 15. Ağırlık düşürme testinin basit gösterimi [57].....	32
Şekil 16. Aşınma kalibrasyon testi örneği [6].	34
Şekil 17. Eğik düzlem test ekipmanı	37
Şekil 18. Referans çizgileri.....	37
Şekil 19. Statik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (St-37)	38
Şekil 20. Statik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (500HB aşınma plakası).....	38
Şekil 21. Statik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (Kauçuk)	39
Şekil 22. Kinetik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (St-37)	39
Şekil 23. Kinetik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (500 HB aşınma plakası)	40
Şekil 24. Kinetik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (Kauçuk).....	40
Şekil 25. Geri sıçrama katsayısı test ekipmanı	44
Şekil 26. St-37 plaka için geri sıçrama katsayısı testi	45
Şekil 27. 500HB aşınma plakası için geri sıçrama katsayısı testi	45
Şekil 28. Kauçuk için geri sıçrama katsayısı testi	45
Şekil 29. Yığın ve düşme açısı test ekipmanı	48

Şekil 30. Yığın ve düşme açısı testinde meydana gelen açılar	49
Şekil 31. Yığın ve düşme açısı testi.....	49
Şekil 32. Yığın ve düşme açısı testi yığın açıları ölçümü	50
Şekil 33. Ağırlık düşürme test ekipmanı	51
Şekil 34. Ağırlık düşürme testi	52
Şekil 35. Ağırlık düşürme testi kırılan parçacık.....	53
Şekil 36. Aşınma test ekipmanı	56
Şekil 37. Aşınma test ekipmanı genel ölçüleri	56
Şekil 38. Aşınma testi.....	57
Şekil 39. Aşınma testi sonucu aşınan plakalar	58
Şekil 40. Simülasyonu yapılan aktarım oluşu	63
Şekil 41. Yığın açısı simülasyon görüntüleri.....	65
Şekil 42. Düşme açısı simülasyon görüntüleri	65
Şekil 43. Yığın açısının parçacık-parçacık sürtünme katsayılarına göre değişimi.....	66
Şekil 44. Düşme açısının parçacık-parçacık sürtünme katsayılarına göre değişimi.....	66
Şekil 45. Simülasyon sonucu elde edilen açılar	67
Şekil 46. Ağırlık düşürme testi simülasyonu.....	69
Şekil 47. Ağırlık düşürme simülasyonu sonucu kırılan parçacıklar.....	69
Şekil 48. Aşınma simülasyon başlangıcı	71
Şekil 49. Aşınma simülasyonu aşınan plakalar	71
Şekil 50. Aşınma simülasyonu parçacık akış izi	72
Şekil 51. Simülasyon sonucu aşınma plakalarının durumu	72
Şekil 52. Aktarım oluşu aşınma simülasyonu	75
Şekil 53. Sisteme parçacık girişi.....	76
Şekil 54. Simülasyon süresince her 5 saniye için aşınma plakaları.....	76
Şekil 55. Sistemde parçacık akışı	77

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Çelik üreticileri tarafından bildirilen bazı 400HB çeliklerin bileşimleri [26].....	14
Tablo 2. Çelik üreticileri tarafından bildirilen aşınma çelikleri mekanik özellikleri [26]...	15
Tablo 3. Bakır cevheri ile aşınma plakası arasındaki statik sürtünme katsayısı.....	41
Tablo 4. Bakır cevheri ile St-37 plaka arasındaki statik sürtünme katsayısı	41
Tablo 5. Bakır cevheri ile kauçuk arasındaki statik sürtünme katsayısı.....	41
Tablo 6. Bakır cevheri ile aşınma plakası arasındaki kinetik sürtünme katsayısı	42
Tablo 7. Bakır cevheri ile St-37 plaka arasındaki kinetik sürtünme katsayısı	42
Tablo 8. Bakır cevheri ile kauçuk arasındaki kinetik sürtünme katsayısı	43
Tablo 9. Geri sıçrama katsayısı testi başlangıç verileri	46
Tablo 10. Bakır cevheri ile aşınma plakası arasındaki geri sıçrama katsayısı	46
Tablo 11. Bakır cevheri ile St-37 plaka arasındaki geri sıçrama katsayısı.....	47
Tablo 12. Bakır cevheri ile kauçuk arasındaki geri sıçrama katsayısı.....	47
Tablo 13. Yığın ve düşme açısı testi aç değeri.....	50
Tablo 14. Ağırlık düşürme testi başlangıç verileri	53
Tablo 15. Ağırlık düşürme testi hesaplanan değeri	54
Tablo 16. Ağırlık düşürme testi sonuçları	55
Tablo 17. Aşınma testi sonuçları	59
Tablo 18. Parçacık yığınının boyut dağılımı	60
Tablo 19. Yığın ve düşme açısı DEM parametreleri	60
Tablo 20. Ağırlık düşürme simülasyonu DEM parametreleri	61
Tablo 21. Aşınma simülasyonu DEM parametreleri	62
Tablo 22. Aşınma plakaları için DEM simülasyonuna girilen malzeme özellikleri	62
Tablo 23. Parçacık boyut dağılımı.....	63
Tablo 24. Parçacık girişine ait özellikler	63
Tablo 25. Yığın ve düşme açısı simülasyonları sonucu elde edilen açılar	67
Tablo 26. Test ve simülasyon sonucu elde edilen açılar	67
Tablo 27. Yığın ve düşme açısı simülasyonları sonucu elde edilen parametreler.....	68
Tablo 28. Ağırlık düşürme simülasyon sonuçları.....	70
Tablo 29. Test ve simülasyon sonucu elde edilen değeri	70

Tablo 30. Simülasyonlar sonucu ortalama kütle kayıpları	73
Tablo 31. Aşınma simülasyon sonuçları.....	73
Tablo 32. Aşınma simülasyonu için DEM parametreleri	74
Tablo 33. Simülasyon sonucu plakaların aşınma miktarları.....	78



SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Maksimum t_{10} değeri
$ASTM$	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
b	: Malzeme darbe parametresi
C	: Hacim/kesme işi oranı (Aşınma oranı)
C_H	: Sönümleme katsayısı
C_n	: Normal sönümleme katsayısı
C_r	: Geri sıçrama katsayısı
DEM	: Ayırık Elemanlar Yöntemi (Discrete Element Method)
E_b	: Yüzey young modülü
E_{cs}	: Özgül ufalama enerjisi
e_{cum}	: Kümülatif özgül temas enerjisi
E_i	: Darbe kırılma enerjisi
e_{imp}	: Özgül darbe enerjisi
e_{min}	: Minimum kırılma enerjisi
F_n	: Normal kuvvet
F_τ	: Teğetsel kuvvet
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Aşınmaya maruz kalan malzemenin sertliği
h	: Yükseklik değeri
HB	: Brinell Sertliği
h_f	: Düşürülen ağırlığın örsün üzerindeki son yüksekliği
h_i	: Düşürülen ağırlığın örsün üzerindeki ilk yüksekliği
k	: Boyutsuz ampirik sabit
K_H	: Sertlik katsayısı
K_{nl}	: Yükleme temas sertlik değeri
K_{nu}	: Boşaltma temas sertlik değeri
K_τ	: Teğetsel sertlik değeri
L	: Parçacık Boyutu
L_{ref}	: Referans parçacık boyutu

M	: Maksimum t_{10} değeri
m	: Parçacık kütlesi
m^*	: Eşdeğer kütle
m_d	: Ağırlık düşürme başlığının kütlesi
m_p	: Ortalama parçacık kütlesi
S	: Malzeme Sabiti
s_n	: Normal örtüşme değeri
s_τ	: Teğetsel bağıl yer değiştirme
t_{10}	: Parçacığın %10'u elek boyutundan geçen parçaların kütlece yüzdesi
V	: Aşınan toplam malzeme hacmi
V_{0n}	: Çarpışmadan önceki normal yaklaşma hızı
V_n	: Çarpışmadan sonraki normal ayrılma hızı
V_x	: Yatay hız bileşeni
V_y	: Düşey hız bileşeni
Δs_n	: Normal örtüşme değerindeki değişiklik
Δt	: Zaman adımı
ΔV	: Bir zaman adımı sırasında aşınan malzeme hacmi
ΔW_τ	: Bir yüzeyle çarpışan parçacıkların yaptığı kesme işi
ε	: Geri sıçrama katsayısı
η	: Sönümlleme oranı
η_τ	: Teğetsel sönümlleme oranı
μ	: Sürtünme katsayısı
μ_k	: Kinetik sürtünme katsayısı
μ_s	: Statik sürtünme katsayısı
ν	: Poisson oranı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Transfer istasyonları, dökme malzemeleri işleyen birçok endüstride önemli bir rol oynamaktadır [1]. Maden sektöründe veya taş ocağı işletmelerinde yaygın olarak kullanılan dökme malzeme taşıma istasyonları, bant konveyörler, bunkerler, besleyiciler ve aktarım oluğu gibi ekipmanları içerir. Bu ekipmanlar; proses boyunca farklı aşamalarda işlenmiş çeşitli tane boyutlarına sahip olabilecek dökme malzemeleri; depolama ve taşıma gibi çeşitli işlem birimleri arasında iletmek ve yönlendirmek için kullanılmaktadır [2]. Transfer ekipmanları; malzeme özellikleri, ortam koşulları ve hatalı ekipman geometrileri gibi etkilere dolayı aşınma, yapışma, tıkanma, dökülme ve toz oluşumu gibi problemlere neden olabilir. Bu problemler tesisin hızını yavaşlatarak kapasitenin azalmasına, üretim hattının gereksiz ve zamansız durmasına, bakım sıklığının artmasına ve dolayısıyla verimin düşmesine yol açmaktadır [1]. Bu noktada aşınma, tesislerde en sık karşılaşılan ve tesise maddi anlamda en çok zarar veren problemlerden biridir. Bu nedenle aktarım ekipmanlarının etki yüzeyleri, yüksek aşınma dayanımına sahip ve aşınma plakası adı verilen malzemeler ile kaplanmaktadır.

Dökme malzemelerin akış davranışının dikkatli analizi ve doğrulanmış tasarım araçlarının kullanılmasıyla, bir transfer ekipmanının performans ve bakım gereksinimlerini iyileştirmek mümkündür [1]. Dökme malzeme taşıma ekipmanları üzerindeki aşınma problemi, ekipman parça maliyetleri, makinenin arıza süresinden kaynaklanan maliyetler ve üretim kaybı gibi çok kapsamlı ekonomik sorunlara yol açabilir. Aşınmanın tahmin edilebilmesi için dökme malzemelerin bir malzeme taşıma sistemindeki akış davranışının bilinmesi çok önemlidir. Büyük ölçekli uygulamalarda aşınmanın etkili bir şekilde tahmin edilebilmesi için malzeme taşıma ekipmanı yapısı, dökme malzeme akışı ve aşınma davranışı modellerinin birlikte ele alınması gerekir [3].

Ayrık Elemanlar Yöntemi (Discrete Element Method, DEM), dökme katıların akış davranışlarını tahmin etmek, malzeme taşıma sistemlerini tasarlamak, analiz etmek ve iyileştirmek için sıklıkla kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu yöntem, hareketli sınırları kolayca modellemek ve parçacık akışı dinamiklerini daha iyi anlamak için kullanılır [4]. Ayrık elemanlar yöntemi ile dökme malzeme taşıma sistemlerinde meydana gelebilecek

aşınma, tıkanma, yapışma ve kırılma gibi problemlerin analizi yapılarak çözümü sağlanır. Bununla birlikte, herhangi bir DEM simülasyonunun doğruluğu, bir kalibrasyon süreci ile belirlenen parametrelere atanan girdi değerlerine bağlıdır. Bu parametrelerin büyük bir kısmı akış analizi gerçekleştirilecek olan cevherin, çarpma, serbest düşme ve parçacık ile yüzey üzerindeki etkileşimlerinin incelenmesi ile elde edilebilmektedir [5].

Bu çalışmada bakır cevheri katı parçacık akış ve aşınma davranışının tahmin edilebilmesi ve yüzey parametrelerinin belirlenmesi amacıyla DEM yazılımı kullanılmıştır. Bu kapsamda DEM simülasyonu girdi parametreleri için eğik düzlem testi, yığın ve düşme açısı testi, geri sıçrama katsayısı testi, ağırlık düşürme testi ve aşınma testi ekipmanları geliştirilmiş ve bu ekipmanlar üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. DEM girdi parametrelerinin doğruluğunun sağlanması için bu testlerden alınan ölçüm verileri ile birlikte tam ölçekli DEM kalibrasyon simülasyonları yapılmıştır. Test verileri ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış, girdi parametreleri doğrulanarak bu parametreler kalibre edilmiştir. Ardından elde edilen parametre takımı kullanılarak örnek bir aktarım oluğu üzerinde bulunan aşınma plakaları için 30 sn'lik aşınma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Aktarım oluğuna ait geometriler, DEM simülasyonu içerisine etkileşim düzeyine göre sınıflandırılarak aktarılmıştır. Parçacıklar bu sisteme, bir konveyörü temsil edecek şekilde yerleştirilmiş olan girişten verilmiştir ve aşınma plakalarının yerleştirilmiş olduğu düzleme belirli bir çıkış hızı ile etki etmektedir. Bu parçacıkların etkileri sonucu aşınma plakalarında meydana gelen aşınma miktarları ilgili tablolar içerisinde verilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde “Genel Bilgiler” ana başlığı altında, bu çalışmanın amacına konu olan madencilik sektöründeki aşınma problemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Aşınma davranışının çeşitlerinden ve madencilik sektörü içerisindeki öneminden bahsedilmiştir. Söz konusu problemlerin çözümü için kullanımı gittikçe yaygınlaşan Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM)’in çalışma prensibine değinilmiştir. DEM simülasyonları içerisinde yer alan temas kuvvet modelleri hakkında, modellerin esas aldığı formülasyonlar açılarak daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Ardından DEM simülasyonlarının bilgisayar ortamına dökülebilmesi için gerekli olan DEM giriş parametrelerinin belirlenmesi hakkında literatür bilgisi verilmiştir. Bölüm 2.’de “Yapılan Çalışmalar” kısmında, DEM giriş parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen eğik düzlem testi, yığın ve düşme açısı testi, geri sıçrama testi, kırılma testi ve aşınma testine yer verilmiştir. Bu deneyler sonucu elde edilen verilerin bilgisayar üzerinde kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Son olarak kalibrasyonlar sonucu elde edilen parametre takımı kullanılarak geniş çaplı bir aktarım oluğu simülasyonu

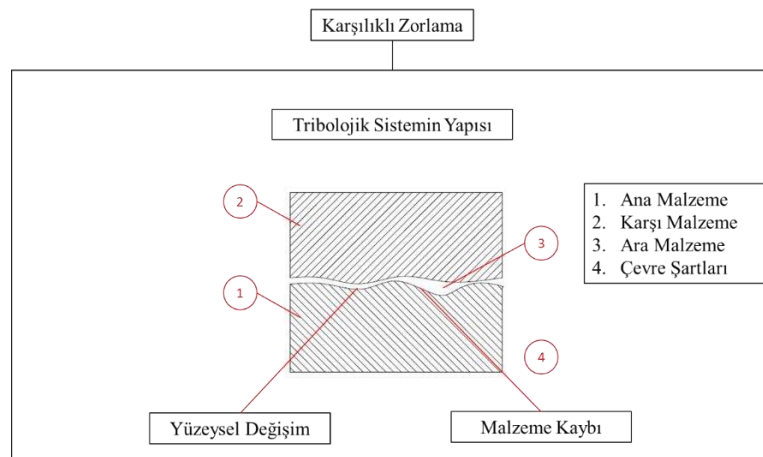
kurulmuştur. Tüm bu çalışmalara ait elde edilen veriler, Bölüm 3.'de “Bulgular ve Tartışma” başlığı altında irdelenmiştir. Bölüm 4.'de “Sonuçlar” başlığı altında ayrık elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan bir aktarım oluğu aşınma analizi için elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Bölüm 5.'te “Öneriler” ana başlığında, konu ile ilgili gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir. Son olarak “Kaynaklar” ana başlığında, tez çalışmasında literatürden yararlanılan kaynaklara yer verilmiştir.

1.2. Aşınma

Aşınma kabaca bir yüzeyden malzemenin uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir [6]. Başka bir ifade ile belirtmek gerekirse, aşınma, bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybıdır [7]. Aşınma sistemini oluşturan temel unsurlar;

- Ana Malzeme (Aşınan),
- Karşı Malzeme (Aşındıran),
- Ara Malzeme,
- Yük,
- Hareket, başlıkları altında toplanabilir [7].

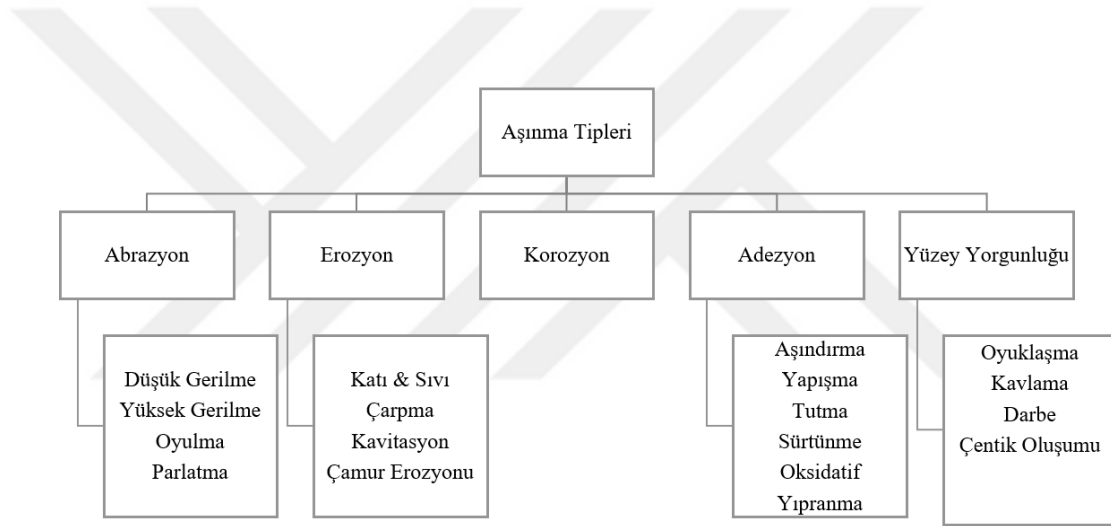
Bu temel unsurlar veya başka bir ifade ile aşınmaya etki eden faktörler Şekil 1.'de gösterilen tribolojik sistemi oluşturmaktadır.



Şekil 1. Tribolojik Sistem Şeması [8].

Aşınma sürecini açıklamak için öncelikle yüzey ile parçacık-yüzey aşınmasının nasıl bir etkileşim gösterdiğinin anlaşılması gerekmektedir. En ince ve pürüzsüz yüzey bile, mikroskobik ölçekte tepe noktaları ve oluklar ile düzensiz bir yüzeye sahiptir. Aşındırıcı parçacık veya yüzey, aşınan yüzeyle temasa geçtiğinde, öncelikle yüksek piklerle etkileşime geçmektedir. Bu küçük temas alanı, yüksek sıcaklıklar, yüksek deformasyon oranı ve yüksek deformasyon/kesme (kayma) gerilmesi gibi çok özel koşullar yaratmaktadır [6].

Aşınma; yapısal değişiklikler, plastik deformasyon ve yüzey çatlaması gibi etkilere neden olur. Yağlamaya, yüzeylerin yapısına, kimyasal ortama ve çalışma koşullarına bağlı olarak farklı aşınma mekanizmaları oluşabilir [9].



Şekil 2. Aşınma tipleri ve temel özellikleri [10].

1.2.1. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, iki yüzey arasında kayan sert parçacıklar tarafından bir yüzeyden malzemenin uzaklaştırılması olarak tanımlanmaktadır. Bu tip aşınma, adhezif aşınmaya kıyasla yüksek malzeme kaybına neden olmakla birlikte madencilik ve beton endüstrilerinde en çok görülen aşınma mekanizmasıdır [6]. Abrazif aşınma tüm aşınma maliyetinin yaklaşık olarak %63'ünü oluşturmaktadır [11].

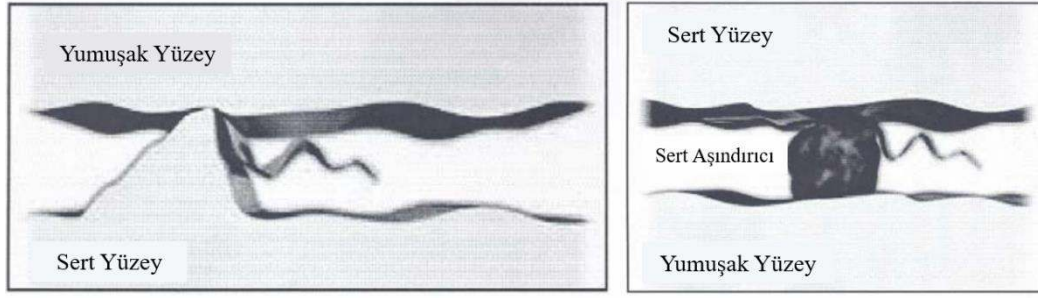
Abrazif aşınmayı etkileyen başlıca faktörler aşındırıcı parçacık, malzeme yüzeyleri arasındaki sertlik farkı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Söz konusu parametrelere bağlı olarak abrazif aşınmanın önüne geçilmesi veya aşınma hızının azaltılması için aşağıdaki yöntemlere başvurulabilir [7]:

- Abrasif aşınmanın önüne geçilmesinde en etkili yöntem, malzeme yüzey sertliğinin artırılmasıdır ancak bu durum malzemenin gevrekliğini de arttırdığından tokluk değerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir [12].
- Malzeme ara yüzeylerinde bulunan hava, su ve yağ gibi maddeler diğer parçacıkların toplanması ve sistemden uzaklaştırılmasına yardımcı olarak abrazif aşınma riskini azaltmaktadır [12]. Ek olarak ara yüzeyin en sert parçacıklardan daha kalın bir film tabakası ile yağlanması da aşınmayı azaltma konusunda etkili olmaktadır [13].
- Pratikte en çok kullanılan yöntemlerden biri de abrazif aşınmaya uğrayan parçaların değiştirilmesi ve bu işleme olanak sağlayacak şekilde tasarımların yapılmasıdır [8].

Yüzeyin abrazif aşınmaya nasıl tepki vereceği, etkilenen yüzeyin mekanik özellikleri ve aşındırıcı parçacıklar gibi faktörlere bağlıdır. Abrasif aşınma, sert parçacık ve bu parçacığın yumuşak yüzeyle nasıl etkileşime girdiğine bağlı olarak kayma aşınması ve darbe aşınması şeklinde iki gruba ayrılmaktadır [6].

1.2.1.1. Kayma Aşınması

Kayma aşınması hem adhezif aşınmada hem de abrazif aşınmada görülen bir aşınma türüdür. Her iki durumda da aşınan malzeme yüzeyinde kayan ve bu yüzeyde malzeme kaybına sebep olan başka bir malzeme tarafından meydana gelmektedir [6]. Abrasif aşınmanın iki ana tipi bulunmaktadır. Bunlar, iki elemanlı abrazif aşınma ve üç elemanlı abrazif aşınma olarak sınıflandırılabilir [9]. İki elemanlı abrazif aşınma, karşılıklı olarak etkileşimde bulunan iki malzemenin birbiri üzerinde bıraktığı etki olarak gerçekleşir. Üç elemanlı abrazif aşınmada ise karşılıklı olarak bulunan malzemelerden farklı olarak sert yüzey olarak üçüncü bir cisim bulunmaktadır [7]. İki elemanlı aşınma, üç elemanlı aşınma tipine göre 10 kat daha yüksek bir aşınma oranına neden olmaktadır [14].

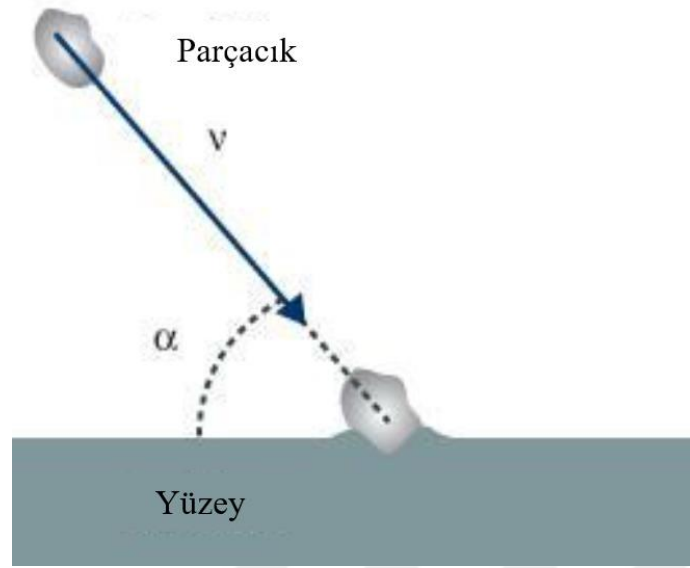


Şekil 3. İki elemanlı ve üç elemanlı abrazif aşınmanın gösterimi [9].

İki elemanlı abrazif kayma aşınması sırasında oluşan aşınma döküntüsünün hacmi, Archard'ın aşınma yasası kullanılarak hesaplanabilir. Archard, yerel dairesel pürüzler temas halinde olduğunda yerel temasın meydana geldiğini varsayarak bu modeli geliştirmiştir. Ayrıca normal yükün gerçek temas alanıyla orantılı olduğunu ve pürüz deformasyonunun plastik olarak gerçekleştiğini varsaymıştır [15].

1.2.1.2. Darbe Aşınması

Belirli bir hız ve açıyla bir yüzeye çarpan bir parçacığın neden olduğu aşınmaya darbe aşınması denir. Bu aşınma kendi içinde de parçacık erozyonu (particle erosion) ve abrazif darbe (abrasive impact) olarak ayrılmaktadır. Parçacık erozyonu, 1 mm'den az, çok küçük ve sert parçacıkların, yüksek hızda bir gaz veya bir sıvı ile birlikte hareket eden tekrarlayan etkisinden kaynaklanmaktadır. Abrazif darbe, daha büyük boyuta ve daha düşük hızlara sahip parçacıkların çarpması olarak tanımlanmaktadır. Aşınma hızı; parçacığın hızı, parçacığın boyutu, parçacığın yüzeye çarpma açısı, aşındırıcının sertliği, kaya ve çelik malzemenin tokluğu ile ilişkilidir [6].



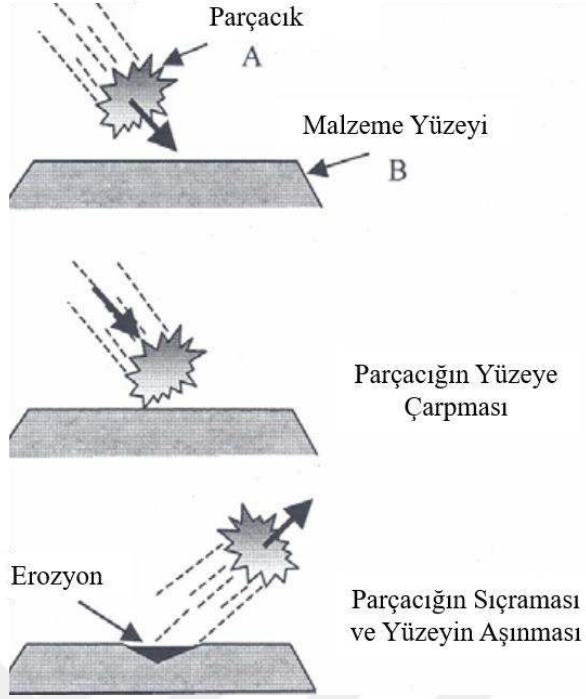
Şekil 4. Parçacık erozyonu [6].

1.2.2. Erozyon Aşınması

Erozyon aşınması, malzeme yüzeyine çarpan sert parçacıkların meydana getirdiği başka bir yüzey hasarıdır [9]. Akışkan ortamlarda hareket eden abrazif parçacıkların, malzeme yüzeyine çarpması ve bu çarpma sonucu malzeme yüzeyinden parça kopması şeklinde gerçekleşen hasara erozyon aşınması denir. Akışkan ortam içerisinde taşınan parçacıklar malzeme yüzeyine belirli bir enerji ile çarpar. Bu enerjinin meydana getirdiği basınç, malzeme yüzeyinde deformasyona sebep olur [16]. Erozyon aşınmasında aşındırıcı partiküllerin hızı, çarpma açısı, büyüklüğü, şekli ve sertliği erozyon aşınmasına etki eden önemli etkenlerdir [11].

Üç tür erozyon aşınması çeşidi vardır, bunlar;

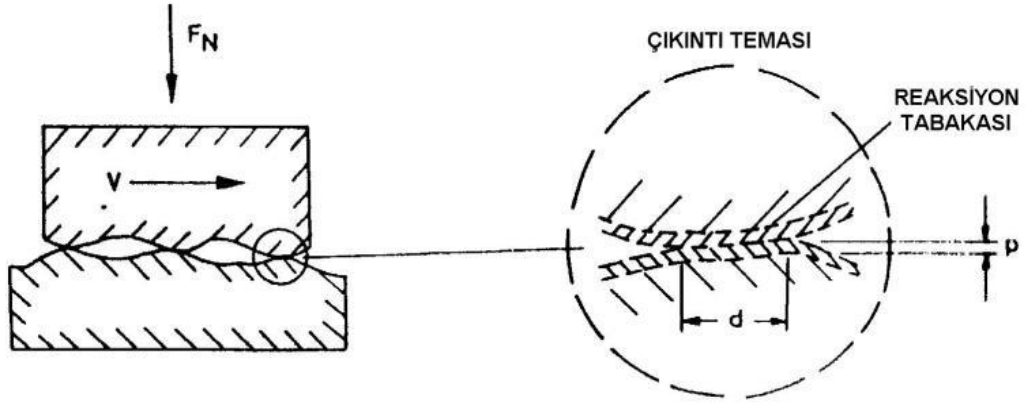
- 1) Gaz veya akışkan içindeki katı parçacıkların neden olduğu erozyon,
- 2) Sıvılardan meydana gelen damlalar,
- 3) Sıvıdaki gaz kabarcıklardan meydana gelen kavitasyon, şeklinde sıralanabilir [9].



Şekil 5. Düz yüzeye çarpan sert parçacıkların oluşturduğu erozyon aşınması [9].

1.2.3. Korozyon Aşınması

Metallerin dış ortam ile kimyasal, elektrokimyasal ve metalürjik olarak tepkimeye girerek bu yüzeyler üzerinde farklı tabakalar oluşturması ve oluşan bu tabakaların hareket eden parçaların yüzeylerinde meydana gelen sürtünme nedeniyle parçalanması sonucu gerçekleşen aşınma türüdür. Korozyon aşınmanın ortaya çıkması için korozyon etkeni ile sürtünmenin bir arada bulunması gerekir. Korozyon aşınmada ilk olarak temas halinde bulunan yüzeyler bulundukları ortam ile tepkimeye girerek korozyon tabakasını oluşturur daha sonra temas eden noktalarda bu korozyon tabakası çatlar ve aşınma meydana gelir. Bu aşınma sırasında ortaya çıkan tabakalar, malzeme yüzeyinde bir ara tabaka meydana getirdiğinden adhezif aşınmayı azaltıcı bir etkiye sebep olur. Ancak malzeme yüzeyinden kopan parçacıklar nedeniyle aşınmada artış gerçekleşir [11].



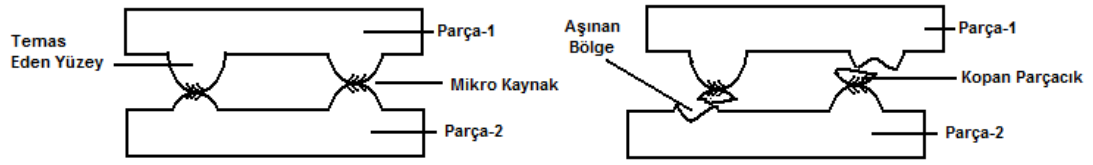
Şekil 6. Korozyon aşınması [13].

Korozif aşınmanın önüne geçilmesi amacıyla;

- Ömür ve ekonomik şartlar göz önünde bulundurularak doğru malzeme seçimi yapılması,
- Malzeme yüzeyinin yüksek sertliğe ve korozyon direncine sahip kaplamalar ile kaplanması,
- Ortamın ph değerinin düşürülmesi ve hava ile olan temasın kesilmesi,
- Kromat ve nitrat gibi korozyon inhibitörleri kullanması,
- Katodik koruma uygulanması gibi yöntemlere başvurulabilir [17].

1.2.4. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, adhezyon kuvvetinin etkisi ile, sürtünen yüzeylerden malzeme kopması şeklinde gerçekleşmektedir [11]. Yapışma aşınması olarak da isimlendirilen adhezif aşınma, en sık karşılaşılan aşınma türü olmasına rağmen aşınmanın gerçekleşmesinden sonra hasarı hızlandırıcı etkisi bulunmaz. Adhezif aşınma genel olarak, birbiri üzerinde kayma sürtünmesi meydana gelen metal – metal çiftlerinde, yüzeylerin birinden kopan parçacıkların diğer yüzeye yapışması sonucu gerçekleşir [8]. Oluşan bu yapışmalar, tekrarlanan hareket esnasında zayıf olduğu noktalardan koparak kendisi ile birlikte malzemelerin yüzeyinden parçacıklar koparır. Kopan bu parçacıklar malzeme üzerinde deformasyon meydana getirirler ve oluşan bu deformasyona da adhezif aşınma adı verilir [18].

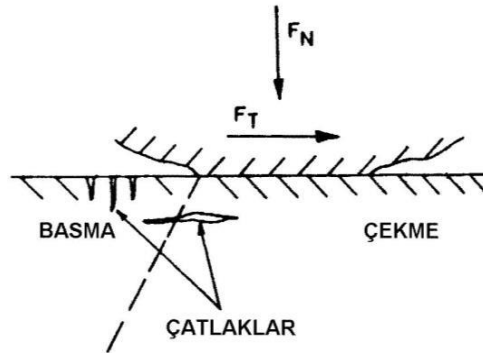


Şekil 7. Adhezif aşınma mekanizması [11].

Adhezif aşınma esnasında meydana gelen mikro kaynaklardan kopan parçacıklar bazı durumlarda diğer malzemenin yüzeyine transfer olurken, bazı durumlarda ise malzeme yüzeyinden ayrılarak iki malzeme arasında kaymaya başlar. Bu durumda kopan parçacıklar üçüncü malzeme durumuna geçerek abrazif aşınma oluşumuna sebep olabilir [11].

1.2.5. Yorulma Aşınması

Malzemelerin tekrar eden yükler altında çalışması sonucunda yüzeyde ve yüzeye yakın yerlerde oluşmaya başlayan çatlaklar zamanla ilerleyerek malzeme yüzeyinden mikro parçacıkların kopmasına neden olur. Malzeme yüzeyinden kopan bu parçacıkların oluşturduğu aşınma, yorulma aşınması olarak adlandırılır [11].



Şekil 8. Yorulma aşınması mekanizması [13].

Yorulma aşınmasının azaltılması veya ortadan kaldırılması, mikro çatlak oluşumunun yavaşlatılması ya da durdurulması ile sağlanabilmektedir. Bunun için, malzeme sertliğinin artırılması ile yüzey altı deformasyon azaltılıp mikro çatlak oluşma oranı yavaşlatılabilir. Ayrıca malzeme tokluğun artırılması da çatlak büyüme hızını azaltmada etkili olmaktadır [13].

Aşınma direncini artırmanın bir diğer yolu ise malzemeyi yüzeyinde plastik deformasyon meydana getirmeyecek bir yüzey işleminden geçirmek veya malzeme yüzeyini çok sert kaplamalar ile kaplamaktır. Bu işlemler yapılırken de kaplamaların iyi yapışmasına ve mikro çatlakların oluşmamasına önem gösterilmelidir [13].

1.3. Madencilik Sektöründe Aşınma

Endüstride her sektörün kendine özgü baskın aşınma mekanizmaları bulunmaktadır. Madencilik sektörü, kayaların ve toprakların uzaklaştırılması, parçalanması ve taşınması gibi işlemleri içerdiğinden, temel aşınma mekanizmaları abrazyon ve erozyondur. Zaman zaman korozyon aşınması da abrazyon ve erozyon oranlarını etkiler [19]. Aşınma mekanizmalarına ek olarak, çoğu aşınma problemini etkileyen birçok faktör vardır. Bunlardan birkaçı, aşınma malzemesi, aşınmaya neden olan aşındırıcı ve makinenin tasarımıdır [20]. Madencilik sektöründe, farklı aşındırıcıların aşınma mekanizması ve aşınma miktarı üzerindeki etkisi üzerine araştırmalar devam etmektedir [21].

Abrazif aşınma sonucu meydana gelen sorunlar, maden endüstrisi içerisinde yüksek maliyetli sonuçlar doğurmaktadır. Araştırmacılar, malzemelerin, aşındırıcıların ve ufalama sistemlerinin davranışını anlamak için sistematik bir yaklaşıma ihtiyaç duymaktadır. Bir malzemenin aşınma direncini etkileyen, kullanılan aşınma malzemesi matrisinin türü ve aşındırıcının özellikleri dâhil olmak üzere birçok faktör vardır. Aşındırıcının kuvars içeriğinin, açısallığı ve sertliği nedeniyle abrazif aşınmada çok etkili olduğu gösterilmiştir. Abrazif aşınma araştırması metalürjik yöne odaklanmıştır. Farklı aşınma mekanizmalarını anlamaya ve açıklamaya yardımcı olmak için farklı aşınma testleri geliştirilmiştir. Ne yazık ki, ana aşınma mekanizmaları normalde birbirleriyle kombinasyon halinde mevcuttur ve bu, abrazif aşınma sürecini anlamayı zorlaştırmaktadır. Geleneksel olarak aşınma direnci, bir aşınma faktörü olarak, bir testin ve bir referans malzemenin kütle veya hacim kaybının bir oranı olarak ölçülmektedir [22].

1.4. Madencilik Sektöründe Aşınmaya Dayanıklı Malzemeler

Madencilik endüstrisindeki aşınmaya dayanıklı malzemeler; demir ve çelikler, yüzey işlemleri, elastomerler ve plastikler, seramikler ile sermetler ve kompozitler şeklinde beş ana gruba ayrılabilir. Her durum için uygun malzemenin seçimi, mevcut aşınma

mekanizmalarının anlaşılmasına ve en uygun özelliklere sahip malzemenin seçilmesine bağlıdır. Dikkate alınması gereken diğer önemli parametreler ise, aşınma malzemesinin maliyeti ve işlenebilme durumudur [19].

1.4.1. Demir ve Çelikler

Madencilik endüstrisindeki aşınma sorunlarına çeşitli çözümler sunan bu grup, çeşitli yüzey sertliğine (200HB – 500HB) ve çok çeşitli mekanik özelliklere sahiptir. Bu grup, üç ana kategoriye ayrılabilir:

Perlitik ve martensitik çelikler: Bu çelikler uygun bir maliyetle farklı tipteki abrazyon aşınmasına karşı orta düzeyde direnç sağlar. Müşterinin servis ihtiyaçlarına uyacak şekilde kolayca üretilirler.

Östenitik manganlı çelikler: Bu çelikler nispeten uygun maliyetlidir. Başlangıçta düşük yüzey sertliğine sahip olmalarına rağmen, olağanüstü tokluğa ve çalışma sertleştirme kabiliyetine sahiptirler, bu da yüzey sertliklerini ikiye katlamalarına izin vermektedir.

Aşınmaya dayanıklı beyaz demir: Beyaz demirlerin çok sert ve kırılman olduğu bilinmektedir. Korozyon, abrazyon ve erozyona karşı yüksek direnç özelliklerine sahiptirler. Bununla birlikte, maliyetlerini önemli ölçüde artıran krom, molibden veya nikel içerirler. Sertliklerini iyileştirmek ve kaynak yapılmasına izin vermek için, yumuşak çelik bir destek plakasına lamine edilmişlerdir [22].

1.4.2. Yüzey İşlemleri

Yüzey işlemi yapılmış malzemeler, esas olarak aşınma direnci dışındaki nedenlerle seçilen bir temel malzeme üzerine yüksek abrazyon ve erozyona dirençli bir kaplama yapılması ile elde edilir. Yüzey işlemi yapılmış malzemeler, mümkün olan en iyi aşınma plakasını oluşturmak için sertliği ve tokluğu birleştirmeye çalışır. Birçok yüzey ısıtma işlemi ile sertleştirilir veya daha sert bir yüzey kaplaması ile kaplanır. En yaygın yüzey işlemi malzemelerinden ikisi, krom karbür ve tungsten karbür kaplamadır. Yüksek yüzey sertliğine (>700HB) sahiptirler ve tipik olarak bu malzemeler bir çelik destek plakası üzerine yerleştirilir [22].

1.4.3. Elastomerler ve Plastikler

Bu malzemeler, madencilik endüstrisinde aşınmaya dirençli malzemeler içerisinde belirli bir yer kaplar. Elastomerler çoğunlukla arazi lastikleri, konveyör bantları ve kamyon kasası kaplamalarından oluşur. ASTM, elastomerleri, uzunluğunun iki katından fazlasına gerilebilen ve ardından oda sıcaklığında hızlı bir şekilde orijinal uzunluğuna geri dönebilen bir malzeme olarak tanımlamaktadır. Plastikler, hafif olmaları nedeniyle çoğunlukla epoksi reçine olarak ve pompalama uygulamalarında boru olarak kullanılmıştır. Hem elastomerler hem de plastikler, korozyon dirençleri, toklukları ve imalat kolaylıkları ile bilinir. Aşınma direnci konusunda çoğunlukla elastik özelliklerine güvenilmektedir. Başlıca dezavantajları, oluk açma ve yırtılma aşınma uygulamalarına uygunsuz olmalarıdır [22].

1.4.4. Seramik ve Sermetler

Bu malzemeler düşük ve yüksek sıcaklıkta çok yüksek abrazyon direncine sahiptir. Ana dezavantajları, tokluk eksikliğidir. Beton, seramik olarak kabul edilir; bu nedenle betonla ilişkili özelliklerin çoğu seramiklere uygulanabilir. Sermetler, metallerin ve seramiğin birleşimi olarak tanımlanmaktadır [22].

1.4.5. Kompozit Malzemeler

Bunlar genellikle seramik ve epoksi reçine veya elastomer kombinasyonlarıdır. Başlıca avantajları, uygulanabilirlik ve kullanım kolaylığıdır. Planlanmış bir değiştirmeye kadar aşınan bir bileşenin ömrünü uzatabilirler. Bununla birlikte, aynı zamanda pahalıdır ve bazen ayarlandıkları süre boyunca epoksi matrisi aşınabilir, bu nedenle aşınma performansı azalabilir [22].

1.5. Aşınmaya Dayanıklı Çelikler

Aşınma direnci bir malzeme özelliği değildir, ancak büyük ölçüde koşullara bağlıdır. Bununla birlikte, aşınmaya dayanıklı çelik terimi, pazarlama amaçları için yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu ticari kategorideki çelikler genellikle grupları arasında benzerliklere sahiptir. Aşınmaya dayanıklı çelik terimi, malzemelerin özelliklerini daha kesin olarak

tanımlayan birkaç alt kategoriye de sahiptir. Yapısal çelikler kategorize edilirken, mukavemet değerine göre tanımlanırken, aşınmaya dayanıklı çelikler, 400HB, 500HB ve 600HB kalite çelikler gibi sertliklerine göre kategorize edilir. Bu, genel düzeyde sertlik ve aşınma direnci arasındaki bağlantıdan kaynaklanır [23]. Aşınmaya dirençli çeliklerin bileşimleri ve üretim süreçleri, çelik üreticileri arasında önemli ölçüde değişebilir. Ayrıca, levha veya şerit kalınlığı da alaşımlamayı ve dolayısıyla çelik özelliklerini etkiler [24]. Çünkü artan levha kalınlığıyla, levhanın tam sertleşmesini sağlamak için daha fazla alaşım gerekmektedir [25].

Tablo 1. Çelik üreticileri tarafından bildirilen bazı 400HB çeliklerin bileşimleri [26].

Ticari Ad	C max %	Si max %	Mn max %	P max %	S max %	Cr max %	Ni max %	Mo max %	B max %	Diğer max %
Hardox 400	0,15	0,7	1,6	0,025	0,01	0,5	0,25	0,25	0,004	-
Raex 400	0,23	0,8	1,7	0,025	0,15	1,5	1	0,5	0,005	-
Xar 400	0,2	0,8	1,5	0,025	0,01	1	0	0,5	0,005	-
Brinar 400	0,18	0,5	2	0,015	0,005	1,55	0	0,6	0,005	Al 0,1
Creusabro 400	0,2	0	1,6	0	0,005	1,9	0,2	0,4	0	Ti 0,2
Dillidur 400	0,2	0,5	1,8	0,025	0,01	1,5*	0,8*	0,5*	0,005*	V 0,08* Nb 0,05*
Abrazo 400	0,2	0,5	1,6	0,025	0,01	1	1,5	0,7	0,004	V 0,1 Nb 0,06 Cu 0,4
*tek başına veya kombinasyon halinde kullanılır										

Alaşım elementlerinin malzemelerin aşınma davranışı üzerindeki etkileri, bunların sertleşebilirlik, kendiliğinden temperleme ve deformasyon sertleşmesi gibi işleme davranışı üzerindeki etkilerinden ve dolayısıyla çeliklerin mikro yapılarından kaynaklanmaktadır. Bir aşınmaya dirençli alaşım, yeterli miktarda karbon, bor, kombine nikel ve molibden içermelidir, çünkü nikel-molibden birleşiminin sertleştirilebilirlik üzerinde bu elementlerin tek başına kullanılmasından daha büyük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca su verme sırasında uygun sertliğe ulaşmak için alaşıma bor veya alternatif olarak krom ilavesi önemlidir. Bununla birlikte, alaşımlama, bir aşınma mekanizmasına karşı direnci artırabilirken, diğerine karşı direnci azaltabilir [26].

Tablo 2., farklı sertlik derecelerindeki aşınmaya dayanıklı çelikler için bazı mekanik özellikleri listelemektedir. Aşınmaya dirençli çelikler, genellikle yapısal çelik sınıfı S355'ten

daha yüksek sertliğe, daha yüksek akma ve gerilme mukavemetine sahiptir. 400HB çeliğin sertliği S355'in iki katıdır ve akma dayanımı yaklaşık üç kat daha yüksektir [26].

Tablo 2. Çelik üreticileri tarafından bildirilen aşınma çelikleri mekanik özellikleri [26].

Ticari Ad	Sertlik [HB]	Akma Mukavemeti $R_{p0.2}$ [N/mm ²]	Çekme Mukavemeti R_m [N/mm ²]	Uzama A [%]	Çentik Darbe Enerjisi J/cm ² -40°C
Domex 355 MC	-	355 (ReH)	430-550	23	27*
Laser 355 MC	-	355 (ReH)	430-530	24	40 (-20°C)*
Dillidur impact	310-370	950 (ReH)	1000	15	30*
Xar HT	310-370	960	1000	14	50*
Raex 400	360-440	1000	1250	10	30
Xar 400	370-430	1000	1250	10	50
Dillidur 400	370-430	800	1200	12	30
Hardox 400	370-430	1000	1250	10	45
Raex 500	450-540	1250	1600	8	30
Xar 500	470-530	1300	1600	9	25 (-20°C)
Xar 600	550	1700	2000	8	20 (-20°C)
*minimum					

Daha sert çelik kaliteleri, yani 500HB ve 600HB çelikler, daha yüksek mukavemete sahiptir, ancak 400HB çeliklere kıyasla oldukça benzer uzama ve darbe tokluğu değerlerine sahiptirler [26].

Aşınmaya dayanıklı çelikler, tarım (pulluklar, çapalar), ahşap işleme, hafriyat ve yol yapımı (kesici uçlar, ekskavatör kovaları, damper gövdeleri), geri dönüşüm (darbeli kırıcılar, elekler, öğütücüler) ve madencilik (ön yükleyici kovaları, hazneler, vagonlar) gibi çeşitli zorlu ortamlarda ve uygulamalarda kullanılmaktadır [26].

Abrazif aşınmada sertlik, çeliğin çizilerek aşınmaya karşı direnme kabiliyetini artırma konusunda önemli bir özelliktir. Malzeme ne kadar sertse, aşındırıcının yüzeye nüfuz etmesi ve hasar vermesi o kadar zor olur. Bir diğer önemli özellik, özellikle darbeler söz konusu olduğunda, malzemenin tokluğudur. Genel olarak yüksek sertliğe sahip malzemelerin daha düşük darbe tokluğuna sahip olma eğiliminde olduğu görülmektedir [27]. Artan sertlik ile birlikte baskın aşınma mekanizması, mikro-aşındırmadan mikro-kesmeye ve daha da fazla malzeme kaybına neden olabilecek mikro-çatlamaya neden olabilmektedir [28]. İdeal olarak, malzeme bu özelliklerin her ikisinin de iyi bir kombinasyonuna, yani nispeten yüksek sertliğe ve yeterli tokluğa sahip olmalıdır. Aşınma sistemindeki yükler, deformasyon sertleşmesi oluşturmak için yeterliyse, genellikle yüzey sertliğini yükselterek malzemenin

abrazif aşınma direncini artırır [27]. Bununla birlikte, aşırı sertleşme kırılmalığa da yol açabilir ve bu da aşınma oranını hızla artırabilir [29].

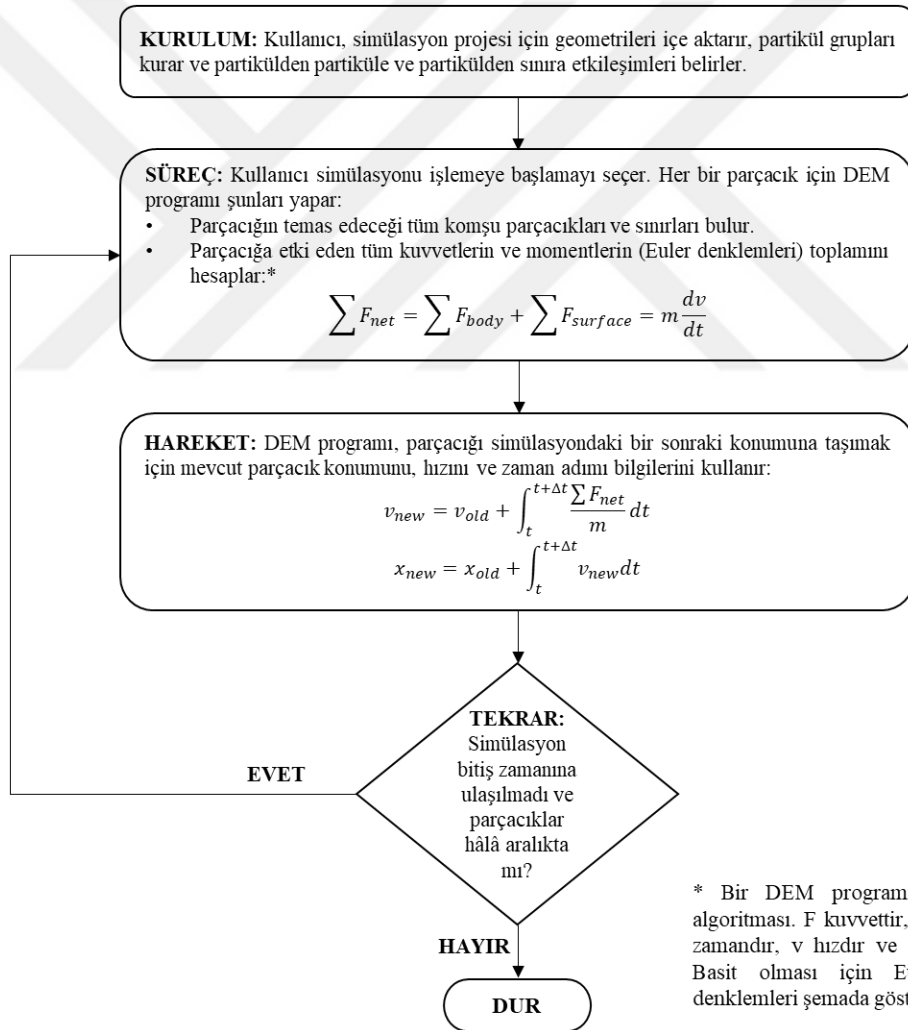
Darbe ve abrazif aşınmaya dayanması için, malzemenin yıkımsal bir hata olmaksızın darbelerin etkilerini karşılayacak kadar sert, sünek ve yeterince dayanıklı olması gerekir [30]. Aşırı plastik deformasyondan kaynaklanan boyut değişikliklerine direnmek ve daha pürüzlü bir yüzey oluşumuna engel olmak için malzemenin yeterli sertlikte olması gerekir. Küçük tanecik boyutu genellikle malzemede tokluğu artırırken, malzeme aynı zamanda nispeten yüksek sertliği koruyabilir, bu nedenle daha küçük tanecik boyutunun daha yüksek aşınma direnci ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Mikroyapılar yoluyla farklı özellik kombinasyonlarının çeşitli olasılıklarına sahip çelikler hem sertlik hem de süneklik gerektiren koşullar için çok yönlü bir malzeme seçimi sunar. Bununla birlikte, malzemenin toplam kullanılabilirliği, makul maliyet, üretim kolaylığı, kaynaklanabilirlik ve performansın bir kombinasyonudur. Malzemenin aşınmaya dayanma yeteneği, tüm tribosistemin doğru şekilde anlaşılmasını kullanan ve tüm etkili çalışma ve ortam değişkenlerini dikkate alan tasarımla da geliştirilebilir [26].

1.6. Ayırık Elemanlar Yöntemi (DEM)

Ayrık Elemanlar Yöntemi (Discrete Element Method, DEM), taneli malzemelerin dinamik davranışını belirlemek için Cundall ve Strack (1979) tarafından sunulan sayısal bir yöntemdir. Bu yöntem, sistemin sürekli bir malzeme olarak davrandığının varsayıldığı ve sistem içindeki her bir parçacığın bağıl hareketlerinin ve dönüşlerinin ihmal edildiği süreklilik modellerinden farklı olarak, tanecikli sistemdeki parçacıkları ve bunların etkileşimini dikkate almaktadır [31].

Cundall ve Strack (1979), DEM’de iki parçacık arasındaki temas kuvvetlerinin ve her parçacığın temastan sonra ortaya çıkan hareketinin, hareket denkleminde göre hesaplandığını belirtmişlerdir. Kuvvetlerin hesaplandığı zaman adımında, parçacıkların hızlarının ve ivmelerinin sabit olduğu varsayılır. Ek olarak, zaman adımı yeterince küçüktür, böylece tek bir zaman adımı sırasında sadece parçacığın yakın komşuları temas kuvvetleri üzerinde etkiye sahiptir. Her bir zaman adımında, temas kuvvetinden kaynaklanan parçacığın hareketi Newton'un ikinci yasası ile hesaplanır ve temas kuvvetlerinden ortaya çıkan parçacığın yer değiştirmesi kuvvet-yer değiştirme yasasından belirlenir [32].

DEM simülasyonunu uygulamak için öncelikle geometri, malzeme özellikleri ve sistem yükleme veya deformasyon çizelgesi tanımlanır. Daha sonra simülasyon, belirli sayıda yineleme için geçici veya dinamik bir analiz olarak başlar. Her zaman adımında, temas eden parçacıklar tanımlanır ve aralarındaki ara temas kuvvetleri hesaplanır. Her parçacık üzerine etki eden kuvvetler ve momentler daha sonra parçacıkların sırasıyla öteleme ve dönme hareketini belirleyen bu karşılıklı temas kuvvetlerine dayalı olarak hesaplanır. Parçacıkların yer değiştirmesi ve oryantasyonu güncellenir ve bir sonraki adımda temas kuvvetleri bu güncellemelere göre hesaplanır. Simülasyon belirtilen yineleme sayısına ulaşıncaya kadar işlem tekrarlanır [32].



Şekil 9. Bir DEM yazılımının şematik algoritması [33].

1.7. Ayrık Elemanlar Yönteminde Fiziksel Modeller

Parçacıklar arasındaki temas kuvvetleri, temas noktasına normal ve teğet olmak üzere iki bileşene bölünmüştür. Bu normal ve teğetsel bileşenler, yayların, sürgülerin ve sönümleyicilerin kombinasyonlarından oluşan ve temaslı modeller olarak adlandırılan modellerle temsil edilir. Normal bileşen için en basit temas modeli Hertz (1882) tarafından önerilmiştir ve teğet bileşen için Mindlin (1949) ve Mindlin ve Deresiewicz (1953) tarafından geliştirilmiştir. Bu temas modelleri ve daha karmaşık olanları aşağıda açıklanmıştır [32].

1.7.1. Temas Kuvveti Modelleri

Herhangi bir DEM yazılımındaki temas kuvvetleri aşağıdaki iki bölümden oluşur:

- Temas düzlemine normal kuvvetler
- Temas düzlemine teğet kuvvetler

Küresel parçacıklar için temas düzlemi, iki kürenin merkezlerini birleştiren çizgiye diktir. Parçacık-yüzey teması durumunda, çizgi, bir kürenin merkezini ve bir sınır oluşturan bir üçgenin en yakın noktasını birleştirir. Yuvarlak olmayan parçacıklar için, bir temas düzlemini belirleme algoritması daha karmaşıktır; aşağıdakilerden herhangi birinin hesaplanmasını içerir:

- İki parçacığın en yakın noktaları.
- Parçacık ve üçgenin en yakın noktaları.
- Fiziksel temas durumunda maksimum örtüşme mesafesine sahip iki nokta.

Temas düzlemi, bu en yakın noktaları birleştiren çizgiye dik bir düzlemdir [33]. Ayrık elemanlar yöntemi içinde yer alan temas modelleri ve diğer modeller aşağıda açıklanmıştır.

1.7.1.1. Normal Kuvvet Modelleri

Bir DEM simülasyonu için bir normal kuvvet modeli iki ana şarta dayanmaktadır. Birincisi, kuvvet itici özellikte olmalıdır. İkinci olarak, parçacıklı bir ortam aşırı derecede enerji kaybı yaşanan bir sistem olduğundan, normal temas kuvveti modeli önemli miktarda enerji dağılımına izin vermelidir [33].

1.7.1.1.1. Histeretik Doğrusal Yay Modeli

İlk olarak Walton & Braun tarafından önerilen bu elastik-plastik normal temas modeli, uzun simülasyon sürelerinin ek yükünü getirmeden bir temasta plastik enerji dağılımının simüle edilmesine izin vermektedir. Viskoz sönümlleme kabulü uygulanmadığı için enerji dağılımı çevre parçacıkların bağıl hızlarından etkilenmemektedir ve bu durum enerji dağılımının diğer temaslara duyarsız olmasını sağlamaktadır. Bu yöntemin başka bir avantajı ise sıkıştırılabilir malzemelerin, temas örtüşmesinin neredeyse sıfır olması sebebiyle verimli bir şekilde modellenebilmesidir [34].

Histeretik doğrusal yay modeli, aşağıdaki denklem setinde açıklandığı gibi uygulanır:

$$F_n^t = \begin{cases} \min (K_{nl}s_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n), & \text{if } \Delta s_n \geq 0 \\ \max (F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n, \lambda K_{nl}s_n^t), & \text{if } \Delta s_n < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Burada F_n^t ve $F_n^{t-\Delta t}$, sırasıyla mevcut ve önceki zamanındaki normal elasto-plastik temas kuvvetleridir, Δt ise zaman adımıdır. Mevcut zaman boyunca temas normal örtüşmesindeki değişiklik Δs_n olarak tanımlanırken, parçacıklar birbirlerine yaklaştıkça pozitif, ayrıldıklarında ise negatif olduğu varsayılır. s_n^t ve $s_n^{t-\Delta t}$ sırasıyla mevcut ve önceki zamandaki normal örtüşme değerleridir. K_{nl} ve K_{nu} sırasıyla yükleme ve boşaltma temas sertliklerinin değerleri iken λ boyutsuz küçük bir sabittir [33].

1.7.1.1.2. Doğrusal Yay-Sönüm Modeli

İlk olarak Cundall & Strack'in makalesinde önerilen bu modelin temelinde yaygın olarak kuvvet, doğrusal bir elastik itme kuvveti ve bir sönümlleme kuvvetinden oluşur [35]:

$$F_n = K_{nl}s_n + C_n\dot{s}_n \quad (2)$$

Burada K_{nl} normal temas sertliği, C_n normal sönümlleme katsayısı, s_n temas normal örtüşmesi ve $\dot{s}_n$ temas normal örtüşmesinin zamana göre türevidir [33].

Doğrusal yay-sönüm modelindeki enerji kaybı, doğası gereği viskozdur ve yalnızca Denklem (2)'deki sönümlleme kuvveti terimine bağlıdır. Normal sönümlleme katsayısının değeri C_n , viskoz enerji yayılımının esnek olmayan bir çarpışmanın enerji yayılımı ile

eşleşeceği şekilde belirlenebilir ve bu da geri sıçrama katsayısı değeri ile belirlenir. Doğrusal yay-sönüm modeli, DEM simülasyonlarında popüler olmasına rağmen, diğer yöntemlere kıyasla doğruluğu tartışmalıdır. Çünkü gerçek dünyadaki enerji dağıtımı viskozdan ziyade plastiktir. Viskoz yayılma miktarı yalnızca tek temaslar için doğru olduğundan, özellikle parçacıkların aynı anda birden fazla teması olduğunda doğruluğu düşmektedir [33].

1.7.1.1.3. Hertzian Yay-Sönüm Modeli

Bu model, doğrusal yay-sönüm modeline benzer fakat temel fark, normal kuvvetin hem elastik hem de sönümleme bileşenlerinin, Hertz modelindeki örtüşmenin doğrusal olmayan fonksiyonları olmasıdır. Elastik kısım, 19. yüzyılın sonlarında Hertz tarafından geliştirilen klasik temas teorisine dayanmaktadır.

Hertzian yay-sönüm modelinin formu şu şekilde yazılabilir [36]:

$$F_n = \hat{K}_H s_n^{\frac{3}{2}} + \hat{C}_H s_n^{\frac{1}{4}} \dot{s}_n \quad (3)$$

Burada $\hat{K}_H$ rijitlik katsayısı, s_n temas normal örtüşmesi, $\dot{s}_n$ temas normal örtüşmesinin zamana göre türevi ve $\hat{C}_H$ sönümleme katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Hertzian Yay-Sönüm modeli, bütün tanjant ve adheziv kuvvet modelleri ile birlikte çalışabilen tek normal kuvvet modeli olmakla birlikte işlem süreleri diğer normal kuvvet modellerine göre daha uzun sürmektedir [33].

1.7.1.2. Teğetsel Kuvvet Modelleri

DEM uygulamalarında temas kuvvetlerinin teğetsel bileşenlerini hesaplamak için kullanılan modeller aşağıda açıklanmıştır.

1.7.1.2.1. Doğrusal Yay Coulomb Limit Modeli

Bu modeldeki teğetsel kuvvet, elastik-sürtünme kuvvetidir. Teğetsel kuvvetin tamamen elastik olduğu düşünülürse, t zamanındaki değeri şu şekilde verilir [33]:

$$F_{\tau,e}^t = F_{\tau}^{t-\Delta t} - K_{\tau} \Delta s_{\tau} \quad (4)$$

Burada $F_{\tau}^{t-\Delta t}$, t zamanından önceki zamandaki teğetsel kuvvetin değeri, Δs_{τ} zaman adımı sırasında parçacıkların teğetsel bağıl yer değiştirmesi ve K_{τ} ise teğetsel sertlik değeridir. Ancak bu modelde teğetsel kuvvet Coulomb'un sınırını aşamaz. Bu nedenle, teğetsel kuvvetin tam ifadesi şöyledir:

$$F_{\tau,e}^t = \min(|F_{\tau,e}^t|, \mu F_n^t) \frac{F_{\tau,e}^t}{|F_{\tau,e}^t|} \quad (5)$$

Burada F_n^t , t zamanındaki normal temas kuvveti, μ sürtünme katsayısıdır. Kayma davranışının, teğetsel kuvvet değeri olan $F_{\tau,e}^t$ 'nin μF_n^t değeri limitini aşabildiği ilk temas anında başladığı varsayılır [33].

1.7.1.2.2. Coulomb Limit Modeli

Bu, DEM simülasyonunda uygulanan en basit teğetsel kuvvet modelidir. Bu model için kayma koşulu bağıl hızın teğetsel bileşenini baz alır ve teğetsel kuvvetlerin bağıl hız vektörüne göre ifade edilmesiyle hesaplanır. Bu modele göre teğetsel kuvvet şu şekilde verilir:

$$F_{\tau} = -\mu F_n \frac{\dot{s}_{\tau}}{|\dot{s}_{\tau}|} \quad (6)$$

Burada μ sürtünme katsayısı, F_n temasta normal kuvvet ve $\dot{s}_{\tau}$ bağıl hız vektörünün teğetsel bileşenidir. Bu model içerisinde kayma şartı, teğetsel bileşenin bağıl hız değeri şeklinde ele alınmaktadır. Eğer bu teğetsel bileşen, hız limitinin altına düşerse temas içerisinde kayma olmadığı varsayılmaktadır. Coulomb limit modeli, her üç temas kuvvet modeli ile çalışabilmektedir [33].

1.7.1.2.3. Mindlin-Deresiewicz Model

Mindlin (1949) ve Mindlin ve Deresiewicz (1953) tarafından geliştirilen Mindlin-Deresiewicz teorisi, DEM simülasyonlarında kullanılan temas modellerinin çoğunun ana parçasıdır [37], [38], [32]. Bu teorinin ana varsayımı, teğet çekişin, Hertizan teorisine göre hesaplanan normal çekiş dağılımını etkilemediğidir. Mindlin (1949) normal kuvvet sabit olduğunda teğetsel kuvvet uygulayarak temas alanının bir kısmında bir "kayma" ve diğer kısımlarda bir "yapışma" olduğunu göstermiştir. Temas alanı dairesel olduğundan, Hertz kuramına göre, "yapışma" alanı merkezi çemberdedir, oysa kayma "yapışma" alanı etrafındaki dairesel bir bölgede meydana gelir. Mindlin ve Deresiewicz'in (1953) çalışması, teğetsel temas yayının teğetsel sağlamlığının mevcut normal yüke, mevcut teğet yüke, yük geçmişine ve teğet yükün artıp azalmadığına bağlı olduğunu gösterir [32].

Bu modeldeki teğetsel kuvvet şu ifadelerle verilmektedir [33]:

$$F_t = -\mu F_n \left(1 - \zeta^2\right) \frac{s_t}{|s_t|} + \eta_t \sqrt{\frac{6\mu m^* F_n}{s_{t,max}}} \zeta^{\frac{1}{4}} \dot{s}_t \quad (7)$$

Burada μ sürtünme katsayısı, F_n normal kuvveti, s_t temastaki teğetsel bağıl yer değiştirme, $\dot{s}_t$ temastaki bağıl hızın teğetsel bileşeni, $s_{t,max}$ parçacıkların kaymaya başladığı maksimum bağıl teğetsel yer değiştirme, m^* efektif kütle ve η_t tahmin edilen teğetsel sönümleme oranıdır. Yuvarlanma direncinin devre dışı bırakıldığı bu yöntem yalnızca Hertizan Yay-Sönüm normal kuvvet modeli ile birlikte çalışabilmektedir [33].

1.7.2. Ab-t10 Kırılma Modeli

Ab-t10 kırılma olasılığı, Vogel & Peukert (2005) tarafından ortaya konan modele ve Shi & Kojovic (2007) tarafından önerilen sonraki modifikasyona dayanmaktadır [39], [40]. Bu kırılma modeli, her parçacığı aldığı darbe enerjisine bağlı olarak anında parçalara ayrılabilen tek bir varlık olarak ele almaktadır [33].

Özgül darbe enerjisi e_{imp} yükleme periyodu boyunca bir parçacıktaki tüm temas noktalarında temas kuvvetleri tarafından yapılan işin toplanmasıyla hesaplanmaktadır. Parçacığın kırılması için özgül darbe enerjisi parçacığın minimum kırılma enerjisinden e_{min} daha büyük olmalıdır. Bu minimum kırılma enerjisi, parçacık boyutuyla ilgilidir ve aşağıdaki ifade aracılığıyla elde edilir:

$$e_{min} = e_{min,ref} \frac{L_{ref}}{L} \quad (8)$$

Burada; $e_{min,ref}$ malzemenin bir referans parçacık boyutu için referans minimum özgül enerji değeri, L_{ref} referans parçacık boyutu ve L gerçek parçacık boyutudur. Ab-t10 modelinde, belirli bir kümülatif özgül temas enerjisi değeri için kırılma olasılığı şu şekilde hesaplanır:

$$P(e_{cum}) = 1 - \exp(-Se_{cum}L/L_{ref}) \quad (9)$$

Burada S bir malzeme sabiti ve e_{cum} kümülatif özgül temas enerjisi değeri olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir anda Denklem (9) ile hesaplanan $P(e_{cum})$ değeri parçacığın gücünden daha büyükse parçacık kırılacaktır. Bu koşul karşılandığında ve parçacık kırıldığında, fragmanlar, kullanıcının belirttiği bir boyut dağılımına göre kırılır. Bu durumda gerekli t_{10} parametresinin değeri aşağıdaki ifadeye göre hesaplanır:

$$t_{10} = M \left[1 - \exp\left(-Se_{cum} \frac{L}{L_{ref}}\right) \right] \quad (10)$$

Burada t_{10} , parçacık boyutunun 1/10'u kadar bir elek boyutundan geçen parçaların kütlece yüzdesidir. M kırılmaya maruz kalan bir malzeme için maksimum t_{10} 'dur. M ve S değerleri literatürde sırasıyla A ve b parametreleri olarak da ele alınmaktadır [33].

1.7.3. Aşınma Modeli

DEM simülasyonunda uygulanan aşınma modeli, Archard'ın aşınma yasasına dayanmaktadır. Bu fenomenolojik yasa, malzemenin hacim kaybını, malzemenin

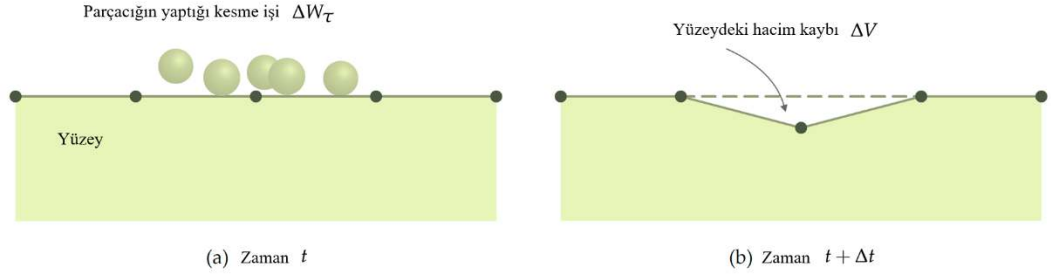
yüzeyindeki sürtünme kuvvetleri tarafından yapılan işle ilişkilendirir. Archard yasası genellikle şu şekilde ifade edilir [41]:

$$V = k \frac{F_{\tau} s_{\tau}}{H} \quad (11)$$

Burada V yüzeyde hasar gören toplam malzeme hacmi, F_{τ} yüzeye uygulanan teğetsel kuvvet, s_{τ} yüzeydeki kayma mesafesi, H aşınmaya maruz kalan malzemenin sertliği ve k boyutsuz ampirik bir sabittir. DEM simülasyonunda uygulama amacıyla, Archard yasası artımlı biçimde ele alınır:

$$\Delta V = C \Delta W_{\tau} \quad (12)$$

Burada ΔV bir simülasyon zaman adımı sırasında aşınan malzeme hacmi, ΔW_{τ} aynı zaman aralığında bir yüzeyle çarpışan parçacıkların yaptığı kesme işi ve $C = k/H$ kullanıcı tarafından sağlanan bir sabittir. DEM simülasyonunda bir problemdeki her içe aktarılan sınır yüzeyi, farklı bir C değeri ile tanımlanabilir [33].



Şekil 10. Bir yüzeyin aşınmasının şematik gösterimi [33].

Genel olarak, endüstriyel proseslerdeki gerçek aşınma ömrü, DEM simülasyonuna göre çok daha uzundur. Bu problem, simülasyon süresini kısaltarak ve C aşınma oranını belli bir oran ile artırarak aşılabılır. Uygun bir C değeri, iki sezgisel kuralı takip ederek belirlenebilir:

- C değerini belli bir katsayı bir faktörü kadar arttırmak ve simülasyon süresini aynı faktörle azaltmak, gerçek zamandaki aşınma özelliklerini korur.

- Tüm simülasyon süresi gerçek zaman değeri için yeterince uzun olmalıdır.

Çok büyük C değerleri kullanıldığında her iki kural da ihlal edilir ve bu da parçacıkların hareketini büyük ölçüde bozan geometride hızlı değişiklikler üretir [33].

1.8. DEM Giriş Parametrelerinin Belirlenmesi

DEM simülasyonu için hangi temas modelinin kullanıldığına bağlı olarak, modelin doğru bir şekilde simüle edilebilmesi için belirlenmesi gereken malzeme girdi parametreleri vardır. Doğrudan ölçümler, kalibrasyon ve literatürden tahmin dahil olmak üzere bu parametreleri belirlemenin birkaç yolu vardır. Bunlar; DEM giriş parametrelerinin doğrudan ölçümü ve DEM giriş parametrelerinin kalibrasyonu şeklinde sıralanabilir.

Ayrık elemanlar yönteminde modellenen dökme katı malzemenin parçacık şekli ve boyutu, laboratuvarında ölçülebilen birkaç DEM parametresi arasındadır. Parçacık şekli, küresellik ve en-boy oranı ile karakterize edilebilir. En boy oranı genellikle küçük eksenin (en küçük boyut) parçacığın ana eksenine (en büyük boyut) oranıyla tanımlanır [32].

Tanecikli malzemenin katı yoğunluğu, parçacık kütesinin parçacık hacmine bölünmesiyle de belirlenebilir. Parçacık kütlesi, hassas bir terazi kullanılarak doğrudan ölçülebilir ve parçacık hacmi, malzemenin suya batırılması yöntemine göre belirlenebilir. Young modülü, sürtünme katsayısı ve geri sıçrama katsayısı, ölçülebilen diğer DEM giriş parametrelerindendir [32].

Bazı DEM girdi parametrelerinin, özellikle de küçük parçacık boyutları için yerinde veya laboratuvarında ölçülmesi zordur. Bu durumda, doğru bir değer seti bulmak için parametrelerin toplu kalibrasyonu gerekmektedir. Bunun için belirli bir malzeme yığın özelliği ya yerinde ya da laboratuvarında ölçülür. Deney kurulumu ve prosedürü izlenerek tam deney kurulumu sayısal olarak modellenir. Daha sonra DEM girdi parametreleri, simülasyonun toplu tepkilerini ölçülen değerlere mümkün olduğunca yakın elde etmek için değiştirilir. Bu yöntemdeki kilit unsur, kalibrasyon deneyinin nihai uygulamadan farklı olması gerektiği veya sonuçların yalnızca bir duyarlılık analizi olacağı ve yeni bir sistem tasarlarlarken herhangi bir faydasının olmayacağıdır [42].

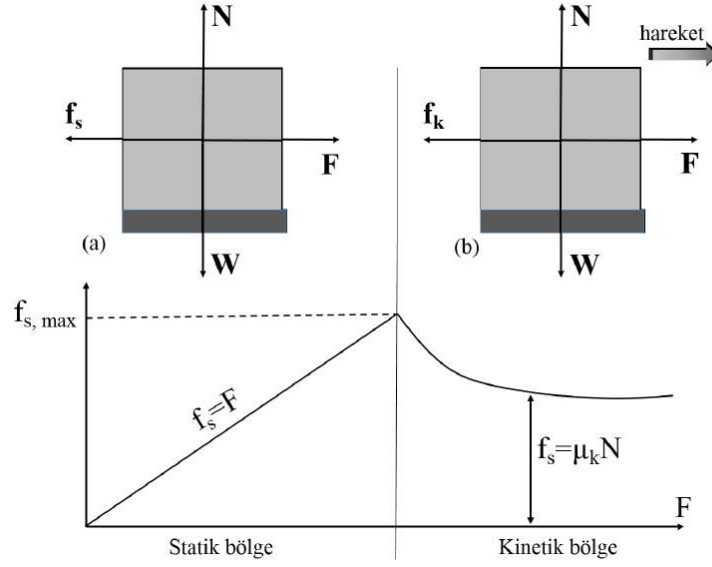
Geri sıçrama katsayısı, kayma ve yuvarlanma sürtünme katsayısı, ölçülmesi zor olan girdi parametreleri arasındadır ve bu katsayıları kalibre etmek için çalışmalar yapılmıştır. Yığın ve düşme açısı testi, kayma ve yuvarlanma sürtünmelerini kalibre etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [43].

Li vd. tarafından demir cevheri üzerine yapılan çalışmada kayma sürtünme katsayısı ve yuvarlanma sürtünme katsayılarının belirli aralıklarda arttırılmasıyla birlikte yığın açısında artış yaşandığı gözlemlenmiştir [44]. Yan vd. tarafından yapılan çalışmada, düşük sürtünme seviyelerinde geri sıçrama katsayısındaki artışın yığın açısını arttırdığı, fakat yüksek sürtünme seviyelerinde ise geri sıçrama katsayısının artmasının yığın açısını azalttığından bahsedilmiştir. Yine aynı çalışmada, statik sürtünme katsayısının artmasıyla birlikte yığın açısının arttığına da yer verilmiştir [45].

DEM girdi parametrelerine ihtiyaç duyulan diğer modeller ise kırılma ve aşınma modellemeleridir. Shi ve Kojovic tarafından yapılan çalışmada geniş bir aralıkta parçacık boyut dağılımlarına sahip çeşitli sayıda numuneler kullanılarak ağırlık düşürme testleri gerçekleştirilmiş ve kırılma enerjileri üzerinden model doğrulaması yapılmıştır [40]. De Magalhães ve Tavares tarafından yapılan çalışmada ise konik kırıcı ekipmanındaki kırılma davranışı incelenmiş olup, A ve b kırılma parametreleri belirlenmiştir [46]. Öte yandan, Franke vd. tarafından yapılan çalışmada değirmen astarları üzerinde yaşanan aşınma davranışı, altı farklı karakteristiğe sahip operasyon tanımlanmış ve DEM simülasyonları aracılığıyla incelenmiştir [47].

1.8.1. Eğik Düzlem Testi

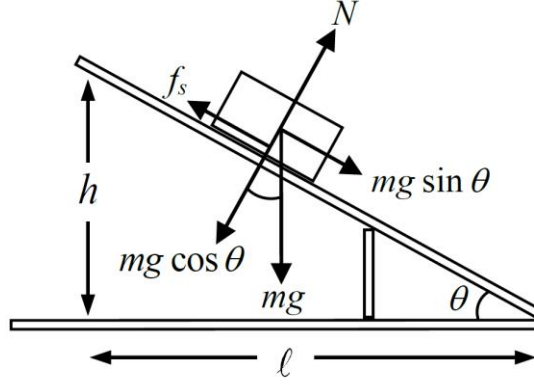
Katı bir cisim, bir yüzey üzerinde hareket ederken cisimlerin temas yüzeyleri arasında cismin hareketine karşı sürtünme kuvveti adı verilen ve hareket yönüne zıt yönde olan bir direnç kuvveti meydana gelir. Sürtünme kuvvetinin temelinde temas yüzeyleri arasındaki elektromanyetik etkileşimler yatmaktadır. Ancak iki yüzey arasındaki sürtünme kuvvetini matematiksel bir yapıda belirlemek mümkün değildir ve sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı daha çok deneysel yöntemlerle belirlenmektedir. Sürtünme kuvveti cisimlerin harekete başlayabilmeleri ve hareketlerini sonlandırabilmeleri noktasında son derece önemlidir. Ayrıca, hareket olmasa bile, bir cisim harekete zorlandığında cisim ve zeminin temas yüzeyleri arasında bir sürtünme kuvvetinin ortaya çıktığı bilinmektedir. Cismin kayarak harekete başlayabilmesi için uygulanan dış kuvvetin sürtünme kuvvetini yenmesi gerekmektedir [48].



Şekil 11. Statik ve kinetik sürtünme kuvvetlerinin uygulanan dış kuvvetle ilişkisi [48].

Şekil 11.'de bir dış kuvvet etkisindeki yatay bir düzlemde harekete zorlanan bir cisim gösterilmektedir. Burada uygulanan dış kuvvetin cismi hareket ettirmeye yeterli olmadığı durum incelenmektedir. Bu durumda cismin hareketini önleyen kuvvete statik sürtünme kuvveti, eşlik eden katsayıya da statik sürtünme katsayısı adı verilir. Etkiyen kuvvetin büyüklüğü arttırıldığında cisim hareket etmeye başlayacaktır. Cisim tam harekete başlama sınırında iken sürtünme kuvveti en büyük değerini alır. Etki eden kuvvet bu değeri aştığında cisim hareket etmeye başlar. Hareket eden bu cisme etkiyen sürtünme kuvvetine ise kinetik sürtünme kuvveti ve eşlik eden katsayıya da kinetik sürtünme katsayısı denir [48].

Eğik düzlem testi, iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısının bulunması için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu deney ile iki cisim arasındaki yüzeylere ait sürtünme katsayılarının bulunması için eğim açısı ayarlanabilir bir eğik düzlem sistemi kullanılmaktadır [48].



Şekil 12. Eğik düzlem testi [49].

Deneyisel olarak statik sürtünme katsayısını belirlemek için Şekil 12.'de görüldüğü gibi eğik düzlemde bir cisim alınabilir. Eğik düzlemin eğim açısı, cisim hareket eşiğine ulaşınca kadar artırılır. Hareket eşiğinde eğik düzlemin eğim açısı tespit edilir. Bu kritik açı değerinden yararlanılarak statik sürtünme katsayısı bulunur [49].

$$\mu_s = \tan \theta = \frac{h}{l} \quad (13)$$

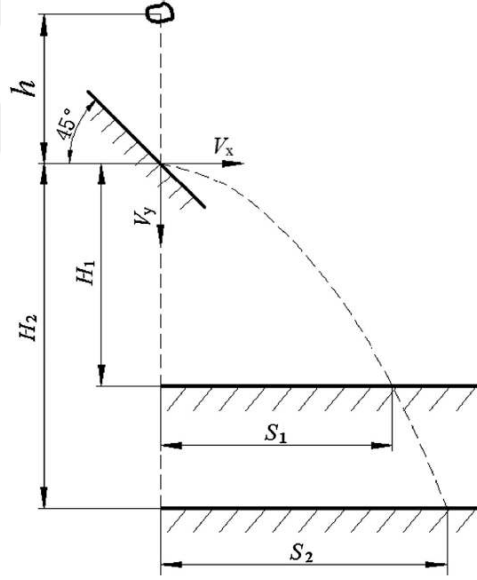
Deneyisel olarak kinetik sürtünme katsayısını belirlemek için yine eğik düzlem üzerinde bir cisim ele alınabilir. Cisim eğik düzlem üzerinde ya sabit hızla hareket ettirilmeli ya da ivmeli hareket ettirilmelidir. Cismi eğik düzlem üzerinde ivmeli hareket ettirmek daha kolay olur. Bu bağlamda eğik düzlem sistemi kritik açı değerinin biraz üstünde bir değere ayarlanır ve cismin ivmeli hareket yapması sağlanır. Bu harekette cismin belli bir mesafeyi ne kadar sürede aldığı ölçülür. Bundan yararlanarak ivmesi hesaplanır ve denklemde yerine konularak kinetik sürtünme katsayısı bulunur [49].

$$\mu_k = \frac{g \sin \theta - a}{g \cos \theta} \quad (14)$$

1.8.2. Geri Sıçrama Katsayısı Testi

Geri sıçrama katsayısı, çarpışma sırasında elastik olmayan yer değiştirmeler yüzünden kaybedilen enerji miktarını tanımlamak için kullanılan bir parametredir. Ayrıca çarpışmadan sonraki normal ayrılma hızının çarpışmadan önceki normal yaklaşma hızına oranı olarak ifade edilir [50]. 0 ile 1 aralığında değişen bu değer arttıkça ilgili parçacığın çarpışma esnasında daha az kinetik enerji kaybı yaşadığı kabul edilmektedir. Parçacıklarının düzensiz şekilleri nedeniyle, parçacıklar arasında büyük farklılıklar vardır, bu nedenle geri sıçrama katsayısının ölçümünde hataları azaltmak için birçok tekrar testine ihtiyaç duyulur [51].

Kinematik prensibine dayanarak, parçacık ile temas yüzeyi arasındaki geri sıçrama katsayısını ölçmek için bir test cihazı gereklidir. Parçacık ile temas yüzeyi arasındaki geri sıçrama katsayısı, bir parçacığın temas yüzeyi ile çarpışmasıyla ölçülür [51].



Şekil 13. Geri sıçrama katsayısı test cihazı şematik gösterimi [51].

Şekil 13’de h , temas yüzeyi üzerine düşen parçacıkların yüksekliğidir. Ön test sonuçları, düşme yüksekliğinin geri sıçrama katsayısı üzerinde çok az etkisi olduğunu göstermiştir. Burada temas yüzeyinin eğim açısı 45 derecedir ve serbest düşmeye bırakılan parçacık temas yüzeyine çarptıktan sonra eğik atış hareketi yapar. Çarpışmadan sonra

parçacığın hareketi düşey ve yatay olmak üzere iki bileşene ayrılır. Son olarak parçacık yatay plakanın üzerine düşer. Bu hareket aşağıdaki formüller ile gösterilir [51].

$$\begin{cases} S = V_x t \\ H = V_y t + \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (15)$$

Burada S , parçacıkların eğik plaka ile çarpıştıktan sonra yatay düzlemde yer değiştirmesidir. H ise, parçacıkların eğik plaka ile çarpıştıktan sonra dikey düzlemde yer değiştirmesidir. Yatay plakanın yüksekliği değiştirildikten sonra, yatay plakanın her iki konumunda da parçacıklarının yer değiştirmelerini ölçülür [51].

$$\begin{cases} V_x = \sqrt{\frac{g S_1 S_2 (S_1 - S_2)}{2(H_1 S_2 - H_2 S_1)}} \\ V_y = \frac{H_1 V_x}{S_1} - \frac{g S_1}{2 V_x} \end{cases} \quad (16)$$

Geri sıçrama katsayısının tanımından, geri sıçrama katsayısı formülü aşağıdaki gibi verilebilir:

$$C_r = \frac{V_n}{V_{0n}} = \frac{\sqrt{(V_x^2 + V_y^2)} \cos \left[45^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{V_y}{V_x} \right) \right]}{V_0 \sin 45^\circ} \quad (17)$$

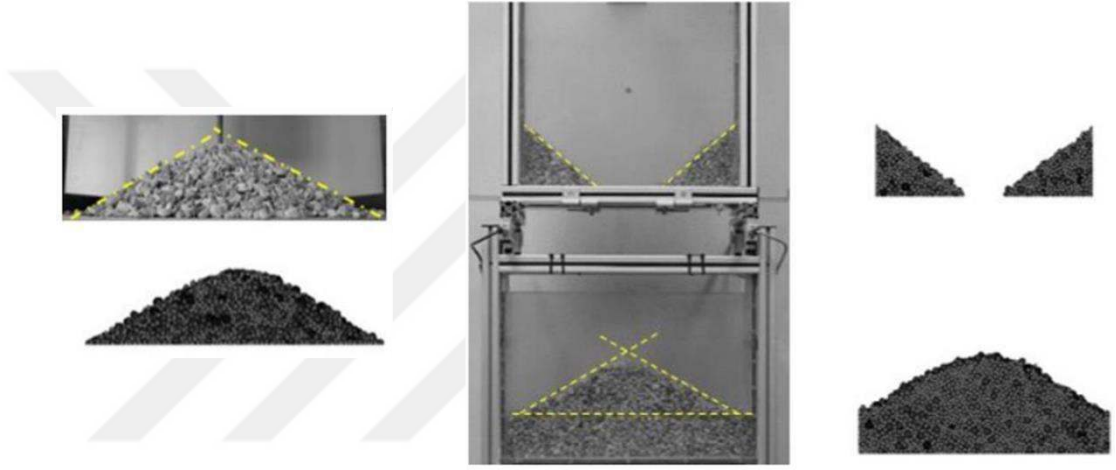
Burada C_r , geri sıçrama katsayısı, V_n , çarpışmadan sonraki normal ayrılma hızı ve V_{0n} çarpışmadan önceki normal yaklaşma hızıdır. Ayrıca $V_0 = \sqrt{2gh}$ şeklinde ifade edilir [51].

1.8.3. Yığın ve Düşme Açısı Kalibrasyon Testi

DEM simülasyonlarının sayısal karmaşıklığı, genellikle DEM modellerinin idealleştirilmesini zorlayarak kalibrasyon sürecini gerçekçi simülasyon sonuçlarının anahtarı haline getirir. Kohezyonsuz, serbest akışlı dökme malzemeleri kalibre ederken, yığın açısı gibi basit deneyler genellikle kalibrasyon için referans olarak kullanılır [52].

Yığın açısı, granül malzemelerin davranışını karakterize etmede en önemli makroskopik parametrelerden biridir [53]. Yığın açısı, parçacıkların doğal olarak sabit durumda oluşturduğu maksimum açı olarak tanımlanır ve parçacıkların dinamik özelliklerinden biridir. Yığın açısı, yerçekimi etkisi ile iç kuvvetler altında oluşmaktadır [54].

Yığın ve düşme açısı testlerinin gerçekleştirilmesi ve testlerde kullanılan katı yığın için tüm yığını temsil edecek hassasiyette malzeme parametrelerinin belirlenmesi, ayırık elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan simülasyonların doğruluğu için önemlidir.



Şekil 14. Yığın ve düşme açısı kalibrasyon testi [52].

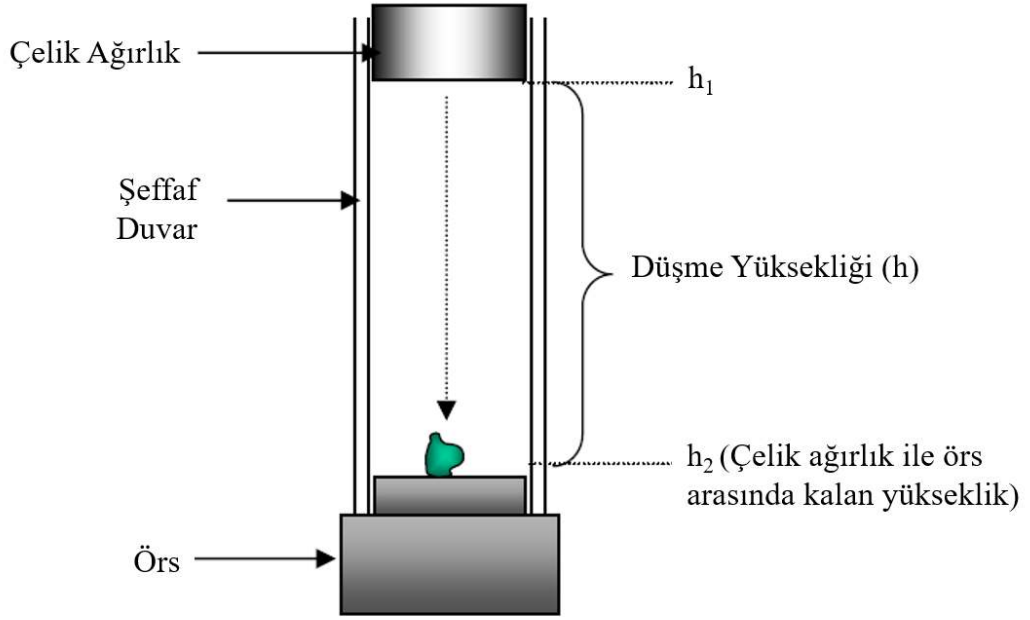
DEM girdi parametrelerinin doğruluğunun tespit edilmesi için girdi parametreleri, simülasyon ve test çıktılarının birbiri ile örtüştüğü uygun bir parametre kombinasyonu bulunana kadar, deneme yanılma yoluyla veya optimizasyon algoritmaları kullanılarak sistematik olarak değiştirilir. Yaygın olan bu yaklaşımla DEM girdi parametre takımı belirlenmiş olur.

Kalibrasyonun genellikle göz ardı edilen bir sorunu, bu parametre kombinasyonlarının belirsizliğidir. Bu nedenle, genellikle aynı makroskopik referans değerini eşleyebilen çeşitli kontak parametreleri vardır [52]. Kayma sürtünme katsayısı ve yuvarlanma direncinin yığın açısı üzerinde büyük etkisi olduğu gözlemlenmiştir [44]. Genel olarak, sürtünme katsayılarının artması, kürelerdeki şekil bozuklukları ve parçacık boyutunun azalması ile yığın açısı artar [55].

1.8.4. Ağırlık Düşürme Kalibrasyon Testi

DEM yazılımı, yüzeyler veya diğer parçacıklarla çarpışmalarda yer alan stres enerjisine dayalı olarak parçacıkların anlık kırılmasını tahmin etmek için modeller içerir. Bu modeller yalnızca çokyüzlü dışbükey parçacıklarla çalışır. Tüm bu kırılma modellerinin önemli bir ortak özelliği, bir parçacık kırıldığında ortaya çıkan parçaların hem kütleyi hem de hacmi korumalarıdır [33].

Ağırlık düşürme testi, kırılma malzemelerin kırılması için enerji girdisi/boyut küçültme ilişkisini belirlemek için kullanılır. Ağırlık düşürme testinin temel kontrol parametresi giriş enerjisidir. Bu, düşürülen ağırlığın kütlesinden ve bu ağırlığın numune parçacığına çarpmadan önce düşürüldüğü mesafeden belirlenir [56].



Şekil 15. Ağırlık düşürme testinin basit gösterimi [57].

Boyut küçültme ekipmanı tasarımları, simülasyon ve optimizasyon çalışmaları ancak gerçek kırılma bilgilerine dayanan güvenilir modellerinin oluşturulmasıyla başarılabilir. Ağırlık düşürme aletleri, kırılma fonksiyonlarının hesaplanması ve standart prosedürlerin geliştirilmesi için kullanılmıştır. Özgül kırılma fonksiyonu, özgül ufalama enerjisi E_{CS} (kWh/t), ve t_{10} kırılma parametresi arasındaki ilişki t-eğri yaklaşımı kullanılarak hesaplanabilir [58].

$$E_i = m_d g (h_i - h_f) \quad (18)$$

Burada, E_i darbe kırılma enerjisi ($m^2 kg/s^2$), m_d ağırlık düşürme başlığının kütlesi (kg), h_i düşürülen ağırlığın örsün üzerindeki ilk yüksekliği (m), h_f düşürülen ağırlığın örsün üzerindeki son yüksekliği (m) olarak tanımlanır. Özgül ufalama enerjisi E_{cs} (kWh/t) ise aşağıdaki formül ile hesaplanır. Burada, m_p ortalama parçacık kütlesi (g) olarak tanımlanmaktadır.

$$E_{cs} = E_i / m_p \quad (19)$$

t_{10} ve özgül ufalama enerji seviyesi arasındaki ilişki kurulduğunda, t-eğrilerini kullanarak istenilen tane boyu dağılımını elde etmek için gerekli özgül enerji tüketimi tahmin edilebilir [58].

$$t_{10} = A [1 - \exp(-b E_{cs})] \quad (20)$$

Burada; A , b malzeme darbe parametreleri ve E_{cs} özgül ufalama enerjisi (kWh/t) olarak tanımlanır.

Model parametreleri olan A ve b 'nin çarpımı "sıfır" giriş enerjisindeki $E_{cs} - t_{10}$ ilişkisinin eğimidir. Axb parametresi cevherin sertliğini karakterize etmek için kullanılabilir [58].

Ağırlık düşürme testi ile, malzemenin DEM yazılımı tarafından tahmin edilen enerji spektrumlarında parçacığın kırılma tepkisinin tutarlı bir miktarı belirlenir [57]. Bu testin amacı, özgül ufalama enerjisi (E_{cs}) ve t_{10} değerlerinin kırılma testi sonucunda belirlenmesiyle cevher kırılma parametreleri olan A ve b değerlerinin tahmin edilerek bulunmasıdır. Söz konusu parametrelerin elde edilmesi ile ilgili detaylı çalışma Napier-Munn vd. tarafından gerçekleştirilmiştir [59]. Bunun için ilk olarak deney sonuçlarından E_{cs} ve t_{10} değerleri bulunur. Daha sonra bu deneyin simülasyonu DEM yazılımı yardımıyla yapılarak A ve b parametreleri, E_{cs} ve t_{10} değerlerine göre belirlenir ve bu parçacık parametreleri bir akış simülasyonunda kırılma analizi yapılmak istenildiğinde kalibre edilmiş veri olarak kullanılabilir.

1.8.5. Aşınma Kalibrasyon Testi

Konveyörler, aktarım olukları ve damperli kamyon gövdeleri gibi dökme malzeme taşıma sistemleri, granül malzemelerin taşınması sırasında abrazif aşınmaya maruz kalan makine ve ekipmanlara örnek olarak gösterilebilir. Abrazif aşınma, yalnızca parça değişim maliyetlerini değil, aynı zamanda makine duruş süresi ve üretim kaybıyla ilgili maliyetleri de içeren geniş kapsamlı ekonomik sonuçlara yol açabilir. Granüler malzeme taşıma sistemlerinde abrazif aşınma sürecinin anlaşılması önemlidir. Ekipmanlarda meydana gelen aşınma, granüler malzeme akışıyla yakından bağlantılıdır. Bu olguları fiziksel olarak doğru bir şekilde incelemek için sistemin farklı bölümleri için uygun sayısal modellerin kullanılması gerekir [3].

Bu çalışma, bakır cevherinin büyük ölçekli aşınma tahmininde kullanımı için Archard'ın aşınma yasasının DEM simülasyonları için kalibre edilmesine odaklanmaktadır. Sayısal çalışmalarda, aşınma modellerini kalibre etmek için abrazif kayma aşınmasını ölçmek için bir test cihazı (döner tambur testi) modellenir ve simüle edilir. Bu yöntem, parçacıkların hem boyutu hem de şekli gerçek duruma yakın olduğundan, gerçek bir büyük ölçekli uygulamaya yakın bir sonuç verir. DEM simülasyonları ile kalibre edilmiş aşınma modeli daha sonra aşınma miktarını elde etmek için gerçek ölçekli ekipman simülasyonlarında kullanılır.



Şekil 16. Aşınma kalibrasyon testi örneği [6].

Fiziksel sistemlerin sayısal modellemesi ile çalışırken, mekanik tepki hesaplamasının doğruluğunu birçok faktör etkiler. Bu nedenle modellerin doğrulanması, sayısal sonuçlarda güven oluşturmak için önemlidir. Aşınma testi sayısal olarak simüle edilir ve aşınma modeli analiz edilir, tahmin edilir ve tamburun uzun süreli laboratuvar testleri ile karşılaştırılır. Bu simülasyonlardan bir aşınma sabiti elde edilir. Bu sabit daha sonra gerçek ölçekli ekipmanların DEM yazılımı ile aşınmasını simüle etmek için kullanılır [3]. Bu çalışmanın temel amacı, büyük ölçekli abrazif kayma aşınması için bir aşınma modelini kalibre etmek ve doğrulamaktır. Bu, yapı üzerindeki aşınma modelini bulmak için doğru malzeme akışına ve temas koşullarına sahip olmayı içerir. Amaç, aşınma uygulamalarının işlevselliğini ve ömrünü artırmak amacıyla malzeme seçimlerini ve geometriyi optimize etmek için sayısal araçları kullanma becerisine ulaşmaktır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

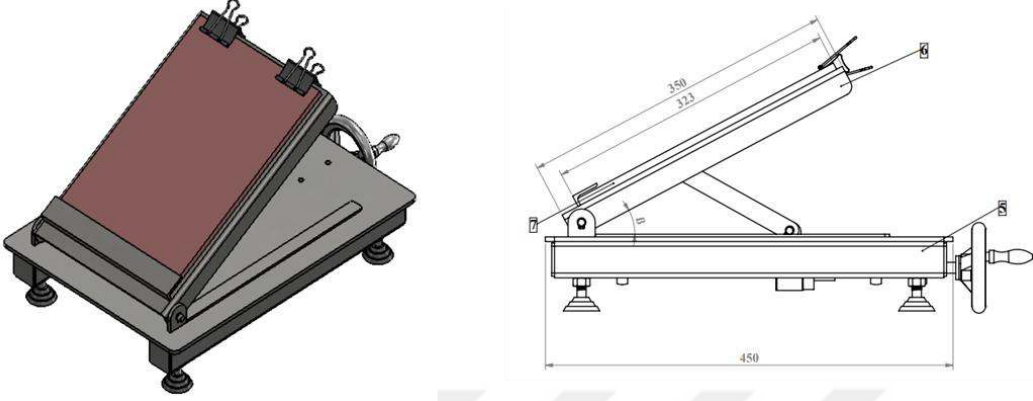
Bu çalışmada, katı yığın halinde bulunan ve belirli aralıktaki parçacık boyutlarında dağılım gösteren bakır cevherinin maden transfer ekipmanları üzerindeki aşınma etkisi incelenmiştir. Bunun için katı parçacık akış hareketi ayırık elemanlar yöntemi analizi ile simüle edilmiştir. DEM simülasyonlarının gerçekleştirilebilmesi için simüle edilecek malzemenin parçacık-parçacık ve parçacık yüzey etkileşim parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda malzeme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla bazı deney ve kalibrasyon test düzenekleri tasarlanmış ve bu ekipmanlar üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Bazı parametreler bu testlerden direkt olarak hesaplanabilirken bazı parametreler için test düzeneklerinin bir simülasyonu DEM yazılımı üzerinde gerçekleştirilmiş ve girilen parametreler test ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Böylece DEM girdi parametrelerinin elde edilmesiyle söz konusu malzemelerin gerçek sistemler üzerindeki simülasyonları gerçekleştirilmiştir. DEM simülasyonu içerisinde aktif edilen modüllerin doğru bir şekilde seçilmesi ve hassas bir şekilde detaylandırılması ile birlikte sistemlerin dayanımı, maruz kaldıkları aşınma miktarı, tıkanıklıklar, toz oluşumu sebebiyle yaşanan sorunlar, tesis verimliliği, sistemlerin ömürleri, termal değişiklikler vb. konular hakkında daha gerçekçi yaklaşımlar yapılması mümkün olacaktır.

2.1. DEM Parametre Testleri

2.1.1. Eğik Düzlem Testi

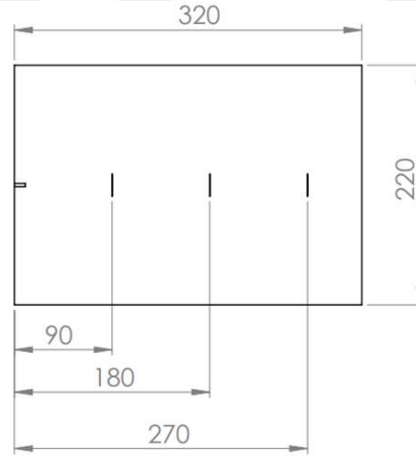
Bu çalışma kapsamında yapılan eğik düzlem testinin amacı, parçacık-yüzey etkileşiminden dolayı meydana gelen statik ve kinetik sürtünme katsayılarının belirlenmesidir. Eğik düzlem test ekipmanının şematik görüntüsü Şekil 17.'de verilmiştir. Eğik düzlem test ekipmanı, üzerindeki alüminyum volanın döndürülmesiyle açısı değiştirilebilen bir tabla içermektedir ve alüminyum volanın saat yönünde döndürülmesi ile tabla açısı arttırılabilecek, tersi yönde döndürülmesi ile eğim açısı azaltılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bakır cevheri ile sürtünme katsayılarının hesaplanacağı yüzeyler bu tabla

üzerine yerleştirilmektedir. Burada bakır cevheri ile 500HB sertliğindeki aşınma plakası, St-37 sac plaka ve kauçuk plaka üzerinde testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 17. Eğik düzlem test ekipmanı

Kinetik sürtünme katsayısının hesaplanabilmesi için her bir yüzey üzerine 90 mm, 180 mm ve 270 mm olacak şekilde referans çizgileri çizilmiştir (Şekil 18).



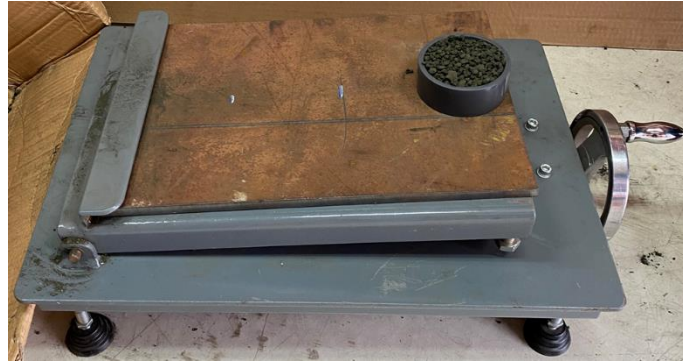
Şekil 18. Referans çizgileri

Eğik düzlem test ekipmanında yapılacak olan statik ve kinetik sürtünme katsayısı tayini deneylerinde, her iki deney için alınacak bakır numuneleri boyut olarak birbirine yakın olacak şekilde seçilmiştir. Bakır cevheri numunesinin hangi malzeme ile etkileşimi incelenecek ise bu malzemenin daha önceden hazırlanmış plaka hali tabla düzlemine yerleştirilmiştir. Elektronik açölçerde ana gövde düzlemi referans olarak alınmıştır. Statik

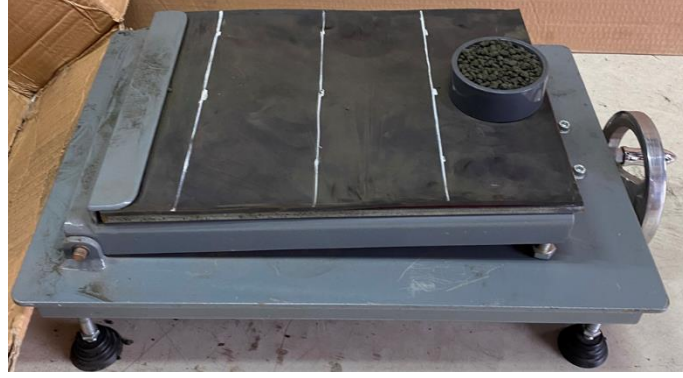
sürtünme katsayısı için eğik düzlem yatay konumda iken parçacık yığını plakanın sıfır çizgisine yerleştirilmiş ve alüminyum volan yavaşça saat yönünde döndürülerek test düzleminin açısı arttırılmıştır. Parçacıklar hareket edene kadar açı arttırılmış ve tam hareket ettiği anda sistem durdurulmuştur. Sistem durdurulduğunda elektronik açıölçer ile o andaki tablanın eğim açısı ölçülmüştür. Deney koşulları aynı olacak şekilde bu adımlar üç kez tekrarlanmış ve test verileri not edilmiştir. Alınan bu açı değerleri ile statik sürtünme katsayıları hesaplanmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak statik sürtünme katsayısı tayin edilmiştir.



Şekil 19. Statik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (St-37)



Şekil 20. Statik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (500HB aşınma plakası)

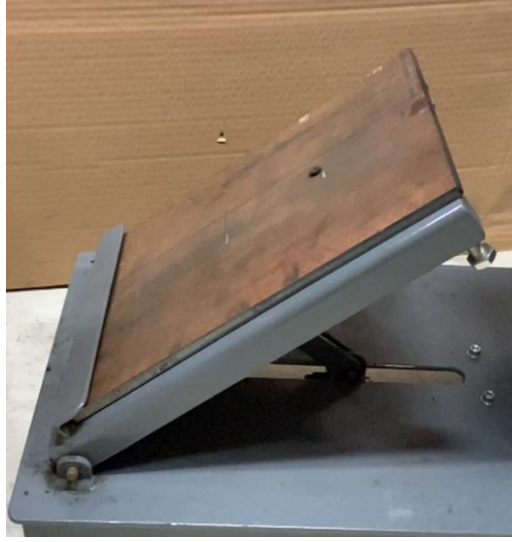


Şekil 21. Statik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (Kauçuk)

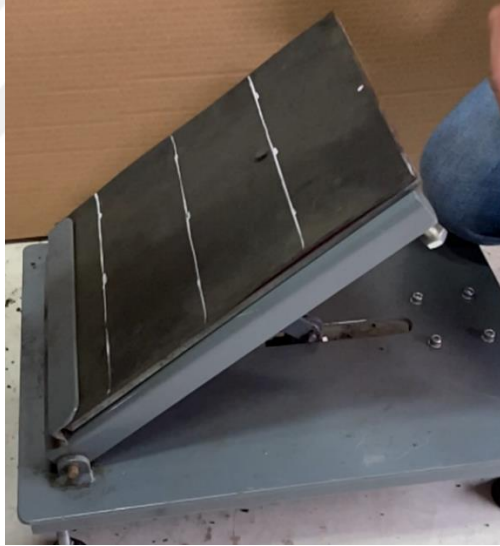
Kinetik sürtünme katsayısının bulunması için ise test düzleminin açısı hareketin başladığı açının birkaç derece fazlasına ayarlanmıştır. Bakır cevheri numunesi plakanın sıfır çizgisine yerleştirilmiş ve ilk hızsız olarak serbest bırakılmıştır. Test işlemi ağır çekim videoya alınmış ve numunenin referans çizgilerinden geçiş süreleri bu videolardan elde edilmiştir. Bu adımlar üç kez aynı şekilde tekrarlanarak referans çizgilerinden geçiş sürelerinin ortalaması alınmış ve ivme ile açı değerlerine bağlı olarak kinetik sürtünme katsayısı tayin edilmiştir.



Şekil 22. Kinetik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (St-37)



Şekil 23. Kinetik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (500 HB aşınma plakası)



Şekil 24. Kinetik sürtünme katsayısı için eğik düzlem testi (Kauçuk)

Bölüm 1.8.1.'de verilen eğik düzlem testi ile yapılan testler, elde edilen eğik düzlem açı değerleri ve bu açı değerlerine bağlı olarak hesaplanan statik katsayıları Tablo 3., Tablo 4. ve Tablo 5.'te verilmiştir. Statik sürtünme katsayısı verilen Denklem (13) ile hesaplanmış ve gerçekleştirilen üç test sonucunda hesaplanan statik sürtünme katsayılarının ortalaması alınarak bakır cevheri ile farklı yüzeyler arasındaki statik sürtünme katsayısı DEM simülasyonlarında kullanılmak üzere elde edilmiştir.

Tablo 3. Bakır cevheri ile aşınma plakası arasındaki statik sürtünme katsayısı

Yüzey Çifti			
Cevher	Bakır Cevheri		
Yüzey	Aşınma Plakası (500HB)		
Deney No	Okunan Açı Değeri [°]	μ_s Değeri	Ortalama μ_s Değeri
1	34	0,675	0,71
2	35,65	0,717	
3	36	0,727	

Tablo 4. Bakır cevheri ile St-37 plaka arasındaki statik sürtünme katsayısı

Yüzey Çifti			
Cevher	Bakır Cevheri		
Yüzey	St-37		
Deney No	Okunan Açı Değeri [°]	μ_s Değeri	Ortalama μ_s Değeri
1	33,55	0,663	0,67
2	33,6	0,664	
3	34,1	0,677	

Tablo 5. Bakır cevheri ile kauçuk arasındaki statik sürtünme katsayısı

Yüzey Çifti			
Cevher	Bakır Cevheri		
Yüzey	Kauçuk		
Deney No	Okunan Açı Değeri [°]	μ_s Değeri	Ortalama μ_s Değeri
1	34,1	0,677	0,69
2	34,7	0,692	
3	34,95	0,699	

Bölüm 1.8.1.'de verilen eğik düzlem testi ile hesaplanan bakır cevheri ile diğer yüzeyler arasındaki kinetik sürtünme katsayıları Tablo 6., Tablo 7. ve Tablo 8.'de verilmiştir. Burada eğik düzlem yüzeyler için kritik açı değerinin biraz üzerinde olan 40° açığa ayarlanmıştır ve eğik düzlem üzerinde bırakılan parçacığın referans çizgilerini geçme süreleri ölçülmüştür. Bu sürelerin ortalaması alınarak parçacığın ivme değeri hesaplanmış ve Denklem (14) kullanılarak parçacık ile yüzeyler arasındaki kinetik sürtünme katsayıları bulunmuştur.

Tablo 6. Bakır cevheri ile aşınma plakası arasındaki kinetik sürtünme katsayısı

Giriş Bilgileri			
Cevher	Bakır Cevheri		
Yüzey	Aşınma Plakası (500HB)		
Yer çekimi ivmesi [mm/s ²]	9810		
Belirlenen Açı Değeri [°]	40		
Deneyler			
Ölçülen mesafe [mm]	90	180	270
Deney 1: Zaman [s]	0,29	0,43	0,55
Deney 2: Zaman [s]	0,29	0,43	0,53
Deney 3: Zaman [s]	0,28	0,41	0,52
Ortalama Zaman [s]	0,29	0,42	0,53
t ² [s ²]	0,08	0,18	0,28
İvme, a [mm/s ²]	1778,85		
Kinetik Sürtünme Katsayısı [μ _k]	0,60		

Tablo 7. Bakır cevheri ile St-37 plaka arasındaki kinetik sürtünme katsayısı

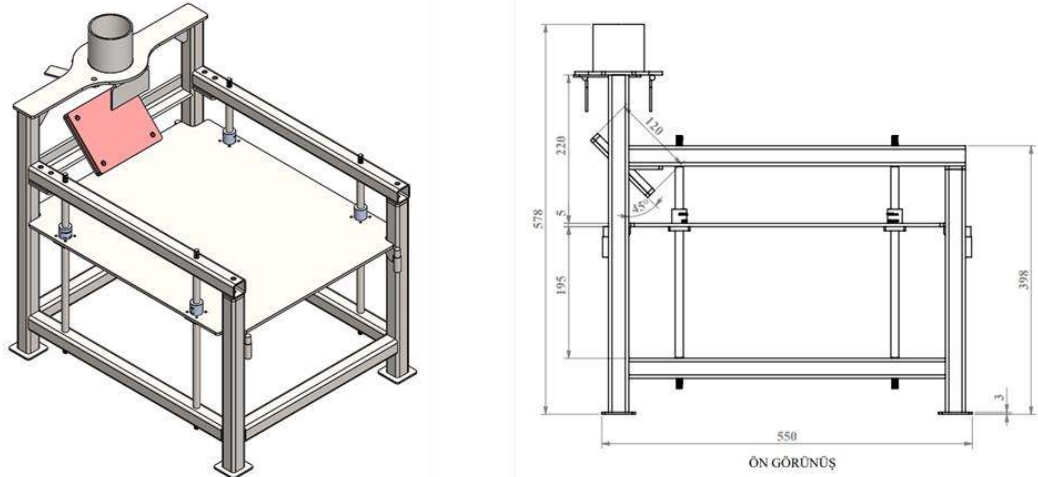
Giriş Bilgileri			
Cevher	Bakır Cevheri		
Yüzey	St-37		
Yer çekimi ivmesi [mm/s ²]	9810		
Belirlenen Açı Değeri [°]	40		
Deneyler			
Ölçülen mesafe [mm]	90	180	270
Deney 1: Zaman [s]	0,25	0,39	0,5
Deney 2: Zaman [s]	0,27	0,39	0,49
Deney 3: Zaman [s]	0,27	0,4	0,5
Ortalama Zaman [s]	0,26	0,39	0,50
t ² [s ²]	0,07	0,15	0,25
İvme, a [mm/s ²]	2029,14		
Kinetik Sürtünme Katsayısı [μ _k]	0,57		

Tablo 8. Bakır cevheri ile kauçuk arasındaki kinetik sürtünme katsayısı

Giriş Bilgileri			
Cevher	Bakır Cevheri		
Yüzey	Kauçuk		
Yer çekimi ivmesi [mm/s ²]	9810		
Belirlenen Aç ı Değeri [°]	40		
Deneyler			
Ölçülen mesafe [mm]	90	180	270
Deney 1: Zaman [s]	0,27	0,38	0,47
Deney 2: Zaman [s]	0,25	0,36	0,45
Deney 3: Zaman [s]	0,25	0,37	0,46
Ortalama Zaman [s]	0,26	0,37	0,46
t ² [s ²]	0,07	0,14	0,21
İvme, a [mm/s ²]	2469,93		
Kinetik Sürtünme Katsayısı [μ _k]	0,51		

2.1.2. Geri Sıçrama Katsayısı Testi

Bu çalışma kapsamında yapılan geri sıçrama testinin amacı parçacık-yüzey arasındaki çarpışma sonucunda sıçrayan parçanın geri sıçrama katsayısının belirlenmesidir. Geri sıçrama test ekipmanının bir görseli Şekil 25.'de gösterilmiştir. Test ekipmanı, yüksekliği değiştirilebilir bir tabla, bakır cevheri ile geri sıçrama katsayısının hesaplanacağı yüzeylerin monte edilebildiği 45° eğimli bir düzlem ve bu düzlemin üst tarafında altında iki kapakçık bulunan parçacığın yerleştirildiği ve serbest düşmeye bırakıldığı bir hazne içermektedir. Test ekipmanının çalışma prensibi üst hazneye yerleştirilen parçanın hazne kapaklarının açılmasıyla birlikte 45° eğimli düzleme çarparak tabla üzerine düşmesi olarak tanımlanmaktadır. Burada bakır cevheri ile 500HB sertliğindeki aşınma plakası, St-37 sac plaka ve kauçuk plaka üzerinde testler gerçekleştirilmiştir.

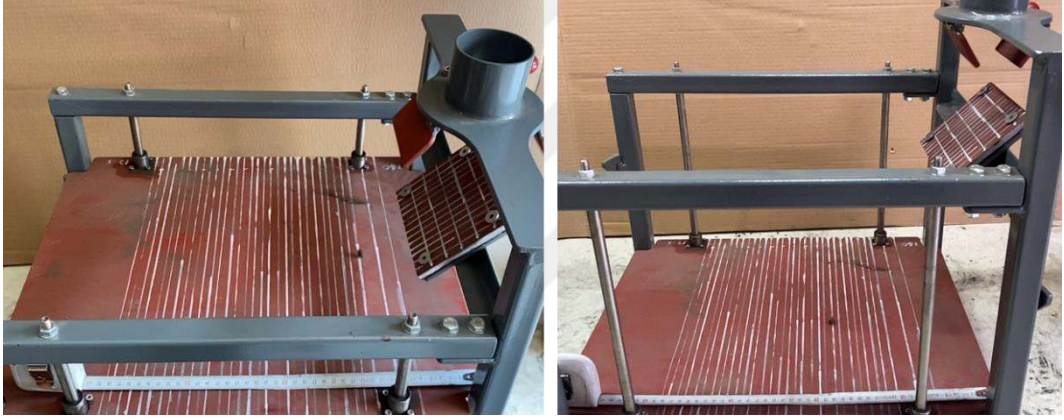


Şekil 25. Geri sıçrama katsayısı test ekipmanı

Geri sıçrama katsayısı testi için yaklaşık 25 mm boyutunda bakır cevheri numunesi hazırlanmıştır. Tabla üst konumda iken parçacık, hazneye yerleştirilmiş ve hazne altındaki kapakçıkların açılması ile parçacığın sırasıyla serbest düşme, çarpma ve eğik atış hareketleri yaparak tablanın üstüne düşmesi sağlanmıştır. Parçacığın düştüğü ilk mesafeyi bulabilmek ve düşme esnasında plaka ile tam bir çarpışma sağlayıp sağlayamadığı kontrol edilebilmek için deney yapılırken ağır çekim video kaydı alınmıştır. Parçacığın önce plakaya çarptığı nokta daha sonra tabla üzerinde düştüğü nokta belirlenmiştir ve parçacığın tabla üzerinde ilk çarptığı yerin yatay mesafesi ölçülmüştür. Sonrasında tabla alt konuma getirilerek aynı işlemler tekrarlanmıştır. Test işlemi 500HB sertliğindeki aşınma plakası, St-37 sac plaka ve kauçuk plaka yüzeyleri için beşer kere tekrarlanarak ölçüm verileri alınmış ve ölçülen mesafelerin ortalaması alınarak belirtilen yüzeyler ile bakır cevheri arasındaki geri sıçrama katsayısı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 26. St-37 plaka için geri sıçrama katsayısı testi



Şekil 27. 500HB aşınma plakası için geri sıçrama katsayısı testi



Şekil 28. Kauçuk için geri sıçrama katsayısı testi

Bölüm 1.8.2.'de verilen geri sıçrama katsayısı testi için test başlangıç verileri Tablo 9.'da verilmiştir.

Tablo 9. Geri sıçrama katsayısı testi başlangıç verileri

SABİTLER		
1	Parçacık boyutu [mm]	25
2	Yer çekimi ivmesi g [mm/s ²]	9810
3	Parçacığın plaka üzerine bırakılma yüksekliği, h [mm]	118
4	Tabla yüksekliği h_1 [mm]	102
5	Tabla yüksekliği h_2 [mm]	296
6	V_{0n} [mm/s]	1521,56

Test sonrasında parçacığın tabla üzerinde düştüğü yatay mesafe değerleri ve bu değerlerin ortalaması ile bu değerlere göre hesaplanan yatay ve düşey hız değerleri ile bakır cevheri ve diğer yüzeyler arasındaki geri sıçrama katsayısı değerleri Tablo 10., Tablo 11. ve Tablo 12.'de verilmiştir. Parçacığın hareketi sonucu yatayda aldığı mesafe ölçüldükten sonra bu değerlerin ortalaması alınmış, Denklem (16) ile parçacığın yatay ve düşey hız bileşenleri hesaplanmış ve Denklem (17) ile geri sıçrama katsayıları elde edilmiştir.

Tablo 10. Bakır cevheri ile aşınma plakası arasındaki geri sıçrama katsayısı

Yüzey Çifti					
Cevher	Bakır Cevheri				
Yüzey	Aşınma plakası (500HB)				
Deney No	S_1 [mm]	S_2 [mm]	V_x [mm/s]	V_y [mm/s]	C_r
1	101	190	796,89	144,17	0,53
2	107	211			
3	100	179			
4	106	160			
5	105	182			
Ortalama	103,8	184,4			

Tablo 11. Bakır cevheri ile St-37 plaka arasındaki geri sıçrama katsayısı

Yüzey Çifti					
Cevher	Bakır Cevheri				
Yüzey	St-37				
Deney No	S_1 [mm]	S_2 [mm]	V_x [mm/s]	V_y [mm/s]	C_r
1	94	159	824,81	299,45	0,57
2	100	194			
3	96	185			
4	93	179			
5	99	178			
Ortalama	96,4	179,0			

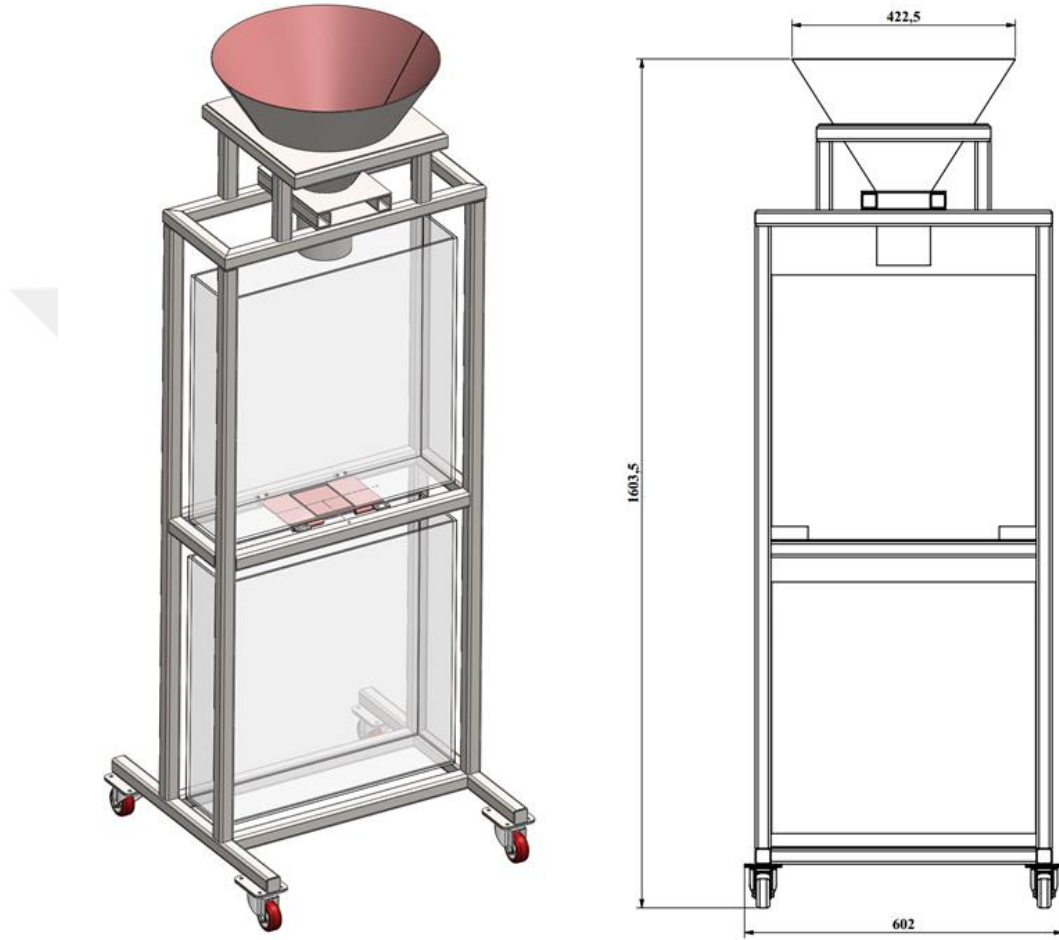
Tablo 12. Bakır cevheri ile kauçuk arasındaki geri sıçrama katsayısı

Yüzey Çifti					
Cevher	Bakır Cevheri				
Yüzey	Kauçuk				
Deney No	S_1 [mm]	S_2 [mm]	V_x [mm/s]	V_y [mm/s]	C_r
1	135	228	941,16	-75,93	0,62
2	132	233			
3	147	245			
4	167	257			
5	135	230			
Ortalama	143,2	238,6			
NOT:	V_x ve V_y hız büyüklükleri vektörel büyüklüklerdir. - ve + hızın yönünü belirtir.				

2.1.3. Yığın ve Düşme Açısı Kalibrasyon Testi

Çalışma kapsamında yapılan bu testin amacı dökme halindeki malzemenin yığın ve düşme açısı değerlerinin bulunmasıdır. Yığın ve düşme açısı test düzeneğinin bir görseli Şekil 29.'de verilmiştir. Test ekipmanı üst hazne, alt hazne, döküş hunisi ve ana gövde olmak

üzere dört kısımdan oluşmaktadır. Üst ve alt hazne pleksiglass malzemededen yapılmış ve dökme malzemenin oluşturacağı yığın açısının rahatça görülmesini sağlamıştır. Üst haznenin alt kısmında yığın oluşturan malzemenin alt hazneye boşaltılması için kapakçıklar bulunmaktadır.



Şekil 29. Yığın ve düşme açısı test ekipmanı

Test için boyutları 8-11 mm arasında değişen 4 kg bakır cevheri numunesi hazırlanmıştır. Yığın halindeki bu deney numunesi sabit bir debi ile test düzeneğinin döküş hunisinden üst hazneye boşaltılmıştır. Boşaltmanın ardından üst haznede bir katı yığın oluşmuştur ve bu aşama yığın açılarının okunabilmesi için fotoğrafa alınmıştır. Daha sonra üst haznenin alt kısmında bulunan kapakçıklar açılarak yığının üst hazneden alt hazneye dökülmesi sağlanmıştır. Üst haznede kalan yığın ve alt hazneye dökülen malzemenin oluşturduğu yığın, açılarının tespiti için fotoğraflanmıştır. Aynı işlemler beş kez tekrarlanarak

meydana gelen açılar ölçülerek ortalaması alınmış ve DEM simülasyonunda yapılacak olan kalibrasyon için açı değerleri belirlenmiştir.



Şekil 30. Yığın ve düşme açısı testinde meydana gelen açılar

Yığın ve düşme açısı testinde meydana gelen ve ölçülmesi gereken açılar Şekil 30.'de verilmiştir. Burada verilen açılar sırasıyla α_2 ve α_3 yığın açısı olarak tanımlanırken α_4 ve α_5 ise düşme açısı olarak tanımlanmaktadır.

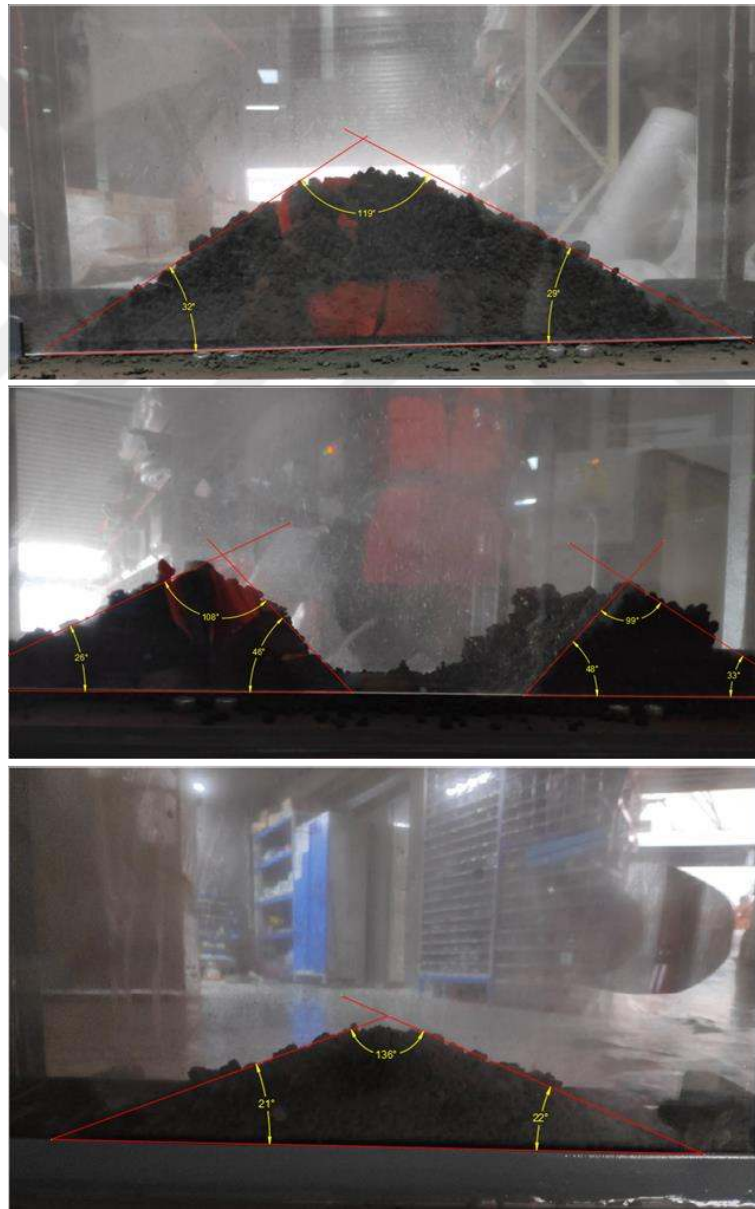


Şekil 31. Yığın ve düşme açısı testi

Bölüm 1.8.3.'de verilen yığın ve düşme açısı kalibrasyon testi sonucunda ölçülen açı değerleri Tablo 13.'de verilmiştir. Bu değerler daha sonra yığın ve düşme açısı test düzeneği geometrisinin DEM yazılımına aktarılması ve test işleminin simülasyonunun DEM yazılımı ortamında gerçekleştirilmesinde kullanılacaktır. DEM simülasyonu sonucunda elde edilen açı değerleri ile test sonucunda elde edilen açı değerlerinin birbiri ile örtüşmesi sağlanacaktır. Açı değerlerinin örtüşmesi ile birlikte girdi parametreleri tam ölçekli bir simülasyon için doğrulanmış veri olarak kullanılabilir.

Tablo 13. Yığın ve düşme açısı testi açı değerleri

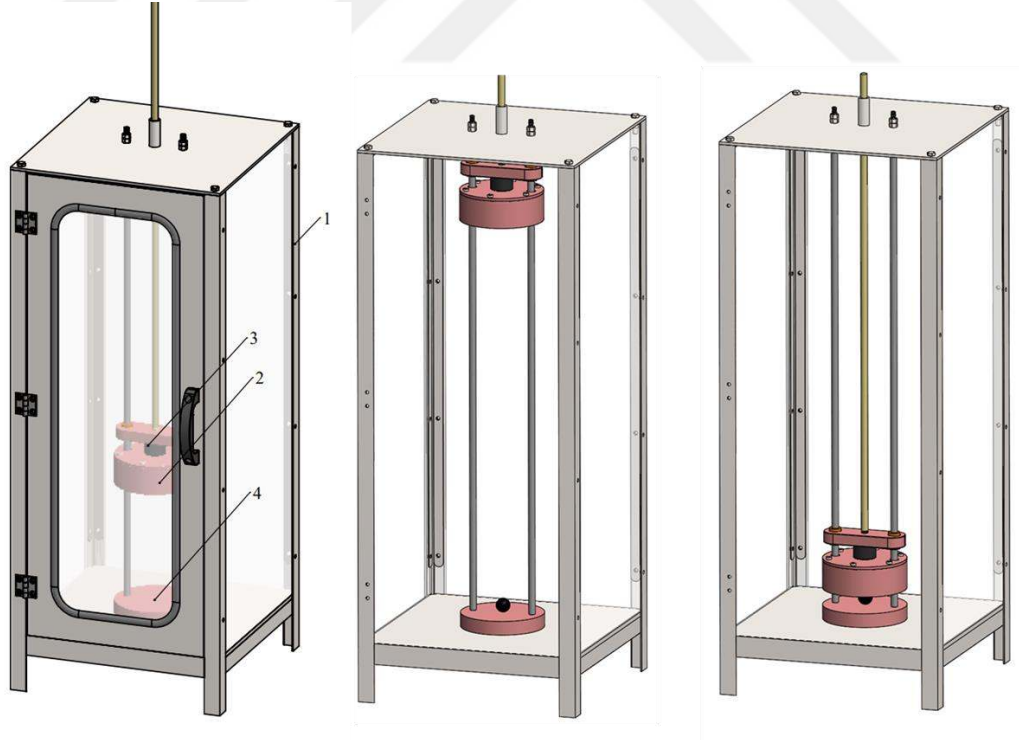
Deney No.	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
1	119°	32°	29°	49°	48°	16°	17°
2	120°	30°	30°	51°	52°	16°	20°
3	118°	30°	32°	46°	48°	21°	22°
4	121°	28°	31°	47°	47°	22°	21°
5	122°	28°	30°	46°	46°	19°	23°
Ortalama	120°	29.6°	30.4°	47.8°	48.2°	18.8°	20.6°



Şekil 32. Yığın ve düşme açısı testi yığın açıları ölçümü

2.1.4. Ağırlık Düşürme Kalibrasyon Testi

Ağırlık düşürme test ekipmanının bir görseli Şekil 33.'de verilmiştir. Bu ekipman çelik ağırlık, örs, elektromıknatıs ve ana gövde olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır. Test ekipmanının çalışma prensibi, yüksekliği ayarlanabilen ve kütlesi 7350 g olan çelik ağırlığın elektro mıknatıs ile istenildiği zaman serbest bırakılmasıyla örs üzerinde bulunan parçacık üzerine düşürülmesi şeklindedir. Test ekipmanında çelik ağırlık düşey konumlandırılan miller sayesinde yatayda konumu sabit kalmakta ve düşey ekseninde serbest hareket edebilmektedir. Bu miller, çelik ağırlık içerisinde lineer rulmanla yataklanmış olup düşeyde neredeyse sürtünmesiz olarak hareket edebilmektedir. İstenilen yüksekliğe getirildiğinde bir cıvata ile sıkıştırılarak ayarlanabilen çelik ağırlık, elektro mıknatıs aktif olduğunda bu konumda sabit kalmakta ve güç kesildiğinde serbest düşme hareketi yaparak örsün üzerinde merkezlenmiş olan test numunesine çarpmaktadır. Çarpma sonucu kırılan test numunesi parçalarının kaybolmaması için ana gövde, gerekli olduğunda açılacak bir kapağı olmak üzere kapalı bir sistem olarak tasarlanmıştır.



Şekil 33. Ağırlık düşürme test ekipmanı

Ağırlık düşürme testinde özgül ufalama enerjisi E_{cs} ve t_{10} değerlerinin bulunması testler gerçekleştirilmiştir. Bunun için yaklaşık 25 mm boyutlarında bakır cevheri numuneleri hazırlanmıştır. Bu numune parçacıklar tartılarak parçacıkların kütlesi belirlenmiştir. Örs üzerine boyutu ve kütlesi bilinen bir parçacık koyulmuştur. Bu parçacığın kırılma enerjisini bulabilmek için çelik ağırlık belirli bir yükseklikten elektromıknatısın enerjisi kesilerek parçacık üzerine düşürülmüştür. Bu işlem parçacığın kırılma yüksekliği bulunana kadar yükseklik 10 mm arttırılarak devam ettirilmiştir. 3-4 denemede parçacık kırılmamışsa numune parçacık değiştirilerek işleme son yükseklik değerinden devam edilmelidir. Bakır cevheri numunesi için kırılma yüksekliği bulunduktan sonra çelik ağırlık ve örs arasında kalan yükseklik ölçülmüştür. Parçacıklar kırıldıktan sonra her numune parçacığı için kırılan alt fragmanlar toplanarak orijinal parçacık boyutunun %10'u kadarlık elekten (2,5 mm elek) geçirilmiştir. Elek altı parçacıkların kütlesi ölçülerek t_{10} değeri hesaplanmıştır. Bu test işlemi beş kez tekrarlanmış ve hesaplanan E_{cs} ve t_{10} değerlerinin ortalamaları alınarak bu parametreler belirlenmiştir.



Şekil 34. Ağırlık düşürme testi



Şekil 35. Ağırlık düşürme testi kırılan parçacık

Yapılan bu deneyden sonra deneysel ve teorik verilerin birbirlerine yakın olması istendiğinden A ve b değerleri bulunmuş olacaktır. DEM yazılımı içerisine girilen A ve b değerleri değiştirilerek simülasyon sonucundaki t_{10} değerinin deneysel t_{10} değerine yakınsanması sağlanacaktır.

Bölüm 1.8.4.'de verilen ağırlık düşürme kalibrasyon testi için test başlangıç verileri Tablo 14.'de verilmiştir. Burada düşürülen çelik ağırlığın kütlesi 7,35 kg ve test numunesi için seçilen parçacıklar 25 mm boyutundadır.

Tablo 14. Ağırlık düşürme testi başlangıç verileri

No	SABİTLER	
1	Çelik Disk Kütlesi [kg]	7,35
2	Yer Çekimi İvmesi [m/s^2]	9,81
3	Parçacık Boyutu [mm]	25
4	Elek Boyutu [mm]	2,5

Test başlangıcında çelik ağırlık 100 mm yükseklikten başlanarak düşürülmeye başlanmıştır. Kırılma yüksekliği bulunana kadar çelik ağırlığın bırakılma yüksekliği 10 mm arttırılarak testler gerçekleştirilmeye devam edilmiştir. Bu testler sonucunda kırılma yüksekliği 180 mm olarak bulunmuştur. Her bir test için numune parçacıkların kütlesi ölçülmüştür. Kırılma yüksekliği belirlendikten sonra bu yükseklikten 5 adet test gerçekleştirilmiştir ve kırılma sonucunda çelik ağırlık ile örs arasında kalan bitiş yüksekliği mesafesi ölçülmüştür. Elde edilen veriler ile Denklem (18) kullanılarak giriş enerjisi ve Denklem (19) kullanılarak özgül ufalama enerjisi değerleri hesaplanmıştır. Kırılma sonucunda örs üzerinde kalan parçacıklar toplanarak parçacık boyutunun 1/10'u kadar göz aralığı (2,5 mm) elekten geçirilerek elekten geçen parçacıkların kütlesi ölçülmüştür. Elekten geçen parçacıkların parçacık kütlesine oranlanması ile t_{10} değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 15.'de verilmiştir. Bu değerlerin ortalaması alınarak belirlenen E_{cs} ve t_{10} değerleri Tablo 16.'da verilmiştir.

Tablo 15. Ağırlık düşürme testi hesaplanan değerler

Deney No	Parçacık Boyutları [mm]	Parçacık Kütlesi [kg]	Başlangıç Yüksekliği ^[1] [m]	Bitiş Yüksekliği ^[2] [m]	Giriş Enerjisi (E_i) [J] / [kg.m ² /s ²]	Özgül Ufalama Enerjisi (E_{cs}) [kWh/t]	Elekten Geçen Parçacıkların Kütlesi [kg]	t_{10} Değeri [%]
1	25	0,0199	0,18	0,0178	11,695	0,163	0,00086	4,322
2	25	0,0319	0,18	0,018	11,681	0,102	0,00128	4,013
3	25	0,02592	0,18	0,0135	12,005	0,129	0,00263	10,147
4	25	0,01024	0,18	0,0096	12,286	0,333	0,00077	7,520
5	25	0,02168	0,18	0,0126	12,070	0,155	0,00100	4,613

Notlar:

[1] Başlangıç Yüksekliği: Kırılmanın gerçekleştiği en düşük yükseklik değeridir.

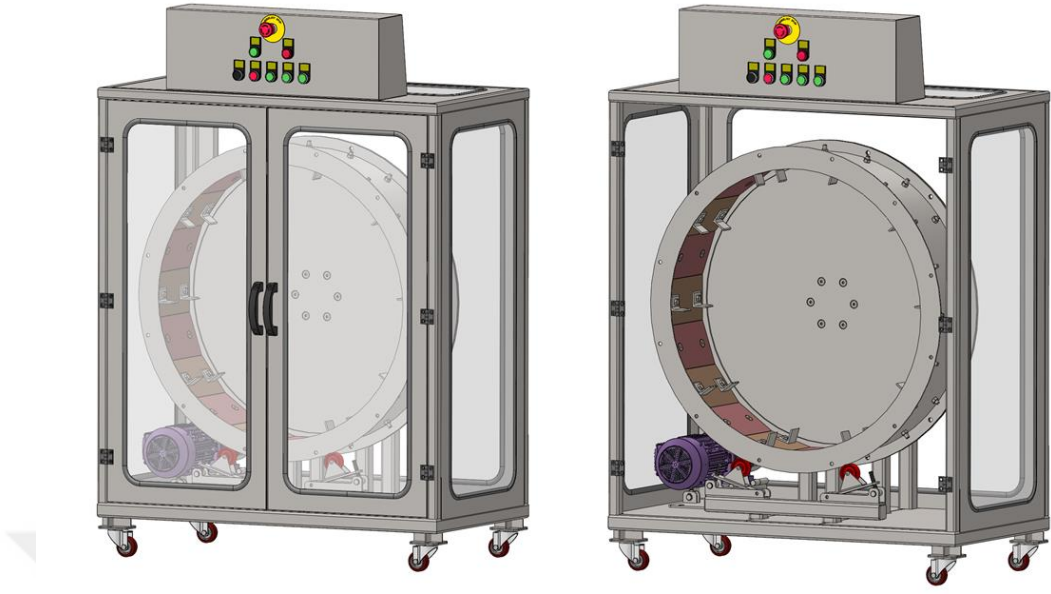
[2] Bitiş Yüksekliği: Kırılmadan sonra çelik ağırlık ile örs (altlık) arasında kalan yükseklik değeridir.

Tablo 16. Ağırlık düşürme testi sonuçları

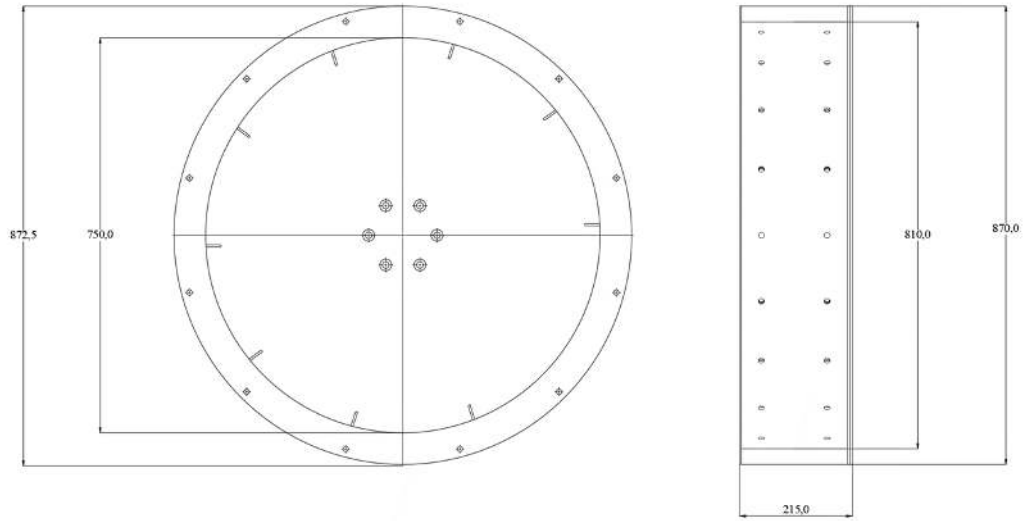
No	SONUÇLAR	
1	Cevher Adı	Bakır
2	Yapılan Toplam Test Sayısı	5
3	Parçacık Boyutu [mm]	25
4	Ortalama Parçacık Kütlesi [kg]	0,0219
5	Ortalama Giriş Enerjisi [J]	11,948
6	Parçacık Referans Boyutu ^[1] (mm)	12,5
7	Özgül Ufalama Enerjisi (Ref.Min.Specific Energy) ^[2] (E_{cs}) [kWh/t]	0,1763
8	Ortalama t_{10} Değeri ^[3] [%]	6,123
Notlar: [1] DEM yazılımında Referans Boyutu kısmına karşılık değer olarak girilecektir. [2] DEM yazılımında Referans Minimum Özgül Enerji kısmına karşılık değer olarak girilecektir. [3] Burada elde edilen t_{10} değeri DEM yazılımında A (Maximum t10 Değeri) [%] ve b (Seçim Fonksiyonu Katsayısı) [t/kWh] değerleri değiştirilerek program içerisinde elde edilmeye çalışılacaktır.		

2.1.5. Aşınma Kalibrasyon Testi

Aşınma test ekipmanının bir görseli Şekil 36.'da gösterilmiştir. Aşınma test cihazı; 0,25 kW gücünde, 50 d/dk bir elektrik motoru, 810 mm çapında, 210 mm genişliğinde döner bir tambur içermektedir. Tambur içerisine aşınma durumu incelenecek olan 200x121 mm ölçülerinde plakalar yerleştirilebilmektedir. Toplamda 10 adet aşınma plakası ve 10 adet St-37 plaka tambur içine monte edilebilmektedir. Tamburda aşınma plakalarının aşınma durumu incelenebilmektedir. Aşındırıcı parçacıkların sadece kayma hareketi değil darbe hareketi yapmasını da sağlamak için St-37 plakaların üzerine 40x40x40 mm ölçülerinde 20 adet köşebent yerleştirilmiştir. Tamburun dönme devir sayısı motor sürücü sayesinde ayarlanabilmektedir.



Şekil 36. Aşınma test ekipmanı



Şekil 37. Aşınma test ekipmanı genel ölçüleri



Şekil 38. Aşınma testi

Test için 500HB sertliğinde 200x121x10 mm boyutlarında 10 adet aşınma plakası hazırlanmıştır. Bu plakaların her biri numaralandırılmıştır ve kütlesi ölçüldükten sonra test ekipmanı içerisine yerleştirilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak 16-25 boyutlarında 4 kg bakır cevheri hazırlanmış ve tambur içerisine eklenmiştir. Test ekipmanının devir sayısı 20 d/dk'ya ayarlanmıştır. Akışın izlenebilmesi için tambur kapağı ilk olarak pleksiglass kapak ile kapatılmıştır. Akış izlendikten sonra test ekipmanının kapağı çelik kapak ile değiştirilmiştir ve test başlatılmıştır. Test cihazı toplam olarak 30 saat olacak şekilde çalıştırılmıştır. Test devam ederken 4 saatte bir test numunesi değiştirilerek teste devam edilmiştir. Test sonunda aşınma plakaları sökülerek tekrar kütleleri ölçülmüştür. Her bir plakadaki kütle kaybı DEM simülasyonu kalibrasyonu için not edilmiştir ve ortalama kütle kaybı hesaplanmıştır. Aşınma kalibrasyonu için yazılım içerisinde bulunan C değeri değiştirilerek simülasyon üzerindeki kütle kaybının, testler sonucunda elde edilen kütle kaybı ile örtüşmesi sağlanacaktır.



Şekil 39. Aşınma testi sonucu aşınan plakalar

Bölüm 1.8.5.'de verilen aşınma kalibrasyon testi sonucunda ölçülen aşınma plakası kütleleri ve kütle kayıpları Tablo 17.'de verilmiştir. Bu değerler daha sonra aşınma test düzeneği geometrisinin DEM yazılımına aktarılması ve test işleminin simülasyonunun DEM yazılımı ortamında gerçekleştirilmesinde kullanılacaktır. DEM simülasyonu sonucunda elde edilen kütle kaybı değerleri ile test sonucunda elde edilen kütle kaybı değerlerinin birbiri ile örtüşmesi sağlanacaktır. Kütle kaybı değerlerinin örtüşmesi ile birlikte girdi parametreleri tam ölçekli bir simülasyon için doğrulanmış veri olarak kullanılabilir.

Tablo 17. Aşınma testi sonuçları

Toplam Test Süresi [Saat]			30		
Plakanın Cinsi			500HB Aşınma plakası		
Devir Sayısı [d/dk]	Plaka No.	Parçacık Cinsi ve Boyutları [mm]	Plakanın Başlangıç Kütlesi [g]	Plakanın Bitiş Kütlesi [g]	Kütle Kaybı [g]
20	H01	Bakır Cevheri / 16-25mm	1830,3	1825,9	4,4
	H02		1827,7	1826,2	1,5
	H03		1828	1825,9	2,1
	H04		1830	1827,8	2,2
	H05		1825	1823,4	1,6
	H06		1822,3	1818,3	4
	H07		1821,9	1820,7	1,2
	H08		1824,6	1824,6	0
	H09		1829	1828,7	0,3
	H10		1826,3	1826,3	0
Ortalama Kütle Kaybı		1,73			

2.2. DEM Simülasyonu Kalibrasyon Çalışmaları

2.2.1. Yığın ve Düşme Açısı Kalibrasyonu

DEM yazılımındaki temas kuvvet modelleri içerisinde bu çalışma için yapılan seçimler; normal kuvvet modeli olarak Hertzian Yay-Sönüm modeli, teğetsel kuvvet modeli olarak Mindlin-Deresiewicz modeli, adhezif kuvvet modeli olarak Sürekli Adhezif Kuvvet modeli şeklindedir. Yuvarlanma direnci, kırılma, aşınma ve termal model çözümleri bu simülasyon için aktif edilmemiştir. Tablo 18.'de, çokyüzlü parçacık için boyut dağılımı verilmiştir ve 8 - 11 mm aralığında boyut dağılımına sahip olan katı yığın için toplamda 9 sn'lik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Kullanılan DEM yazılımı arayüzü içerisinde kuvvet oranı olarak geçen ve parçacığın yapışkanlığıyla ilgili olan bu parametre, ilgili bakır cevherinin görece kuru olması sebebiyle 0,2 olarak kabul edilmiştir [33]. Bununla birlikte parçacık-parçacık geri sıçrama katsayısı 0,3 alınmıştır [60]. Yığın açısını doğrudan

etkileyecek olan parçacık-parçacık statik ve parçacık-parçacık kinetik sürtünme katsayıları Tablo 19.'de belirtilen aralıklarda değiştirilerek testlerde belirlenen açılar simülasyonlarda elde edilmeye çalışılmıştır [60].

Tablo 18. Parçacık yığınının boyut dağılımı

Boyut [mm]	Kümülatif [%]
11	100
9	95
8	80

Tablo 19. Yığın ve düşme açısı DEM parametreleri

Parametreler	
Yığın Yoğunluğu, [kg/m ³]	1144,38
Parçacık Boyutu [mm]	8 - 11
Young Modülü, E [GPa] [61]	22,4
Poisson Oranı, ν [61]	0,2
Adhezif Mesafe, [m]	0,0001
Parçacık - Yüzey Statik Sürtünme Katsayısı, μ_s, py	0,67
Parçacık - Yüzey Kinetik Sürtünme Katsayısı, μ_k, py	0,57
Parçacık - Yüzey Geri Sıçrama Katsayısı, e_{py}	0,57
Parçacık - Parçacık Statik Sürtünme Katsayısı, μ_s, pp	0,1 – 0,7
Parçacık - Parçacık Kinetik Sürtünme Katsayısı, μ_k, pp	0,05 – 0,65
Parçacık - Parçacık Geri Sıçrama Katsayısı, e_{pp} [60]	0,3
Kuvvet Oranı	0,2

2.2.2. Ağırlık Düşürme Kalibrasyonu

DEM yazılımındaki kırılma modülü aktif edilerek yapılan bu çalışmada, kırılma modellemesi için normal kuvvet modeli olarak Histeretik Yay-Sönüm modeli, teğetsel kuvvet modeli olarak Doğrusal Yay Coulomb Limit modeli seçilmiştir. Bu simülasyon için adhezif kuvvet modeli ve yuvarlanma direnci modeli aktif edilmemiştir. Kırılmaya maruz kalacak parçacık çokyüzlü yapıya ve 25 mm boyuta sahiptir. Kırılma modeli olarak ise Ab-

t10 modeli seçilmiş ve alt parçacıkların boyut dağılımı için Gaudin-Schumann boyut dağılım modeli kabulü yapılmıştır. Toplamda 0,7 sn'lik bir simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu parçacık ve Ab-t10 için DEM simülasyonu içerisinde girilen diğer parametreler Tablo 20.'de verilmiştir.

Tablo 20. Ağırlık düşürme simülasyonu DEM parametreleri

Parametreler	
Referans Boyutu [mm]	12,5
Referans Minimum Özgül Enerji, E_{cs} [kWh/t]	0,1763
Seçim Fonksiyonu Katsayısı, b [t/kWh]	6 - 10
Maksimum t10 Değeri, A [%]	10,147
Minimum Mutlak Boyut [mm]	0,5
Alt Parçacık İhmali İçin Minimum Hacim Oranı [%]	0,5

Simülasyon çalışmalarında maksimum t_{10} değeri olarak ağırlık düşürme testi sonucunda elde edilen t_{10} değerlerinden en büyük olanı alınmıştır ve bu değer A parametresinin karşılığı olarak kullanılmıştır. DEM simülasyonları sonucunda test sonucunda elde edilen t_{10} değerine ulaşılması için söz konusu b parametresi değiştirilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir ve simülasyon sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılarak en uygun b değeri belirlenmiştir.

2.2.3. Aşınma Kalibrasyonu

DEM yazılımındaki aşınma modülü aktif edilerek yapılan bu çalışmada, aşınma modellemesi için normal kuvvet modeli olarak Hertzian Yay-Sönüm modeli, teğetsel kuvvet modeli olarak Mindlin-Deresiewicz modeli, adhezif kuvvet modeli olarak Sürekli Adhezif Kuvvet modeli seçilmiştir. Teğetsel kuvvet modeli olarak yapılan Mindlin-Deresiewicz modeli seçimi sebebiyle yuvarlanma direnci modeli aktif edilmemiştir [33]. Aşındırıcı olarak çokyüzlü yapıya ve 16 - 25 mm boyuta sahip parçacık tanımlanmıştır. Bununla birlikte hacim/kesme işi oranı C , Tablo 21.'da verilen değerler aralığında değiştirilmiştir. Aşınma yüzeyleri, kütle kaybı ölçümünü her bir plaka için ayrı ayrı yapabilmek amacıyla tekil şekilde tanımlanmıştır. 500HB sertlik değerine sahip aşınma plakaları için yer alan

malzeme özellikleri girilmiştir. Aşınma modeli olarak ise Archard aşınma modeli seçilerek toplamda 30 sn'lik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 21. Aşınma simülasyonu DEM parametreleri

Parametreler	
Parçacık Boyutu [mm]	16 - 25
Hacim/Kesme işi oranı, C [m^3/J]	$9e-08 - 3e-06$
Adhezif Mesafe [m]	0,0001

Tablo 22. Aşınma plakaları için DEM simülasyonuna girilen malzeme özellikleri

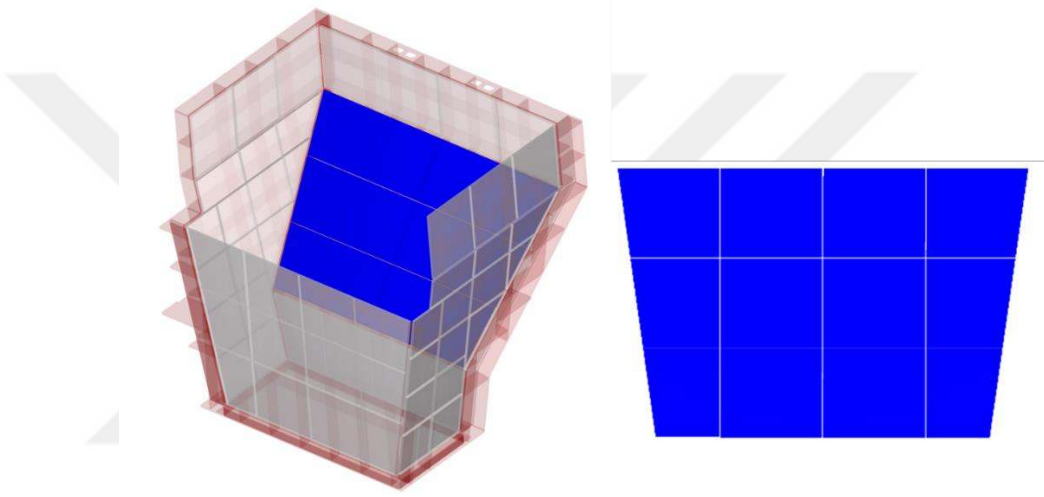
Aşınma Plakası (500 HB)	
Yoğunluk, [kg/m^3] [62]	7850
Young Modülü [GPa] [62]	210
Poisson's oranı, ν [62]	0,29
Kütle [g]	1887,60

Söz konusu aşınma kalibrasyon çalışmalarında, DEM simülasyonlarında tanımlı olan ve gerçek zamanlı orantısal bir değişken olan hacim/kesme işi oranı C değeri, simülasyon verileri gerçek verilerle örtüşene kadar değiştirilmiştir. Her bir aşınma plakası simülasyon sonucunda dışa aktarılmış ve yaşanan ağırlık kayıpları ölçülerek sonuçların gerçek deney sonuçlarına düşük bir hata payı ile yakınsaması sağlanmıştır.

2.3. Aktarım Oluğu Aşınma Simülasyonu

Bu çalışmada, Bölüm 2.1. ve Bölüm 2.2. içerisinde verilen deneylerde kullanılan bakır cevheri için yapılan testler ve ilgili kalibrasyonların ardından, elde edilen parametre takımı kullanılarak Şekil 40.'de gösterilen aktarım oluğu için, söz konusu veri girdilerinin tümü kullanılarak tam ölçekli bir simülasyon gerçekleştirilmiştir ve tüm parametrelerin birlikte yer aldığı bir sistemin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu simülasyonda, normal kuvvet modeli olarak Histeretik Yay-Sönüm modeli ve teğetsel kuvvet modeli olarak Doğrusal Yay Coulomb Limit modeli seçilmiştir. Adhezif kuvvet modeli Sürekli Adhezif Kuvvet modeli olarak kabul edilmiş olup, çokyüzlü parçacık şekli seçimi sebebiyle yuvarlanma direnci

modeli aktif edilmemiştir. Şekil 40.'de gösterilen aktarım oluğunun yan plakaları ve mavi renk ile gösterilen plakaların üst ve alt bölgelerinde yer alan plakalar için malzeme temasının yaşanmaması sebebiyle aşınma modeli aktif edilmemiştir. Mavi renkte ve ayrıca gösterilen 12 adet plaka için ise, her bir plaka sisteme ayrı şekilde tanımlanmış, 500HB aşınma plakası seçimi yapılmış ve Archard aşınma modeli aktif edilmiştir. Kırılma modülü verilen parametre takımı doğrultusunda tanımlanıp aktif edilmiştir. Aktarım oluğuna 30 saniye boyunca parçacık akışı tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen bu aktarım oluğu aşınma simülasyonu sonuçları “Bulgular ve Tartışma” başlığı altında verilmiştir.



Şekil 40. Simülasyonu yapılan aktarım oluğu

Tablo 23. Parçacık boyut dağılımı

Boyut [mm]	Kümülatif [%]
200	100
180	95
150	85
100	75
50	50

Tablo 24. Parçacık girişine ait özellikler

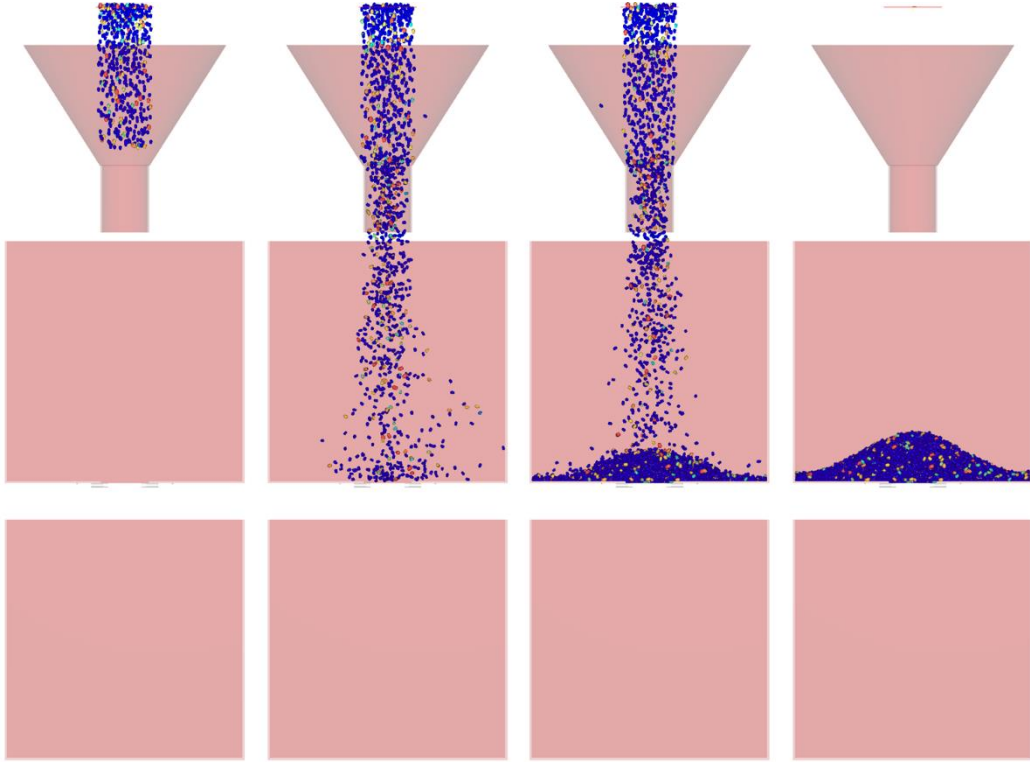
Parametreler	
Parçacık Akış Hızı [m/s]	2,25
Parçacık Akış Debisi [ton/saat]	600
Parçacık Girişi Genişlik-Yükseklik [m]	1,2 – 0,8

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

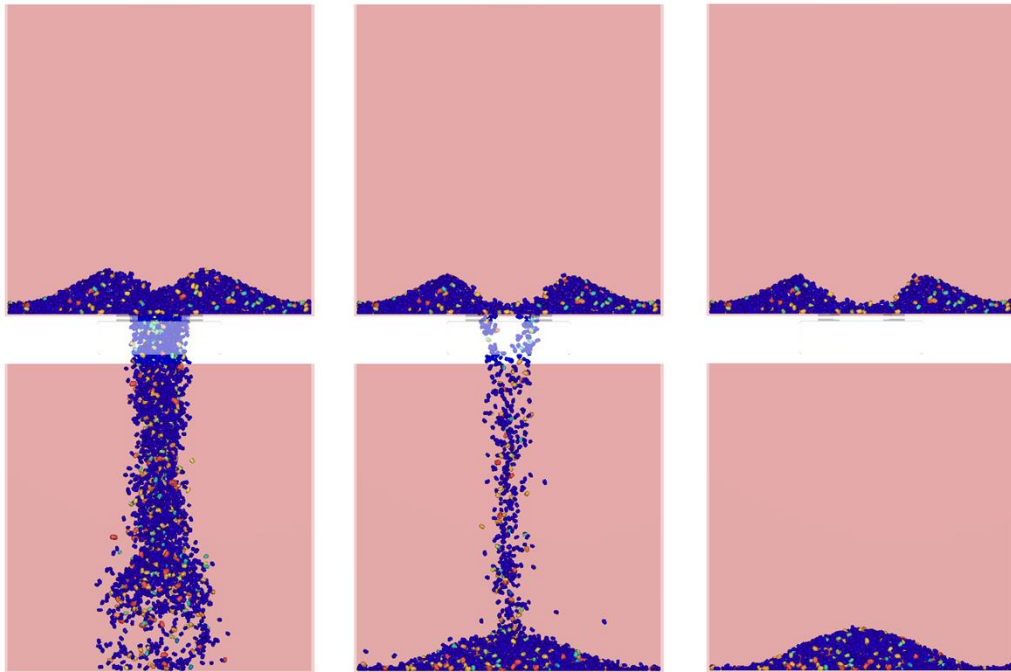
Bu bölüm içerisinde önceki bölümde açıklanan test çalışmaları ve DEM simülasyonu içerisinde yapılan kalibrasyon çalışmalarının ve aktarım oluğu simülasyonunun sonuçlarına yer verilmiştir. Kalibrasyon ihtiyacı duyulan DEM girdi parametreleri, simülasyonlar sonucu elde edilen çıkış verilerine göre değiştirilerek ölçülen değerlere mümkün olduğunca yakın sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır.

3.1. Yığın ve Düşme Açısı Kalibrasyon Sonuçları

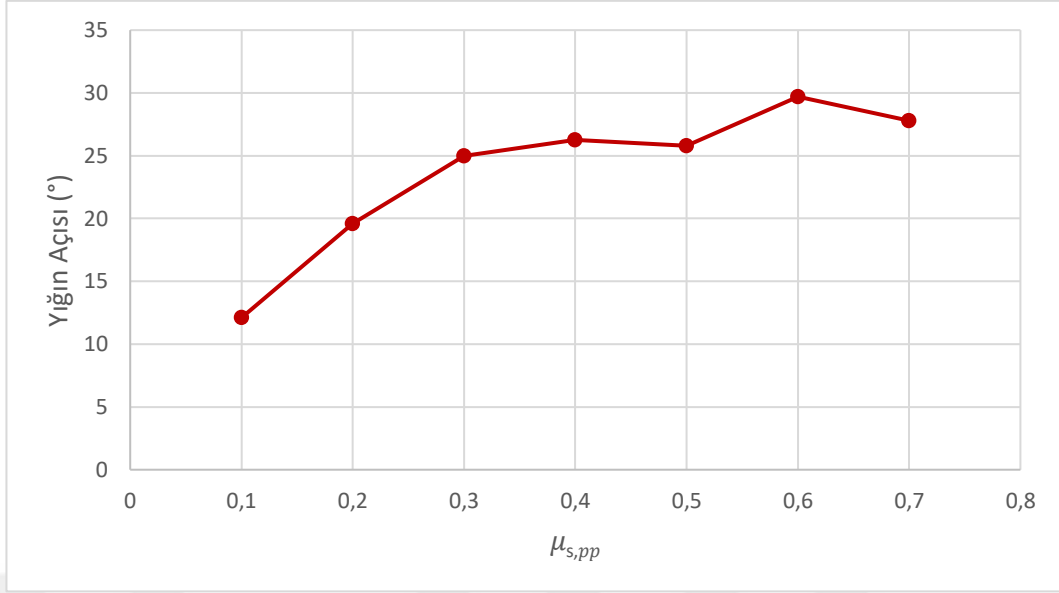
Bölüm 2.2.1.'de verilen yığın ve düşme açısı simülasyon sonuçları Tablo 25.'de ve simülasyon görüntüleri Şekil 41. ve Şekil 42.'de verilmiştir. Statik ve kinetik sürtünme katsayısı çiftinin değiştirilmesiyle birlikte yapılan 6 numaralı simülasyonda ilgili açılardan, Tablo 13.'de verilen testler sonucu elde edilen açı değerlerine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Şekil 43. ve Şekil 44.'de gösterilen simülasyonlara ait yığın açıları, α_2 ve α_3 , ve düşme açıları, α_4 ve α_5 sürtünme katsayıları çiftinin artmasıyla birlikte belirli bir seviyeye kadar artmış ve ardından az miktarda değişimler göstermiştir. Ayrıca sürtünme katsayıları çifti arttıkça α_1 açısında gözle görülür bir düşüş yaşanmıştır. Bakır cevheri için gerçekleştirilen yığın ve düşme açısı simülasyonları sonucu elde edilen parametreler Tablo 27.de verilmiştir.



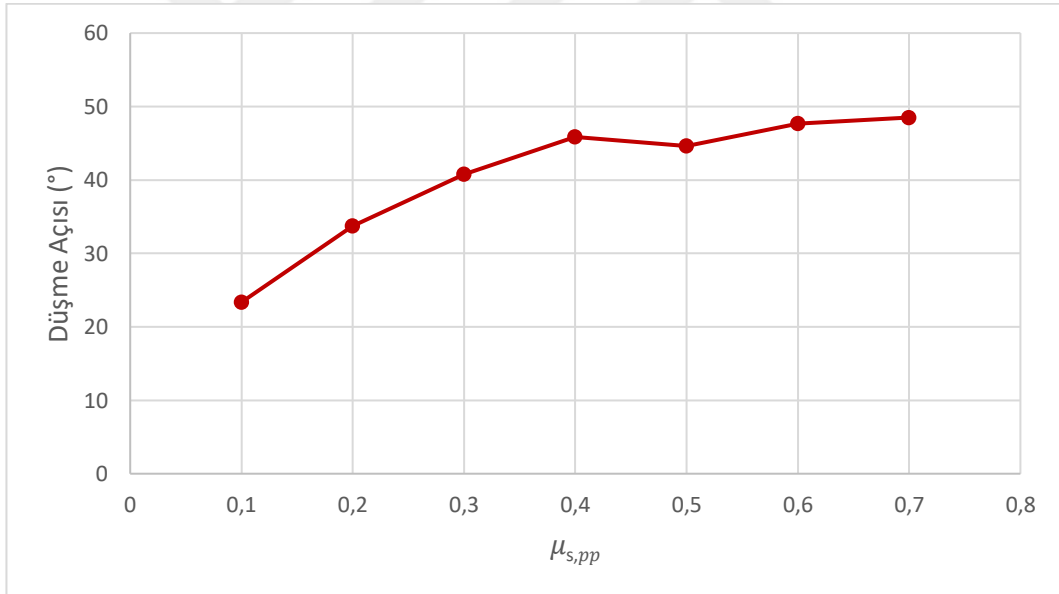
Şekil 41. Yığın açısı simülasyon görüntüleri



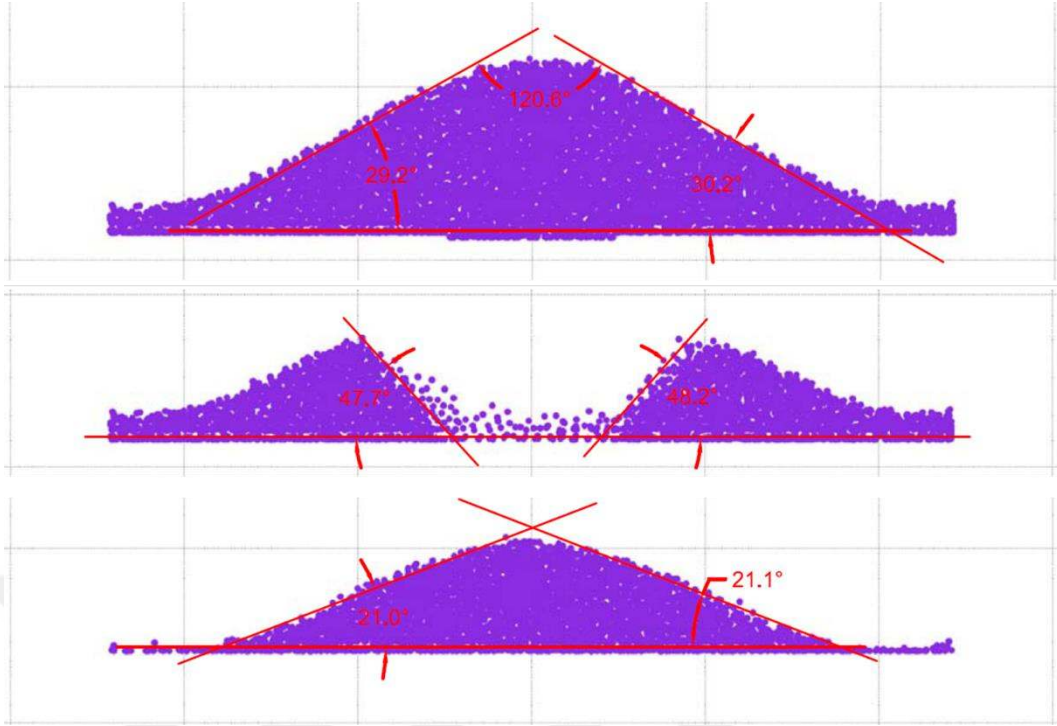
Şekil 42. Düşme açısı simülasyon görüntüleri



Şekil 43. Yığın açısının parçacık-parçacık sürtünme katsayılarına göre değişimi



Şekil 44. Düşme açısının parçacık-parçacık sürtünme katsayılarına göre değişimi



Şekil 45. Simülasyon sonucu elde edilen açılar

Tablo 25. Yığın ve düşme açısı simülasyonları sonucu elde edilen açılar

Simülasyon No.	$\mu_{s,pp}$	$\mu_{k,pp}$	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
1	0,1	0,05	155,9°	10,8°	13,4°	23,2°	23,5°	9,7°	11,9°
2	0,2	0,15	140,8°	19,8°	19,4°	34,0°	33,5°	13,2°	16,3°
3	0,3	0,25	130,1°	25,2°	24,8°	41,6°	39,9°	17,2°	18,3°
4	0,4	0,35	127,6°	25,3°	27,2°	46,5°	45,9°	18,0°	19,6°
5	0,5	0,45	128,4°	25,7°	25,9°	44,7°	44,6°	20,6°	22,6°
6	0,6	0,55	120,6°	29,2°	30,2°	47,2°	48,2°	21,0°	21,1°
7	0,7	0,65	124,4°	28,0°	27,6°	48,0°	49,0°	23,4°	22,6°

Tablo 26. Test ve simülasyon sonucu elde edilen açılar

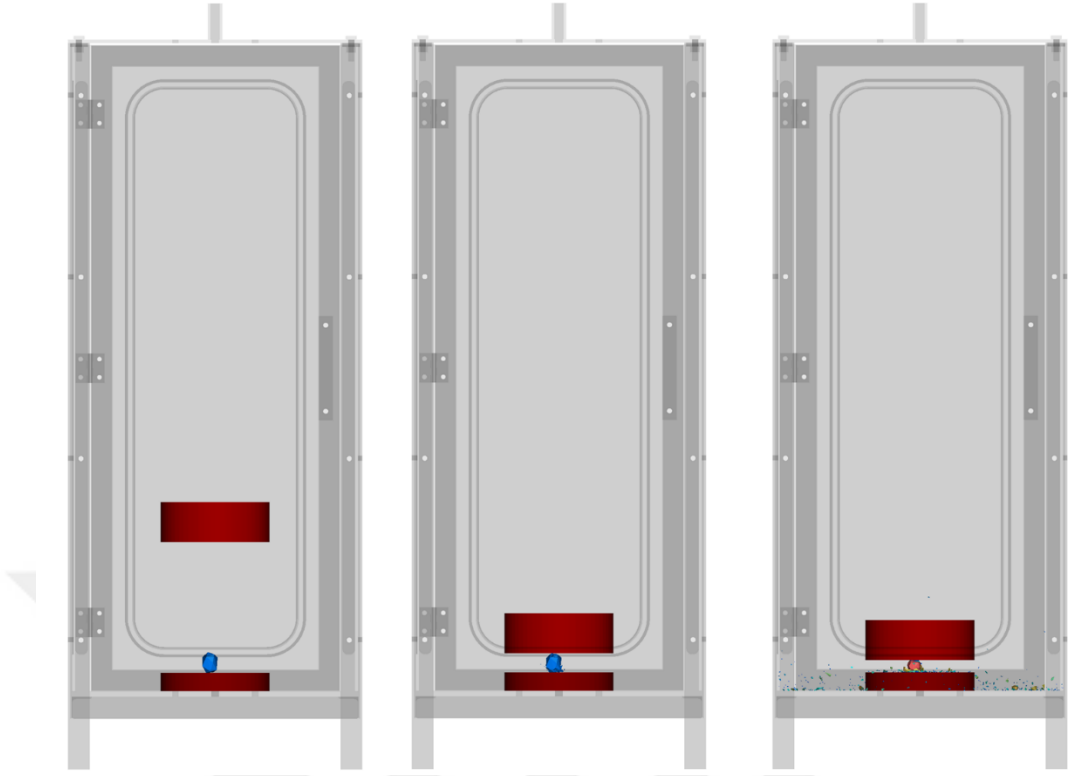
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
Kalibrasyon testleri sonucu elde edilen ortalama açılar	120°	29.6°	30.4°	47.8°	48.2°	18.8°	20.6°
6. simülasyon sonucu elde edilen açılar	120,6°	29,2°	30,2°	47,2°	48,2°	21,0°	21,1°

Tablo 27. Yığın ve düşme açısı simülasyonları sonucu elde edilen parametreler

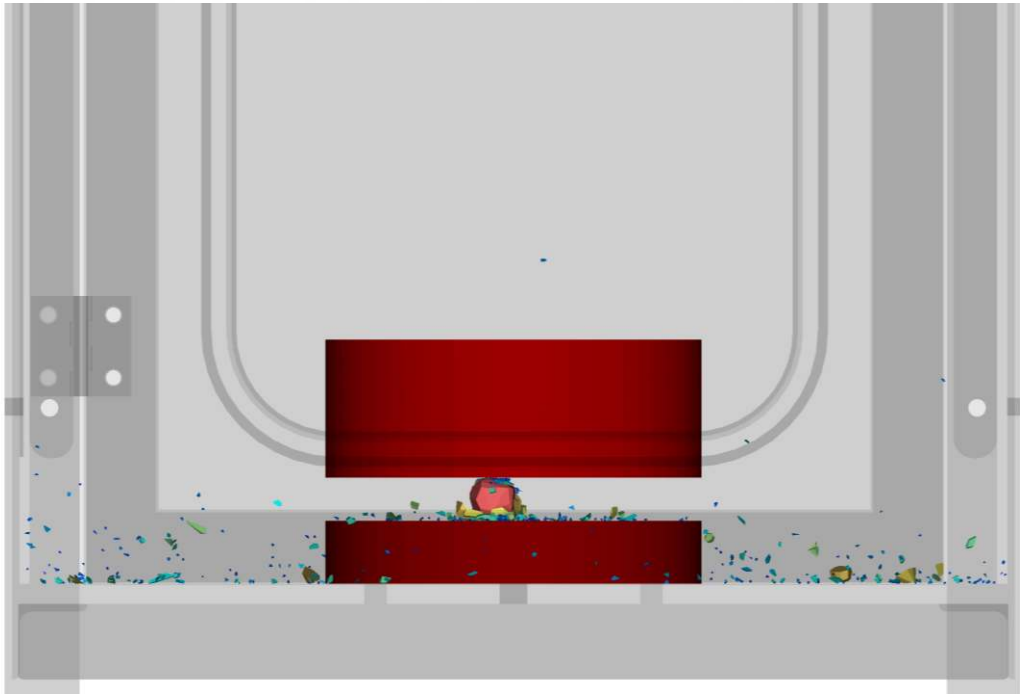
Parametreler	
Yığın Yoğunluğu, [kg/m ³]	1144,38
Parçacık Boyutu [mm]	8 - 11
Young Modülü, E [GPa]	22,4
Poisson Oranı, ν	0,2
Adhezif Mesafe, [m]	0,0001
Parçacık - Yüzey Statik Sürtünme Katsayısı, $\mu_{s,py}$	0,67
Parçacık - Yüzey Kinetik Sürtünme Katsayısı, $\mu_{k,py}$	0,57
Parçacık - Yüzey Geri Sıçrama Katsayısı, e_{py}	0,57
Parçacık - Parçacık Statik Sürtünme Katsayısı, $\mu_{s,pp}$	0,6
Parçacık - Parçacık Kinetik Sürtünme Katsayısı, $\mu_{k,pp}$	0,55
Parçacık - Parçacık Geri Sıçrama Katsayısı, e_{pp}	0,3
Kuvvet Oranı	0,2

3.2. Ağırlık Düşürme Kalibrasyonu Sonuçları

Bölüm 2.2.2.'de verilen ağırlık düşürme simülasyon sonuçları Tablo 28.'de ve simülasyon görüntüleri Şekil 46.ve Şekil 47.'de verilmiştir. b değerinin değiştirilmesiyle yapılan simülasyonlarda 8. numaralı simülasyon sonucunda b değerinin 9,05 alınması ile fragman kütlesi 0,00132 kg ve t_{10} değeri 6,020 olarak elde edilmiştir. Test çıktıları ile simülasyon çıktıları karşılaştırılmış ve belirlenen b değeri yapılan simülasyon sonucu elde edilen t_{10} değeri ile test sonucunda elde edilen t_{10} değerinin yakınsadığı görülmüştür. Bakır cevheri için belirlenen kırılma parametreleri ile test sonuçları Tablo 29.'de gösterilmiştir.



Şekil 46. Ağırlık düşürme testi simülasyonu



Şekil 47. Ağırlık düşürme simülasyonu sonucu kırılan parçacıklar

Tablo 28. Ağırlık düşürme simülasyon sonuçları

Sim. No	Parçacık Kütlesi [kg]	E_{cs} [kWh/t]	Fragman Kütlesi [kg]	A Değeri [%]	b Değeri	t_{10} Değeri [%]
1	0,0219	0,1763	0,00068	10,147	6	3,119
2	0,0219	0,1763	0,00115	10,147	8	5,244
3	0,0219	0,1763	0,00131	10,147	9	5,974
4	0,0219	0,1763	0,00151	10,147	10	6,886
5	0,0219	0,1763	0,00107	10,147	9,4	4,880
6	0,0219	0,1763	0,00186	10,147	9,2	8,482
7	0,0219	0,1763	0,00145	10,147	9,1	6,613
8	0,0219	0,1763	0,00132	10,147	9,05	6,020

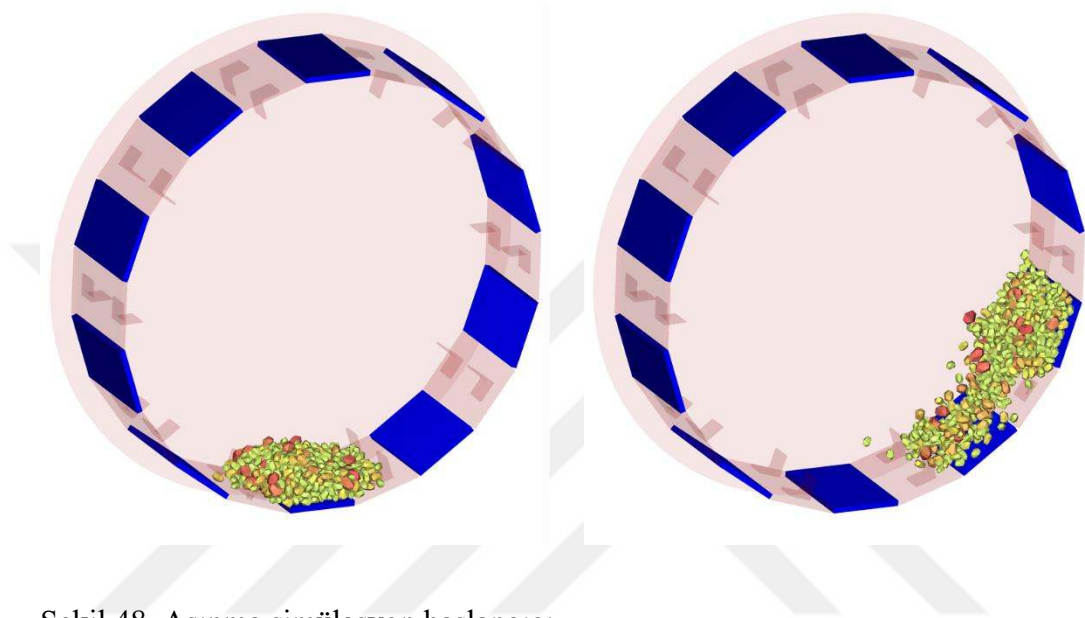
Tablo 29. Test ve simülasyon sonucu elde edilen değerler

	Parçacık Kütlesi [kg]	E_{cs} [kWh/t]	Fragman Kütlesi [kg]	A Değeri [%]	b Değeri	t_{10} Değeri [%]
Test sonucu elde edilen değerler	0,0219	0,1763	0,00132	10,147	-	6,123
Simülasyon sonucu elde edilen değerler	0,0219	0,1763	0,00131	10,147	9,05	6,020

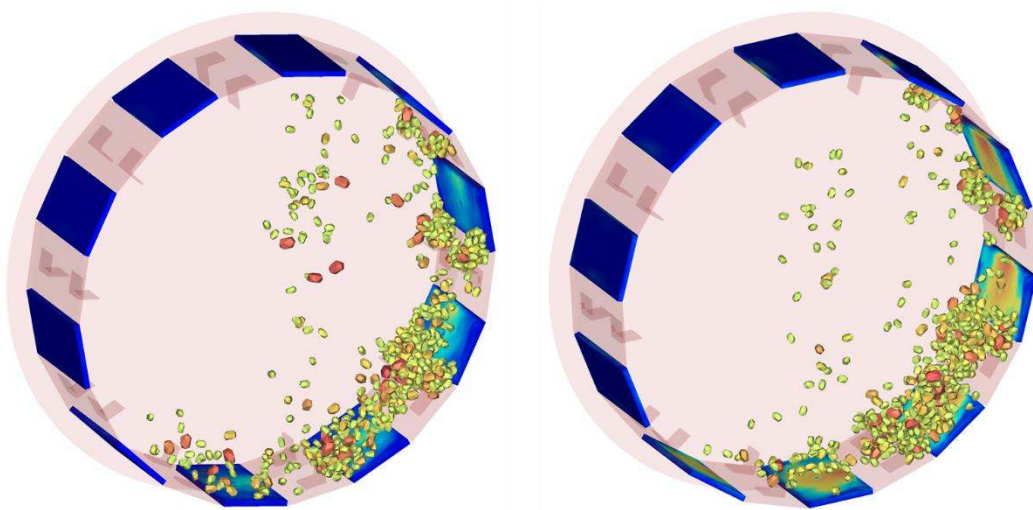
3.3. Aşınma Kalibrasyonu Sonuçları

Bölüm 2.2.3.'de verilen aşınma simülasyonu için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen ortalama kütle kayıpları Tablo 30.'da, test sonucunda bulunan ortalama kütle kaybının elde edildiği 4 numaralı simülasyon sonuçları Tablo 31.'de ve 4 numaralı aşınma simülasyonuna ait görseller Şekil 48., Şekil 49., Şekil 50. ve Şekil 51.'de verilmiştir. C değerinin değiştirilmesiyle yapılan simülasyonlarda 4 numaralı simülasyon sonucu C değerinin $9,00e-08$ alınması ile 30 saniyelik bir simülasyonda ortalama kütle kaybı 1,80 gr

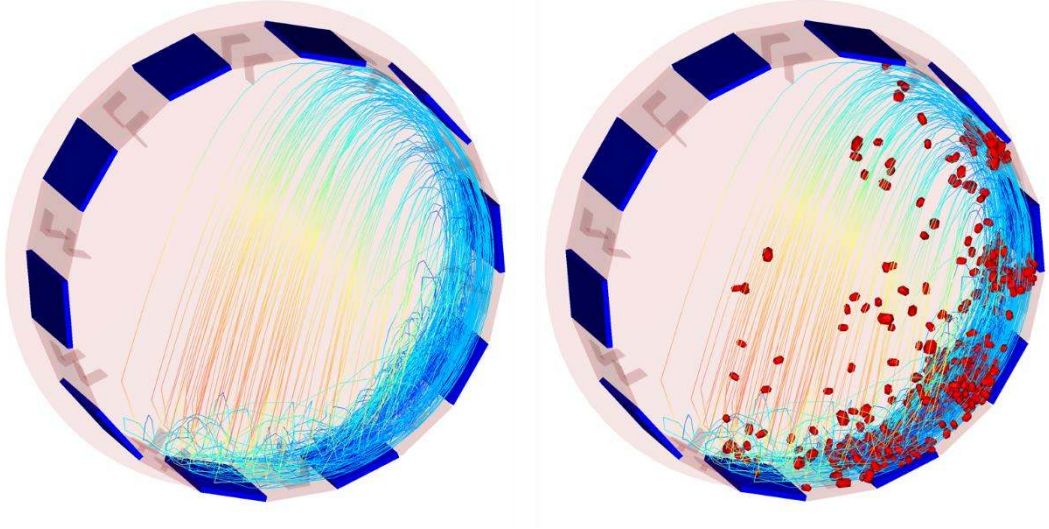
olarak bulunmuştur. Test çıktıları ile simülasyon çıktıları karşılaştırılmış ve 30 saatlik test sonucu elde edilen 1,73 gr ortalama kütle kaybına 30 saniyelik simülasyon ile yaklaşıldığı görülmüştür. Elde edilen bu veriler ışığında C değerinin $9,00e-08$ alınması ile yapılacak 30 saniyelik bir aşınma simülasyonunda elde edilecek ortalama kütle kaybı gerçekte 30 saat sonunda ulaşılacak kütle kaybını verecektir.



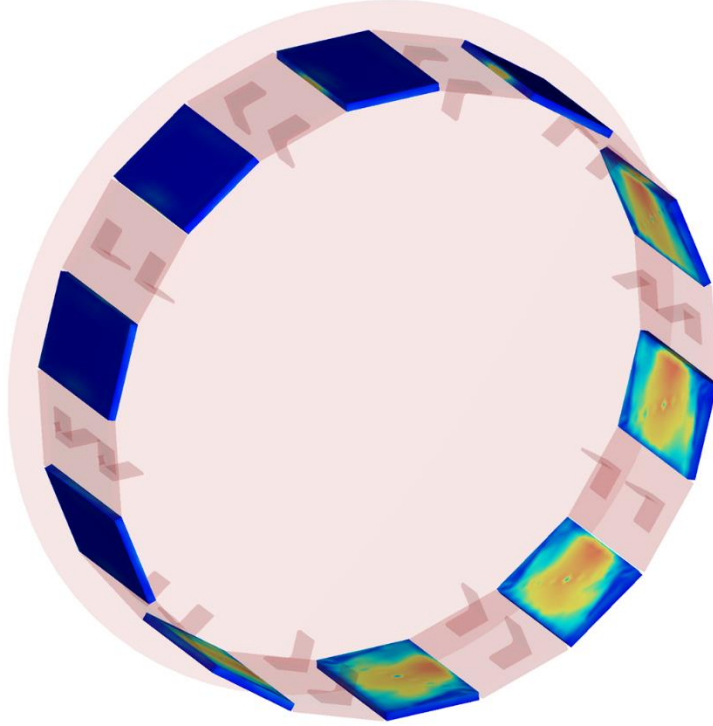
Şekil 48. Aşınma simülasyonu başlangıcı



Şekil 49. Aşınma simülasyonu aşınan plakalar



Şekil 50. Aşınma simülasyonu parçacık akış izi



Şekil 51. Simülasyon sonucu aşınma plakalarının durumu

Tablo 30. Simülasyonlar sonucu ortalama kütle kayıpları

Sim. No	Toplam Simülasyon Süresi [Saniye]	Plakanın Cinsi	C değeri [m ³ /J]	Ortalama Kütle Kaybı [g]
1	30	500HB Aşınma Plakası	3,00e-06	59,54
2			1,50e-06	29,92
3			5,00e-07	10,02
4			9,00e-08	1,80

Tablo 31. Aşınma simülasyon sonuçları

Toplam Simülasyon Süresi [Saniye]		30			
Plakanın Cinsi		500 HB Aşınma plakası			
C (Hacim/Kesme İşi Oranı [m ³ /J])		9,00e-08			
Devir Sayısı [d/dk]	Plaka No.	Parçacık Cinsi ve Boyutları [mm]	Plakanın Başlangıç Kütlesi [g]	Plakanın Bitiş Kütlesi [g]	Kütle Kaybı [g]
20	H01	Bakır Cevheri / 16-25mm	1887,60	1885,94	1,66
	H02		1887,60	1885,86	1,74
	H03		1887,60	1885,84	1,76
	H04		1887,60	1885,79	1,81
	H05		1887,60	1885,76	1,84
	H06		1887,60	1885,72	1,88
	H07		1887,60	1885,68	1,92
	H08		1887,60	1885,73	1,87
	H09		1887,60	1885,86	1,74
	H10		1887,60	1885,80	1,80
Ortalama Kütle Kaybı		1,80			

3.4. Test ve Simülasyonlar Sonucu Elde Edilen DEM Girdi Parametreleri

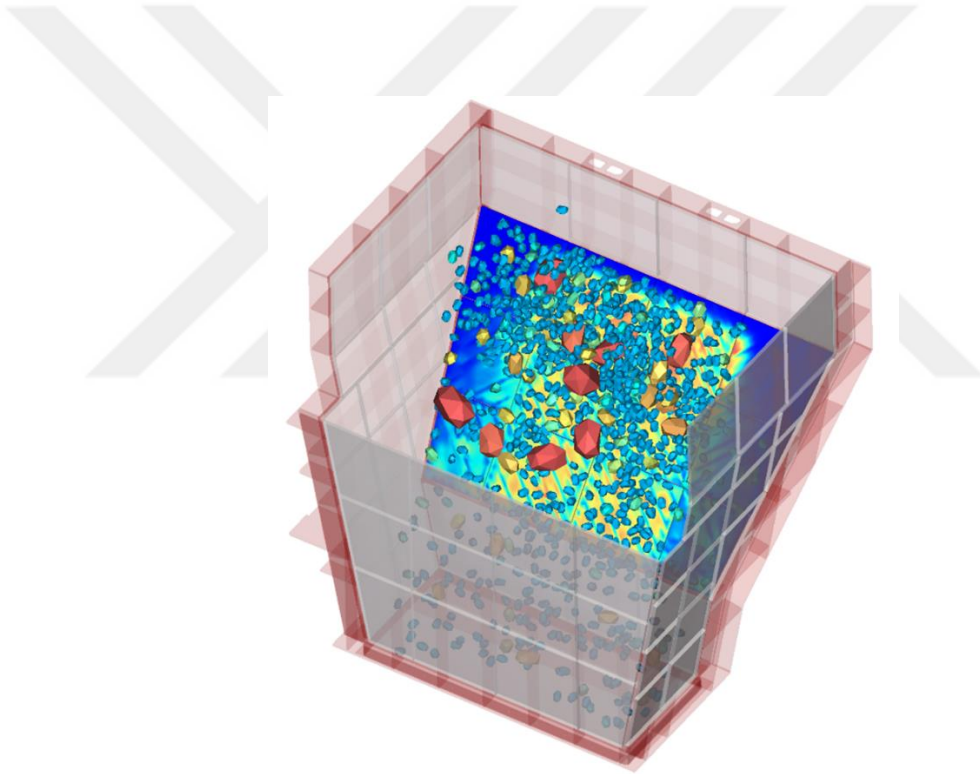
Literatür araştırması, yapılan test ve simülasyonlar sonucu elde edilen ve gerçek bir sistemin aşınma analizinde kullanılacak olan DEM girdi parametreleri Tablo 32.'de verilmiştir. Bu parametreler gerçek bir sistemin aşınma analizi için doğrulanmış veri olarak kullanılmıştır.

Tablo 32. Aşınma simülasyonu için DEM parametreleri

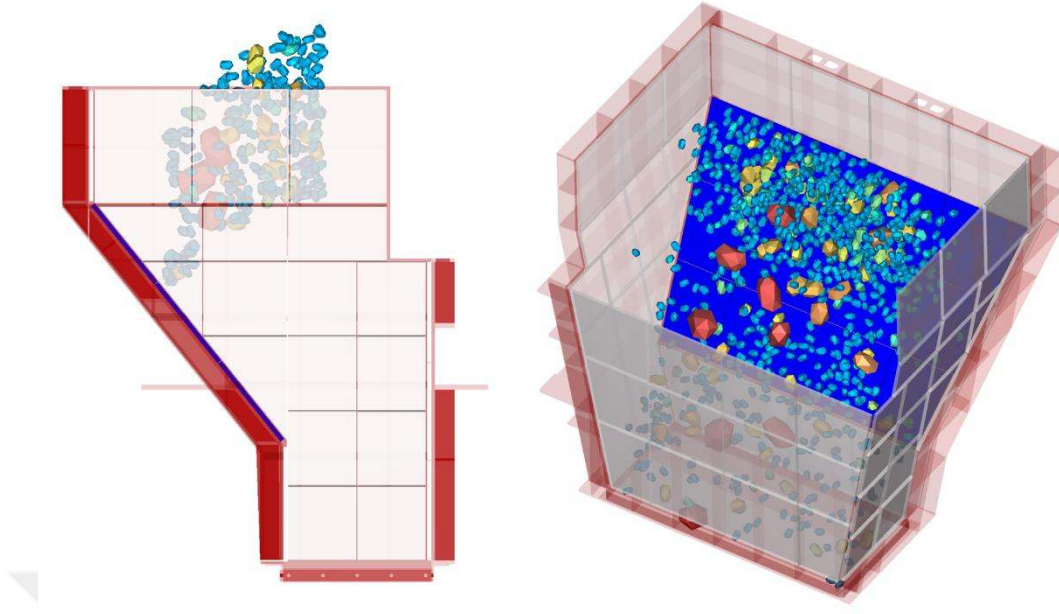
Parametre Başlıkları		Parametre	Kaynak	Yöntem	Değer
MALZEME	500HB Aşınma Plakası	Yoğunluk, [kg/m ³]	Literatür [62]	Ölçüm	7850
		Young Modülü, E [GPa]	Literatür [62]	Ölçüm	210
		Poisson Oranı, ν	Literatür [62]	Ölçüm	0,29
	St-37	Yoğunluk, [kg/m ³]	Literatür [63]	Ölçüm	7850
		Young Modülü, E [GPa]	Literatür [63]	Ölçüm	210
		Poisson Oranı, ν	Literatür [63]	Ölçüm	0,3
	Bakır Cevheri	Yığın Yoğunluğu, [kg/m ³]	Deneysel	Ölçüm	1144,38
		Young Modülü, E [GPa]	Literatür [61]	Ölçüm	22,54
		Poisson Oranı, ν	Literatür [61]	Ölçüm	0,2
MALZEME ETKİLEŞİMLERİ	Bakır Cevheri - 500HB Aşınma Plakası	Statik Sürtünme Katsayısı	Eğik Düzlem Testi	Ölçüm	0,71
		Kinetik Sürtünme Katsayısı	Eğik Düzlem Testi	Ölçüm	0,6
		Teğetsel Sertlik Oranı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	1
		Kuvvet Oranı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,2
		Adhezif Mesafe, [m]	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,0001
		Geri Sıçrama Katsayısı	Geri Sıçrama Katsayısı Testi	Ölçüm	0,53
	Bakır Cevheri - St-37 Plaka	Statik Sürtünme Katsayısı	Eğik Düzlem Testi	Ölçüm	0,67
		Kinetik Sürtünme Katsayısı	Eğik Düzlem Testi	Ölçüm	0,57
		Teğetsel Sertlik Oranı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	1
		Kuvvet Oranı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,2
		Adhezif Mesafe, [m]	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,0001
		Geri Sıçrama Katsayısı	Geri Sıçrama Katsayısı Testi	Ölçüm	0,57
	Bakır Cevheri - Kauçuk	Statik Sürtünme Katsayısı	Eğik Düzlem Testi	Ölçüm	0,69
		Kinetik Sürtünme Katsayısı	Eğik Düzlem Testi	Ölçüm	0,51
		Teğetsel Sertlik Oranı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	1
		Kuvvet Oranı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,2
		Adhezif Mesafe, [m]	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,0001
		Geri Sıçrama Katsayısı	Geri Sıçrama Katsayısı Testi	Ölçüm	0,62
	Parçacık-Parçacık	Statik Sürtünme Katsayısı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,6
		Kinetik Sürtünme Katsayısı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,55
		Teğetsel Sertlik Oranı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	1
		Kuvvet Oranı	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,2
		Adhezif Mesafe, [m]	Yığın ve Düşme Açısı Testi	Kalibrasyon	0,0001
		Geri Sıçrama Katsayısı	Literatür [60]	Ölçüm	0,3
KIRILMA	Parametreler	Referans Boyutu, [mm]	Ağırlık Düşürme Testi	Ölçüm	25
		Özgül Ufalama Enerjisi, [kWh/t]	Ağırlık Düşürme Testi	Ölçüm	0,1763
		Seçim Fonksiyonu Katsayısı (b) [t/kWh]	Ağırlık Düşürme Testi	Kalibrasyon	9,05
		Maximum t10 Değeri (A)	Ağırlık Düşürme Testi	Kalibrasyon	10,147
		Minimum Boyut, [mm]	Ağırlık Düşürme Testi	Ölçüm	0,5
		Minimum Boyut Oranı	Ağırlık Düşürme Testi	Kalibrasyon	0
		Alt Parçacık İhmali İçin Minimum Hacim Oranı	Ağırlık Düşürme Testi	Kalibrasyon	0,5
AŞINMA	Çözücü	Simülasyon Süresi, [s]	Aşınma Testi	Ölçüm	30
	Geometri	Hacim/Kesme İş Oranı (C)	Aşınma Testi	Kalibrasyon	9,00e-08

3.5. Aktarım Oluğu Aşınma Simölasyon Sonuçları

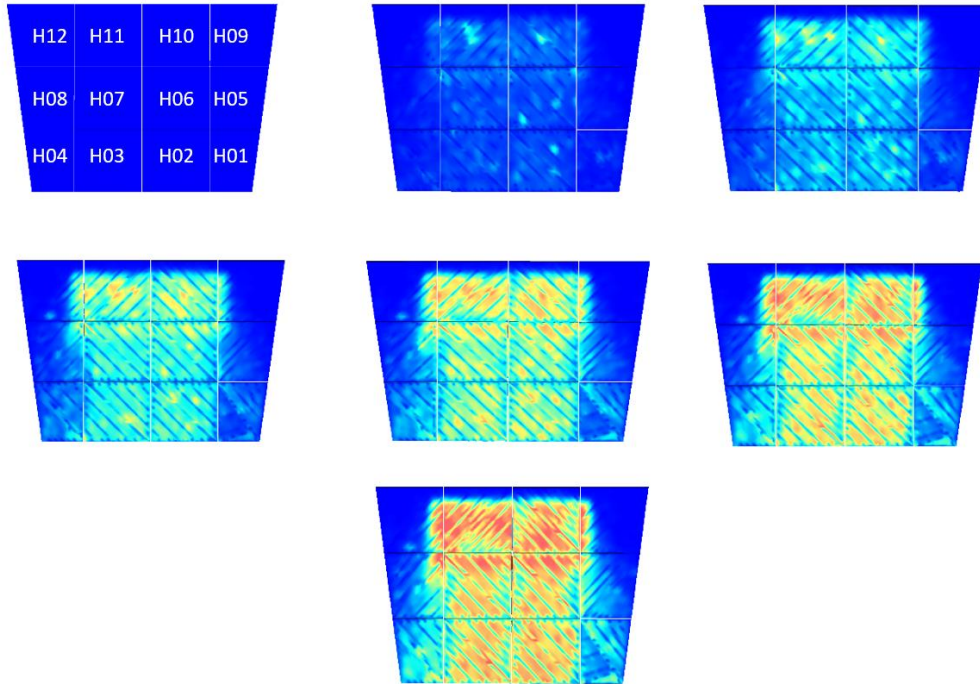
Bölüm 2.3.'de verilen aktarım oluğu simölasyonu için yapılan çalışmanın görseli şekil 52.'de verilmiştir. Çalışma boyunca testler veya kalibrasyonlar sonucu elde edilen tüm parametreler kullanılarak gerçekleştirilen 30 sn'lik simölasyon sonucu aşınma plakalarının üzerindeki aşınma miktarları gözlemlenmiştir. şekil 54.'de ise, her 5 saniye için plakalarda yaşanan hacim kaybına göre görsel ıktıları alınmıştır. Parçacık akışının olduğu giriş ve aktarım oluğunun şekli göz önüne alındığında, bölgesel hacim kaybı beklentisi ve plakaların aşınma görselleri örtüşmektedir. Ayrıca plakaların her biri ayrı şekilde ölçölmüş ve yaşadıkları kütle kaybı Tablo 33.'de verilmiştir.



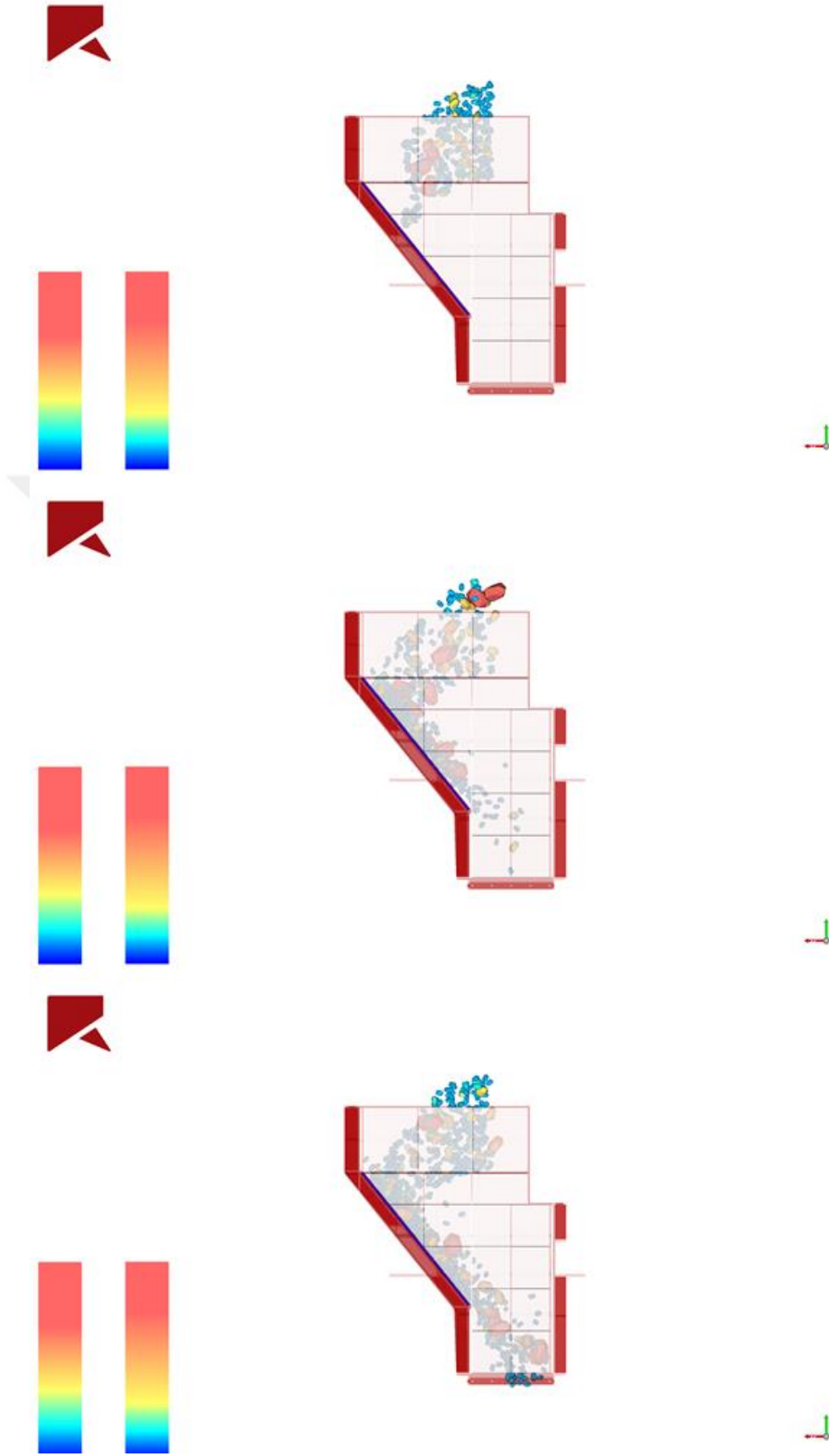
şekil 52. Aktarım oluğu aşınma simölasyonu



Şekil 53. Sisteme parçacık girişi



Şekil 54. Simülasyon süresince her 5 saniye için aşınma plakaları



Şekil 55. Sistemde parçacık akışı

Tablo 33. Simülasyon sonucu plakaların aşınma miktarları

Toplam Simülasyon Süresi [Saniye]		30		
Plakanın Cinsi		500HB Aşınma plakası		
Hacim/Kesme İşi Oranı, C [m³/J]		9,00e-08		
Plaka No.	Parçacık Cinsi ve Boyutları [mm]	Plakanın Başlangıç Kütlesi [g]	Plakanın Bitiş Kütlesi [g]	Kütle Kaybı [g]
H01	Bakır Cevheri 50-200mm	23299,28	23200,27	99,01
H02		33855,59	33221,30	634,29
H03		33855,60	33161,18	694,42
H04		23299,29	23186,09	113,20
H05		27557,83	27407,65	150,18
H06		33855,29	33088,23	767,06
H07		33855,30	33078,85	776,45
H08		27557,84	27378,48	179,36
H09		31816,80	31711,25	105,55
H10		33855,59	33134,50	721,09
H11		33855,59	33104,96	750,63
H12		31816,80	31672,29	144,51
Ortalama Kütle Kaybı [gr]		427,98		

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bakır cevherinin maden endüstrisinde malzeme taşıma ve yönlendirme ekipmanlarından biri olan bir aktarım oluğu üzerindeki aşınma davranışı, Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM) simülasyonu ile analiz edilmiştir. Bakır cevheri ve cevherin etkileşimde bulunduğu yüzeylere ait simülasyona girilmesi gereken DEM parametrelerinin testler yardımıyla elde edilmesinin ardından, parçacık-parçacık ve parçacık-yüzey parametrelerinin kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen tüm parametreler kullanılarak gerçek ölçekli bir aktarım oluğu simülasyonu analiz için hazırlanmıştır. Aktarım oluğu üzerinde bulunan aşınma plakaları için, aşınma kalibrasyonu testi sonucu elde edilen hacim/kesme işi oranı C değerine göre aşınma plakalarına meydana gelen kütle kayıpları incelenmiştir. Gerçek ölçekli orantısal bir parametre olan hacim/kesme işi oranı C , aşınma davranışının gerçek çalışma sürelerine göre çok daha kısa zamanlı simülasyonlara indirgenmesini sağlamaktadır. Söz konusu C değeri, daha yüksek çalışma sürelerinde aşınma plakalarının nasıl tepki göstereceğinin anlaşılması için aynı ölçek değeri korunarak değiştirilmelidir. Genel olarak, endüstriyel proseslerdeki gerçek aşınma ömrü, DEM simülasyonuna göre çok daha uzundur. C değerinin belli bir katsayı faktörü kadar artırılması ve simülasyon süresinin aynı oranla azaltılması, gerçek zamandaki aşınma özelliklerinin korunmasını sağlamaktadır. Aşınma plakalarında meydana gelen kütle kaybına bağlı olarak bu plakaların belirli bir çalışma ömürleri bulunmaktadır. Aşınma plakalarının yüksek deformasyonlara maruz kalması sonucu, plakanın koruduğu taşıma ekipmanının ana yapısının zarar görmesi, iş akışının aksaması veya tesisin tamamen durması gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu gibi sebeplerden ötürü plakalar için ömür tayininin yüksek bir doğrulukla yapılması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen 30 saniyelik aşınma kalibrasyon simülasyonu sonucunda elde edilen C değerine bağlı olarak yapılan aynı simülasyon süresindeki aktarım oluğu analizinde, aşınma plakalarında ortalama 427,98 gr kütle kaybı meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte kritik olan bölgelerdeki H02, H03, H06, H07, H10, H11 kodlu plakalarda 723,99 gr kütle kaybı yaşandığı görülmüştür. Buradan yola çıkarak yapılan bu 30 saniyelik simülasyon sonucunda elde edilen kütle kaybı değeri gerçekte 30 saatte meydana gelecektir. Böylelikle plakaların toplam kütlelerinden bir aşınma plakasının ne kadar süre sonunda tükeneceği hakkında ön görüde bulunulabilir. Bu sayede işletmeler, aşınma

sebebiyle oluşacak olası sorunların önüne geçebileceklerdir. Yine işletmeler, tesislerin bakım planlarını aşınma sürelerini göz önüne alarak şekillendirebilecektir. Bu çalışma içerisinde görüldüğü üzere, aşınma plakalarının hepsi aynı miktarda aşınmamakta, ortaya çıkan deformasyonun yüksek bir bölümü akışın doğrudan etki ettiği plakalar üzerinde bulunmaktadır. Bu analiz ile birlikte aşınmanın yoğun olduğu bölgelerde daha yüksek kalitede plakalar, aşınmanın az görüldüğü yerlerde farklı kalitede plakalar kullanılarak ilk ekipman maliyeti düşürülebilir ve plakaların eş zamanlı olarak aşınmaya maruz kalması sağlanabilir. Aynı zamanda tasarım optimizasyonları ile birlikte aşınma durumu iyileştirilerek aşınma plakalarının ömürleri uzatılabilir.



5. ÖNERİLER

Endüstriyel uygulamalarda yığın halinde katı parçacık bulunan sistemlerde, parçacık akış problemleri, tesislerin üretim kapasitelerini, verimliliğini ve ekipman ömürlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, tesis giderlerinin önemli bir kısmı olan bakım ve onarım masraflarını da arttırmaktadır. DEM simülasyonlarının kullanılması, katı parçacık davranışının anlaşılmasını, parçacık halinde malzeme içeren sistemlerin analiz edilebilmesini, tasarım veya operasyonun iyileştirilmesini sağlamaktadır ve söz konusu problemlerin önüne geçilmesine yardımcı olmaktadır. Gelecek çalışmalarda farklı sertlikteki aşınma plakalarının aşınma karakteristikleri elde edilerek transfer ekipmanı içerisinde farklı miktarda aşınma gerçekleşen bölgelerde farklı malzemelerin kullanılması, kırılma ve yapışma gibi modüllerin aktif edilmesi ve bunların etkilerinin incelenmesi ile birlikte tıkanma, darboğaz ve toz oluşumu gibi problemlerin ele alınması, tasarım optimizasyonları ile birlikte söz konusu problemlerin önüne geçilmesi sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Grima, A. P., Fraser, T., Hastie, D. B. ve Wypych, P. W., Discrete Element Modelling: Trouble-Shooting and Optimisation Tool for Chute Design, Beltcon 16 International Materials Handling Conference, Ağustos 2011, Johannesburg.
2. Ilic, D., Transfer Chute Analysis Techniques Including Continuum Modelling and The Discrete Element Method (DEM), Materials Handling Engineers Association (MHEA), Mayıs 2014, North Lincolnshire.
3. Forsström, D. ve Jonsen, P., Calibration and Validation of A Large Scale Abrasive Wear Model By Coupling Dem-Fem: Local Failure Prediction From Abrasive Wear Of Tipper Bodies During Unloading Of Granular Material, Engineering Failure Analysis, 66 (2016) 274-283.
4. Orhan, E. C., Harzanagh, A. A. ve Ergün, Ş. L., Endüstriyel Elemenin Sayısal Modellemesi (1. Bölüm): AEY Modelinin Geliştirilmesi ve Sınanması, Madencilik, 58 (2019) 17-29.
5. Gelnar, D. ve Zegzulka, J., Discrete Element Method in the Design of Transport Systems: Verification and Validation of 3D Models, Springer, Ostrava, 2019.
6. Jungedal, M., Mild Impact Wear In A Concrete Mixer: An Evaluation of Wet Abrasive Wear, Yüksek Lisans Tezi, Royal Institute of Technology Department of Material Science and Engineering, Stockholm, 2012.
7. Ergüler, M., Buzdolabı Kompresörlerinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2005.
8. Kayalı, E. S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y. ve Çimenoglu, H., Hasar Analizi Seminer Notları, TMMOB, 1997, İstanbul.
9. Rodil, T. A., Edge Effect On Abrasive Wear Mechanisms And Wear Resistance In Wc-6wt.%Co Hardmetals, Yüksek Lisans Tezi, Karlstad University, Division for Engineering Sciences, Physics and Mathematics., Karlstad, 2006.
10. Lansdown, A. R., Materials To Resist Wear: A Guide To Their Selection and Use, Pergamon Press, 1986, Swansea.
11. Özkader, M. Ç., Isıl İşlemleri AISI 4140 Çeliğinin Abrasiv Aşınmasının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, 2015.

12. Wulpi, D. J., Understanding How Components Fail, ASM, Materials Park, Ohio, 1999.
13. Bhushan, B. ve Gupta, B. K., Handbook of Tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments, McGraw-Hill, New York, 1991.
14. Jacobsob, S., Tribologi: Friktion, Smörjning Och Nötning, Liber Utbildning, Stockholm, 1996.
15. Podra, P. ve Andersson, S., Wear Simulation With the Winkler Surface Model, Wear, 207 (1997) 79-85.
16. Kalkan, E., Borlanmış Yüksek Krom ve Nikelli Dökme Çeliğin Korozi Aşınma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Karabük, 2014.
17. Totten, G. E., ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM International, Ohio, 2017.
18. Soydaş, S., Ünliversal Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Kocaeli, 2006.
19. Llewellyn, R. J., Leith, W. Ve Magel, E., Wear Materials Guider for the Mining and Mineral Processing Industry, The Mining Association of British Columbia, 1996, Vancouver.
20. Arnson, H. L., Parks, J. L. ve Larsen, D. R., Alloys and Designs For Large Mill Liners and Crusher Parts, Intermountain Minerals Symposium, 1982.
21. Beste, U., Lundvall, A. ve Jacobson, S., Micro-Scratch Evaluation Of Rock Types - A Means To Comprehend Rock Drill Wear, Tribology International, 37 (2004) 203-210.
22. Tolfree, D., Investigation Of The Gouging Abrasion Resistance Of Materials In The Mining Industry, Doktora Tezi, The University of British Columbia, The Norman B. Keevil Institute of Mining Engineering, Vancouver, 2004.
23. Holmberg, K. ve Laukkanen, A., Wear Models. Handbook of Lubrication and Tribology: Theory and Design, CRC Press, 2 (2012) 1-21.
24. Ishikawa, N., Ueda, K., Mitao, S., Murota, Y. ve Sakiyama, T., High-Performance Abrasion-Resistant Steel Plates with Excellent Low-Temperature Toughness, 2011 International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels, 2011, 81-92.

25. Naylor, D. J. ve Cook, W. T., Heat Treated Engineering Steels, Materials Science and Technology, 7 (1992) 405-538.
26. Ratia, V., Behavior of Martensitic Wear Resistant Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions, Doktora Tezi, Tampere University of Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Tampere, 2015.
27. Gahr, K. H. Z., Wear By Hard Particles, Tribology International, 31 (1998) 587-596.
28. Gahr, K. H. Z., Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, Amsterdam, 1987.
29. Ojala, N., Valtonen, K., Heino, V., Kallio, M., Aaltonen, J., Siitonen P., ve Kuokkala, V. T., Effects Of Composition And Microstructure On The Abrasive Wear Performance Of Quenched Wear Resistant Steels, Wear, 317 (2014) 225-232.
30. Aldrich, C., Consumption of Steel Grinding Media In Mills – A Review, Minerals Engineering, 49 (2013) 77–91.
31. O'Sullivan, C., Particulate Discrete Element Modelling A Geomechanics Perspective, Spon Press, Londra, 2011.
32. Ghorbani, S., Simulation of Soil-to-Tool Interaction Using Discrete Element Method (DEM) and Multibody Dynamics (MBD) Coupling, Yüksek Lisans Tezi, Iowa State University, Iowa, 2019.
33. ESSS Rocky DEM, Dem Technical Manual, 2021.
34. Walton, O. R. ve Braun, R. L., Viscosity, Granular-Temperature, and Stress Calculations for Shearing Assemblies of Inelastic, Frictional Disks, Journal of Rheology, 30 (1986) 949-980.
35. Cundall, P. A. ve Strack, D. L., A Discrete Numerical Model For Granular Assemblies, Geotechnique, 29 (1979) 47-65.
36. Hertz, H., Über Die Berührung Fester Elastischer Körper, J. Reine Angewandte Mathematik, 92 (1881) 156-171.
37. Mindlin, R. D., Compliance Of Elastic Bodies In Contact, Journal of Applied Mechanics, 16 (1949) 259-268.
38. Mindlin, R. D. ve Deresiewicz, H., Elastic Spheres In Contact Under Varying Oblique Forces, Journal Of Applied Mechanics, 20 (1953) 327-344.

39. Vogel, L. ve Peukert, W., From Single Particle Impact Behaviour To Modelling Of Impact Mills, Chemical Engineering Science, 60 (2005) 5164-5176.
40. Shi, F. ve Kojovic, T., Validation Of A Model For Impact Breakage Incorporating Particle Size Effect, International Journal of Mineral Processing, 82 (2007) 156-163.
41. Archard, J. F., Wear Theory And Mechanisms, Wear Control Handbook, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1980.
42. Coetzee, C. J., Review: Calibration Of The Discrete Element Method, Powder Technology, 310 (2017) 104-142.
43. Richter, C., Rössler, T., Kunze, G., Katterfeld, A. ve Will, F., Development Of A Standard Calibration Procedure For The Dem Parameters Of Cohesionless Bulk Materials – Part II: Efficient Optimization-Based Calibration, Powder Technology, 360 (2020) 967-976.
44. Li, C., Honeyands, T., O’Dea, D. ve Moreno-Atanasio, R., The Angle Of Repose And Size Segregation of Iron Ore Granules: DEM Analysis and Experimental Investigation, Powder Technology, 320 (2017) 257-272.
45. Yan, Z., Wilkinson, S. K., Stitt, E. H. ve Marigo, M., Discrete Element Modelling (DEM) Input Parameters: Understanding Their Impact on Model Predictions Using Statistical Analysis, Computational Particle Mechanics, 2 (2015) 283-299.
46. De Magalhães, F. N. ve Tavares, L. M., Rapid Ore Breakage Parameter Estimation From a Laboratory Crushing Test, International Journal of Mineral Processing, 126 (2014) 49-54.
47. Franke, J., Cleary, P. W. ve Sinnott, M., How to Account for Operating Condition Variability When Predicting Liner Operating Life with DEM – A Case Study, Comminution '14, 2014, Cape Town.
48. Süleyman Demirel Üniversitesi, Statik Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi, Isparta, 2018.
49. Anonim, Sürtünmeli Hareket ve Sürtünme Katsayısının Bulunması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
50. Ge, T., Jia, Z. H. ve Zhou, K. D., A Theoretical Model For The Coefficient Of Restitution Calculation Of Point Impact, Machine Tool Design and Research, 23 (2007) 14-16.

51. Xia, R., Li, B., Wang, X., Li, T. ve Yang, Z., Measurement And Calibration of The Discrete Element Parameters of Wet Bulk Coal, Measurement, 142 (2019) 84-95.
52. Katterfeld, A. ve Rössler, T., Standard Procedure For The Calibration Of Dem Parameters Of Cohesionless Bulk Materials, Proceedings Of The 8th International Conference On Discrete Element Methods, 2019, Twente.
53. Zhou, Y. C., Xu, B. H. ve Yu, A. B., Numerical Investigation of The Angle of Repose of Monosized Spheres, Physical Review E, 64 (2001).
54. Chen, H., Zhao, X., Xiao, Y. ve Liu, Y., Numerical Investigation on Angle of Repose of Cylindrical Particles, Advanced Materials Research Vols, 941 (2014) 2383-2386.
55. Frankowski, P. ve Morgeneyer, M., Calibration and Validation of DEM Rolling and Sliding Friction Coefficients in Angle of Repose and Shear Measurements, Aip Conference Proceedings, 2013, Compiègne.
56. Reddish, D. J., Stace, L. R., Vanichkobchinda, P. ve Whittles, D. N., Numerical Simulation Of The Dynamic Impact Breakage Testing of Rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 42 (2005) 167-176.
57. Bwalya, M. M., Using The Discrete Element Method To Guide The Modelling Of Semi And Fully Autogenous Milling, Doktora Tezi, Faculty of Engineering and Built Environment, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2005.
58. Genç, Ö., Altın Cevherinin Tek Tane Darbe Kırılma Fonksiyonlarının Ağırlık Düşürme Tekniği ile İncelenmesi, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 154 (2017) 211-217.
59. Napier-Munn, T., Morrell, S., Morrison, R. ve Kojovic, T., Mineral Comminution Circuits, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC), Queensland, 1996.
60. Ye, F., Wheeler, C., Chen, B., Hu, J., Chen, K. ve Chen, W., Calibration and Verification of DEM Parameters for Dynamic Particle Flow Conditions Using a Backpropagation Neural Network, Advanced Powder Technology, 30 (2018) 292-301.
61. Walker, P., Kawalec, W. ve Król, R., Application of the Discrete Element Method (DEM) for Simulation of the Ore Flow Inside The Shaft Ore Bunker in the Underground Copper Ore Mine, Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance, 2019, Cham, Springer, 633-644.

62. Hadi, S., Bayuseno, Jamari, Rachmat, M. A. ve Kurnia, C., Design and Analysis Of Trapezoidal Bucket Excavator For Backhoe, International Cooperation for Education about Standardization, 2018, Yogyakarta.
63. Kaľavský, A., Palička, P., Huňady, R. ve Kicko, M., A Comprehensive Approach to the Evaluation of Material Properties of S235JR Steel, Acta Mechanica Slovaca, 25 (2021) 36-45.



ÖZGEÇMİŞ

2011 yılında Trabzon Kanuni Anadolu Lisesi'nden mezun oldu ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2015 yılında bu bölümü bitirdikten sonra Avrasya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne başladı ve 2017 yılında mezun oldu. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine ve Çolakoğlu Mühendislik Makina Sanayi ve Ticaret Limited şirketinde Ar-Ge Mühendisi olarak göreve başladı. Temmuz 2020 tarihinden itibaren aynı firmada Ar-Ge Merkezi Yöneticisi olarak görevini sürdürmektedir.