

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI PARÇACIKLARIN METALİK YÜZEYLERDE OLUŞTURDUĞU
EROZYONUN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali İhsan BUDUR

HAZİRAN 2018
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Ali İhsan BUDUR Tarafından Hazırlanan**

**KATI PARÇACIKLARIN METALİK YÜZEYLERDE OLUŞTURDUĞU EROZYONUN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

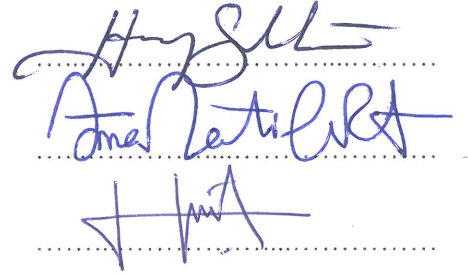
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 29 / 05 / 2018 gün ve 1755 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ

Üye : Doç. Dr. Ömer Necati CORA

Üye : Doç. Dr. Hakan ADATEPE

The image shows three handwritten signatures in blue ink, each written on a horizontal dotted line. The signatures are cursive and appear to be the names of the jury members: Hasan Gedikli, Ömer Necati Cora, and Hakan Adatepe.

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında mühendislikte yaygın olarak kullanılan; alüminyum alaşımı AA 6061, çelik alaşımları; AISI 1020, SS 304, Hardox 450, DP 600 ve Ti-6Al-4V titanyum alaşım malzemelerinin katı parçacık etkisi altındaki erozyon davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmadaki erozyon testleri; TAI-TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. tarafından desteklenen DKTM/2015/03 “Düşük Enerjili Çarpışma Altında Helikopter Palinin Aşınma Davranışının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi” projesi kapsamında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü bünyesinde imalatı gerçekleştirilen katı parçacık erozyon test sisteminde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalarım sürecinde bilgi, tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ’ ye, tezimin yazım ve düzenlenmesi aşamasında tecrübesiyle bana yol gösteren Sayın Doç. Dr. Ömer Necati CORA’ ya ve sayısal çalışmalar kısmında her türlü tecrübe ve bilgilerini benimle paylaşan Sayın Doç. Dr. Recep GÜMRÜK’ e teşekkürlerimi sunarım.

İlaveten çalışmalarımda yardımlarını benden esirgemeyen, Öğr. Gör. Dursun MERİÇ, Arş. Gör. Doğan ACAR, Arş. Gör. İsmail ÖZEN, Arş. Gör. Hamdi KULEYİN, Arş. Gör. Durukan Burak DİLEK, Öğr. Gör. Dr. Merdin DANIŞMAZ ve Öğr. Gör. Yunus Emre ÇETİN’ e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini her zaman yanında hissettiğim aileme ve sevgili eşime teşekkürlerimi sunarım.

Ali İhsan Budur

Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Katı Parçacıkların Yüksek Hızlarda Oluşturduğu Erozyonun İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ’ nin 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. 13/06/2018

Ali İhsan BUDUR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Aşınma Mekanizmaları	2
1.2.1. Adhezif Aşınma	3
1.2.2. Abrazif Aşınma	4
1.2.3. Yorulma Aşınması	5
1.2.4. Korozyon Aşınması	5
1.2.5. Erozyon Aşınması	6
1.3. Katı Parçacık Erozyonuna Etki Eden Faktörler	7
1.3.1. Çarpma Açısı	8
1.3.2. Çarpma Hızı	10
1.3.3. Parçacık Şekli	11
1.3.4. Parçacık Boyutu	12
1.3.5. Hedef Malzeme Özellikleri	14
1.4. Metalik Malzemelerde Katı Parçacık Erozyonu	14
1.4.1. Sünek Metallerde Katı Parçacık Erozyonu	15
1.4.2. Gevrek Malzemelerde Katı Parçacık Erozyonu	20
1.5. Katı Parçacık Erozyon Aşınmasının Sayısal Modellemesi	22
1.5.1. Katı Cisimler Mekaniği Yöntemiyle Modelleme	23
1.5.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Modelleme	26
1.6. Tezin Konusu ve Amacı	28
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	29
2.1. Test Çalışmaları	29

2.1.1. Aşındırıcı Parçacık Özellikleri ve Hız Ölçümü	29
2.1.2. Erozyon Test Sistemi ve Test Prosedürü	30
2.1.3. Numune Özellikleri	34
2.1.4. Krater Derinliklerinin Ölçümü	37
2.2. Sayısal Çalışmalar	38
2.2.1. Katı Cisimler Mekaniği Yöntemiyle Modelleme Çalışmaları	39
2.2.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Modelleme Çalışmaları	42
3. BULGULAR VE İRDELEMELER	47
3.1. Test Sonuçları	47
3.1.1. Erozyon Miktarının Zamana Göre Değişimi	48
3.1.2. Erozyon Miktarının Çarpma Açısına Göre Değişimi	60
3.1.3. Erozyon Miktarının Çarpma Hızına Göre Değişimi	69
3.2. Krater Derinlikleri	78
3.3. Sayısal Bulgular	86
4. SONUÇLAR	101
5. ÖNERİLER	102
6. KAYNAKLAR	103
7. EKLER	108
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KATI PARÇACIKLARIN METALİK YÜZEYLERDE OLUŞTURDUĞU
EROZYONUN DENEYSSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ali İhsan BUDUR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ
2018, 107 Sayfa, 4 Sayfa Ek

Bu çalışmada, mühendislikte yaygın olarak kullanılan AISI 1020, AA 6061, Ti-6Al-4V, SS 304, Hardox 450, DP 600 metalik malzemelerinin katı parçacık çarpması altındaki erozyon davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar iki aşamada yürütülmüştür. Metalik malzemelerin erozyon performansları ilk aşamada parçacık çarpma hızı 100 m/s için 20, 30, 45, 60, 90° çarpma açılarında belirlenmişken, ikinci aşamada 90° parçacık çarpma açısında ve 100, 127, 170, 210, 250 m/s parçacık çarpma hızlarında belirlenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda en iyi erozyon performansı; kütleli erozyon miktarı bakımından alüminyum alaşımı AA 6061 malzemesi için elde edilmişken, hacimsel erozyon miktarı bakımından Hardox 450 çeliğinde elde edilmiştir. İlâveten yüksek hızlarda yapılan testler sonucunda en yüksek erozyon performansı, kütleli ve hacimsel erozyon miktarları bakımından sırasıyla AA 6061 alüminyum malzemesi ve AISI 1020 çeliğinde elde edilmiştir. Bunun yanında erozyon miktarı zamanla doğrusal değişmiştir ve maksimum erozyon miktarı parçacık çarpma açısı 20-30° değerinde meydana gelmiştir.

Katı cisimler mekaniği ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak Ti-6Al-4V malzemesinin erozyon davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Katı cisimler mekaniği yaklaşımı ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi sonucunda test sonuçlarıyla uyumlu veriler elde edilememiştir. Buna karşın hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile test sonuçları ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı Parçacık Erozyonu, Sonlu elemanlar yöntemi, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Master Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE SOLID
PARTICLES EROSION OF METALLIC SURFACES

Ali İhsan BUDUR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Hasan GEDİKLİ
2018, 107 Pages, 4 Pages Appendix

In this study, the erosion behaviors under solid particle impact of AISI 1020, AA 6061, Ti-6Al-4V, SS 304, Hardox 450, DP 600 metallic materials widely used in engineering have been investigated experimentally and numerically. Experimental studies have been carried out in two stages. In the first stage, the erosion losses of metallic materials were determined at the impact velocity of 100 m/s and at different impact angles of 20, 30, 45, 60, 90°, in the second stage, the erosion performances of the same materials were determined at impact angle of 90° and impact velocity of 100, 127, 210 and 250 m/s. The best erosion performance; the amount of mass erosion in the first test phase was obtained in the aluminum alloy AA 6061 but the amount of volume erosion was obtained in the Hardox 450. In addition, the best erosion performances, were obtained in the amount of mass and volume erosion at high speed tests in the aluminum alloy AA 6061 and AISI 1020 steel, respectively. Besides, the amount of erosion has changed linearly with time, and the maximum amount of erosion has occurred at a particle impact angle of 20-30°.

The erosion behavior of Ti-6Al-4V material was numerically investigated using solid mechanics and computational fluid dynamics approaches. The results of the finite element analysis carried out by solid mechanics approaches was not in agreement with the experimental results. By contrast, the computational fluid dynamics approach was obtained results consistent with the test results.

Key Words: Solid particle erosion, Finite element method, Computational fluid dynamics

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Aşınma türleri.....	3
Şekil 1.2. Adhezif aşınma; a) yüzeyler arası malzeme transferi b) metallerin izafi hareketine bağlı pürüzlülüklerin değişimi c) pürüz teması ile gerçekleşen bağ oluşumu (Bağcı, 2010).....	3
Şekil 1.3. Abrazif aşınmanın şematik olarak gösterimi (Özbek, 2016).....	4
Şekil 1.4 a) Temas yüzeyinde oluşan Hertz basınçlarının şematik gösterimi ve b) sonsuz vida dişlisi yüzeyinde oluşmuş yorulma aşınma sonrası görüntüsü (Küçükömeroğlu, 2013).....	5
Şekil 1.5. a) Korozyon oluşumu, b) abrazif etki nedeniyle oluşan korozyon aşınması.....	6
Şekil 1.6. Katı parçacık erozyonu şematik gösterimi.....	6
Şekil 1.7. Katı parçacık erozyonuna etki eden parametreler.....	8
Şekil 1.8. Katı parçacık erozyonunda çarpma açısı.....	8
Şekil 1.9 Sünek/gevrek malzemelerdeki erozyon miktarının açıya göre değişimi (Finnie,1958).....	9
Şekil 1.10. Ti-6Al-4V malzemesi için erozyon oranının parçacık çarpma hızına göre ilişkisi (Yerramareddy ve Bahadur, 1990).....	11
Şekil 1.11. Parçacık şeklinin erozyon miktarına etkisi (Ally,2010).....	12
Şekil 1.12. Erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi (a) ve erozyon oranının parçacık boyutuna göre değişimi (b), (Morrison ve Scattered, 1986).....	13
Şekil 1.13. SS 304 paslanmaz çeliğinde erozyon miktarının parçacık boyutuna göre değişimi (Sundararajan ve Roy, 1997).....	14
Şekil 1.14 . Metallerde katı parçacık erozyonu esnasında malzeme çıkarma mekanizmaları a) kesme ve b) deformasyon mekanizmaları (Ally,2010).....	16
Şekil 1.15. Kütle kaybının aşındırıcı parçacıkların toplam kütlesiyle ilişkisi (Hutchings, 1996).....	17
Şekil 1.16. Gevrek malzeme erozyon mekanizması: (a) konik ve orta çatlağın oluşumu, (b)orta çatlağın kapanarak yatay çatlakların oluşumu (Najafifard, 2014).....	21
Şekil 2.1. Çift disk hız ölçüm düzeneği.....	30
Şekil 2.2. Katı parçacık erozyon test sistemi.....	31

Şekil 2.3. Erozyon test sistemi kabini içi.....	32
Şekil 2.4. Testler için a) 90°, b) 60°, c) 45°, d) 30°, e) 20° testleri için hazırlanmış AISI 1020 numuneleri.....	37
Şekil 2.5. Üç boyutlu yüzey taraması işleminde kullanılan temassız lazer optik profilometre.....	38
Şekil 2.6. Sonlu elemanlar modellemesindeki işlem adımları.....	39
Şekil 2.7. Ti-6Al-4V malzemesine ait sonlu elemanlar modeli.....	40
Şekil 2.8. Ti-6Al-4V malzemesi için oluşturulan hesaplamalı akışkanlar modeli.....	43
Şekil 2.9. Ti-6Al-4V malzemesi için oluşturulan ağ örgüsü yapısı.....	44
Şekil 3.1. Alümina oksit (Al ₂ O ₃) parçacığının (50 µm) hız-basınç kalibrasyon grafiği.....	48
Şekil 3.2. AISI 1020 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	49
Şekil 3.3. AISI 1020 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	50
Şekil 3.4. SS 304 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	51
Şekil 3.5. SS 304 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	52
Şekil 3.6. AA 6061 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	53
Şekil 3.7. AA 6061 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	54
Şekil 3.8. Hardox 450 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açıları arasında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi....	55
Şekil 3.9. Hardox 450 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	56
Şekil 3.10. Ti-6Al-4V malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açıları arasında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi...57	
Şekil 3.11. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	58

Şekil 3.12. DP 600 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	59
Şekil 3.13. DP 600 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	60
Şekil 3.14. AISI 1020 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	61
Şekil 3.15. SS 304 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	62
Şekil 3.16. AA 6061 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	63
Şekil 3.17. Hardox 450 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	64
Şekil 3.18. Ti-6Al-4V malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	65
Şekil 3.19. DP 600 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	66
Şekil 3.20. Tüm malzemelerin 100 m/s parçacık hızı altında 16 dakika sonunda oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimlerinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 3.21. Tüm malzemelerin 100 m/s parçacık hızı altında 16 dakika sonunda oluşan hacimsel erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimlerinin karşılaştırılması.....	69
Şekil 3.22. AISI 1020 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi.....	70
Şekil 3.23. SS 304 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi.....	71
Şekil 3.24. AA 6061 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi.....	72
Şekil 3.25. Hardox 450 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi.....	73
Şekil 3.26. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi.....	74

Şekil 3.27. DP 600 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi.....	75
Şekil 3.28. 90° sabit çarpma açısında tüm malzemelerde 16. dakika sonunda oluşan kütleli erozyon miktarının parçacık çarpma hızına göre karşılaştırılması.....	76
Şekil 3.29. 90° sabit çarpma açısında tüm malzemelerde 16. dakika sonunda oluşan hacimsel erozyon miktarının parçacık çarpma hızına göre karşılaştırılması.....	78
Şekil 3.30. Ti-6Al-4V malzemesinin test sonrası; a) 90°, c) 60°, e) 45° çarpma açılarındaki numune resimleri, b) 90°, d) 60°, f) 45° çarpma açılarındaki yüzey tarama görüntüleri.....	79
Şekil 3.31. Ti-6Al-4V malzemesinin deney sonrası; g) 30°, i) 20° çarpma açılarındaki numune resimleri, h) 30°, j) 20° çarpma açılarındaki yüzey tarama görüntüleri.....	80
Şekil 3.32. Ti-6Al-4V malzemesinin deney sonrası; a) 90°, b) 60°, c) 45°, d) 30°, e) 20° yapılan deneyler sonucunda numune yüzeylerinde oluşan yüzey krater derinlikleri.....	81
Şekil 3.33. 90° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonrası; a) AISI 1020, c) SS 304, e) AA 6061 malzemelerinin numune resimleri, b) AISI 1020, d) SS 304, f) AA 6061 malzemelerinin yüzey tarama görüntüleri.....	83
Şekil 3.34. 90° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonrası; g) Hardox 450, i) Ti-6Al-4V, k) DP 600 malzemelerinin numune resimleri, k) Hardox 450, j) Ti-6Al-4V, l) DP 600 malzemelerinin yüzey tarama görüntüleri.....	84
Şekil 3.35. 90° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonrası; a) AISI1020, b) SS304, c) AA 6061, d) Hardox 450, e) Ti-6Al-4V, f) DP600.....	85
Şekil 3.36. Deneysel ve katı cisimler mekaniği yöntemiyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	86
Şekil 3.37. Ti-6Al-4V malzemesinde 20° çarpma açısında oluşan a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değiştirme dağılımı	88
Şekil 3.38. Ti-6Al-4V malzemesinde 30° çarpma açısında oluşan a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değişimi dağılımı.....	89
Şekil 3.39. Ti-6Al-4V malzemesinde 45° çarpma açısında oluşan a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değişimi dağılımı.....	90

Şekil 3.40. Ti-6Al-4V malzemesinde 60° çarpma açısında oluşan a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değişimi dağılımı.....	91
Şekil 3.41. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısında oluşan a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değişimi dağılımı.....	92
Şekil 3.42. Ti-6Al-4V malzemesi için erozyon miktarının çarpma açısına göre değişiminin deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması.....	93
Şekil 3.43. Ti-6Al-4V malzemesi için erozyon miktarının çarpma hızına göre değişiminin deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması.....	94
Şekil 3.44. Ti-6Al-4V malzemesinde 20° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı.....	95
Şekil 3.45. Ti-6Al-4V malzemesinde 30° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı.....	96
Şekil 3.46. Ti-6Al-4V malzemesinde 45° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı.....	96
Şekil 3.47. Ti-6Al-4V malzemesinde 60° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı.....	97
Şekil 3.48. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı.....	97
Şekil 3.49. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 127 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı.....	98
Şekil 3.50. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 170 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı.....	99
Şekil 3.51. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 210 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı.....	99
Şekil 3.52. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 250 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı.....	100

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Mühendislik dallarında karşılaşılan hasar sebepleri ve oranları	2
Tablo 1.2. Katı parçacık erozyonu görülen sistemler ve parçalar (Bayındır, 2009).....	7
Tablo 2.1. Erozyon miktarının açıya göre değişimi testleri.....	33
Tablo 2.2. Erozyon miktarını çarpma hızına göre değişimi testleri.....	34
Tablo 2.3. Test numunelerinin ağırlıkça kimyasal bileşenleri.....	35
Tablo 2.4. Deney numunelerinin mekanik özellikleri	36
Tablo 2.5. Test numunesi türleri ve kalınlıkları.....	36
Tablo 2.6. Çarpma açısına göre test numunesi boyutları.....	37
Tablo 2.7. Ti-6Al-4V malzemesine ait doğrusal malzeme özellikleri ve Johnson-Cook malzeme sabitleri (Lesuer, 2000).....	41
Tablo 2.8. Ti-6Al-4V malzemesine ait Johnson-Cook hasar sabitleri (Lesuer, 2000).....	42
Tablo 2.9. Ti-6Al-4V malzemesine ait K ve n katsayıları.....	45
Tablo 3.1. Tablo 3.1. Alümina oksit aşındırıcı parçacığına ait hız-basınç değerleri.....	47

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyadaki bütün malzemeler zamanla doğanın yıpratıcı etkilerine maruz kalmaktadır. Bu yıpratıcı etkiler, malzemelerin yapı bütünlüğünün bozulup hasara uğramalarına yol açmaktadır. Buna en basit örnek, çöllerdeki rüzgâr nedeniyle kayaların aşınmasıdır. Bu hasar durumlarına günlük yaşantımızda da rastlamak mümkündür. Bunlar bazı durumlarda insanlık yararına kullanıldığı gibi, bazen de istenilmeyen durumlara yol açabilir. Örneğin jet taşı yardımıyla bir malzeme kesimi yapılırken, kesici taşın kesim bölgesindeki parçayı hasara uğratarak, parçanın kesilmesini sağlamasıdır. Fakat makinalar yardımıyla üretim yapılan fabrikalarda, bazı durumlarda makina parçalarında çeşitli nedenlerden dolayı hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar parçaların çalışamaz hale gelmesine dolayısıyla makinaların ve üretimin durmasına yol açmaktadır. Çoğu zaman bu hasarın büyüklüğüne ve türüne göre bu parçaların tamiri imkânsız olmakta ve yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir. Bu süre zarfında fabrikanın çalışmaması mali açıdan büyük yükler oluşturmaktadır.

Günümüzde mühendisler makina tasarımları yaparken, oluşabilecek birçok hasar etkenini hesap etmekte, tasarımlarını bunlara göre yapmaktadırlar. Bu etkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- a) Birbiriyle eş çalışan parçalarda sürtünme sebebiyle oluşan hasarlar,
- b) Makinaların çalıştığı ortamdaki ısı, nem vs. oluşturduğu doğal yıkıcı etkenler,
- c) Makinaların çalıştığı ortamlarda yasaların belirttiği maksimum gürültü seviyesi,

Makina tasarımı esnasında mühendisler, bu etkenlerin maksimum seviyede olduğu durumlara göre hesaplarını yaparlar. Bu hesaplar sonucunda makinanın bütün parçaları için bir ömür değeri elde ederler. Günümüzde bilim adamları makina parçalarında oluşan bu hasar miktarlarını azaltmak ve ömürlerinin uzatmak için çalışmalarını sürdürmektedir.

Hasar, bir sistemi oluşturan parça veya parçaların zamanla fonksiyonunu yerine getiremez duruma gelmesidir (Eryürek, 1993). Bir sistem veya parça; kendisinden beklenen performansı yeteri kadar gösterememesi veya maruz kaldığı ciddi hasarlar sonucu tamamen kullanılamaz hale gelmesi durumunda, parçalar tamir edilmeli veya yenisi ile değiştirilmelidir. Bazı mühendislik dallarında ortaya çıkabilecek hasarların muhtemel sebepleri ve bunların karşılaşıma yüzdeleri Tablo 1.1'de verilmiştir (URL-1, 2017).

Tabloda belirtilen hasar sebeplerinin bir veya birkaçının birleşimi sonucu malzemelerin yapısında ciddi sorunlar meydana gelebilmektedir.

Tablo 1.1. Mühendislik dallarında karşılaşılan hasar sebepleri ve oranları (URL-1, 2017)

Hasar Sebepleri	%
Malzeme Seçimi Hatası	40
Üretim	15
Isıl İşlem Hatası	15
Tasarım Hatası	11
Çalışma Şartları	14
Kalite Kontrol Eksikliği	5

1.2. Aşınma Mekanizmaları

Günlük yaşantımızda karşılabileceğimiz en önemli hasar tiplerinden birisi aşınmadır. Aşınma, birbirine temas eden yüzeylerden mekanik etkiler sonucu malzeme kaybolması olarak tanımlayabiliriz. Aşınma, fiziksel, elektriksel, ısıl sebepler veya korozyon sonucunda oluşabilir.

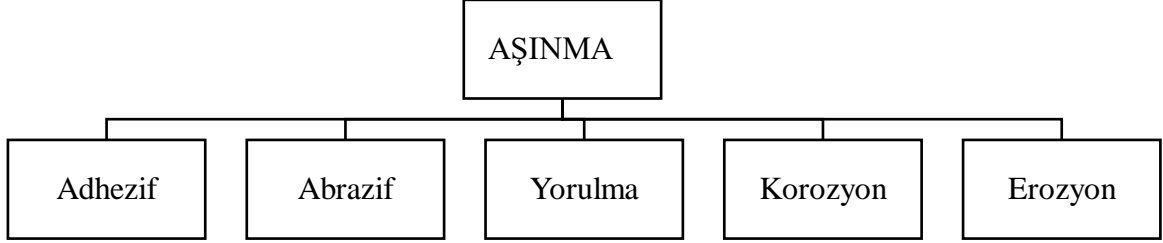
Aşınma, yaşantımızın her noktasında mevcuttur. Buna giydiğimiz ayakkabılarımızın tabanlarının zamanla aşınması ve arabalarımızda fren balatalarının aşınmasını örnek verebiliriz. Bunlara ilaveten çöllerde kuvvetli esen rüzgarlar nedeniyle kayaların aşınmasını da doğal bir aşınma olayı olarak örnek verebiliriz.

Bir sistemde aşınmadan söz edilebilmesi için genel olarak;

- a) Temel Malzeme
- b) Aşındırıcı Parçacık
- c) Ara Malzeme
- d) Yükleme
- e) İzafi Hareket

unsurlarının bir arada olması gereklidir. Bunların varlığı, sistemde aşınmanın olduğunun göstergesidir (URL-2, 2017).

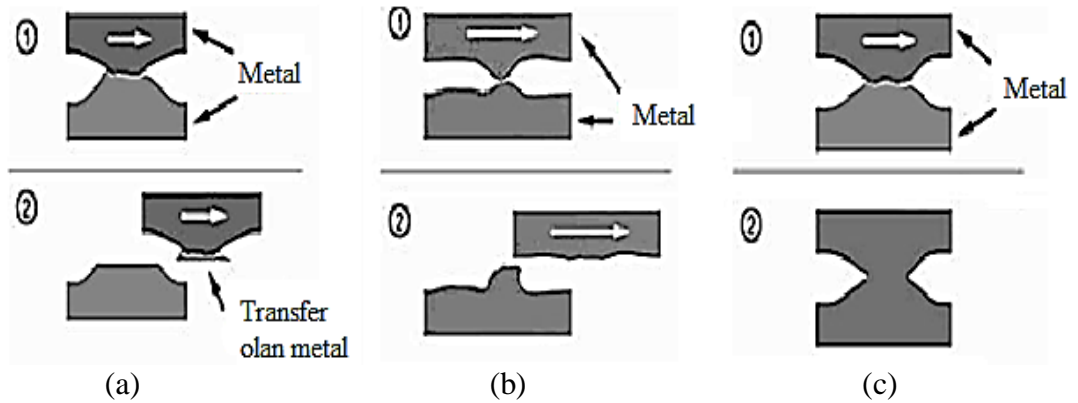
Aşınma, tek başına veya diğer hasar mekanizmalarıyla (korozyon, yorulma) birlikte de malzemelerde hasara yol açabilmektedir. Aşınma mekanizmalarını Şekil 1.1’de görüldüğü gibi üzere beş farklı kategoride inceleyebilmemiz mümkündür.



Şekil 1.1. Aşınma türleri

1.2.1. Adhezif Aşınma

Gelişen teknolojiyle birlikte malzemelerin yüzeyleri üretimleri esnasında çok hassas toleranslarla işlenmektedirler. Bu kadar hassas olarak işlenmelerine rağmen malzemelerin yüzeylerinde gözle görülmeyecek kadar küçük boyutlardaki pürüzlülükler bulunmaktadır. Pürüzlü yüzeylere sahip iki malzemenin birbirlerinin üzerinde hareketleri esnasında, zayıf olan malzeme yüzeyinden parça kopması olayı gerçekleşmektedir. Bu şekilde oluşan malzeme kaybı, adhezif aşınma olarak tanımlanır. Adhezif aşınmanın oluşum süreci şematik olarak Şekil 1.2’de görülmektedir.



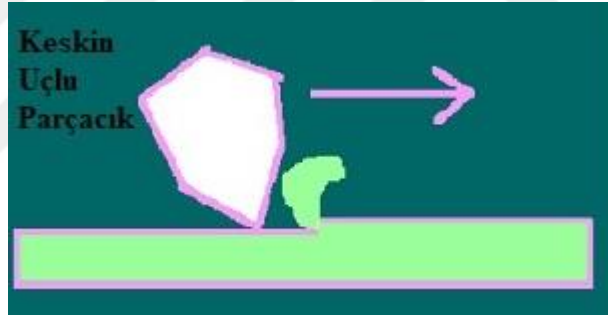
Şekil 1.2. Adhezif aşınma; a) yüzeyler arası malzeme transferi b) metallerin izafi hareketine bağlı pürüzlülüklerin değişimi c) pürüz teması ile gerçekleşen bağ oluşumu (Bağcı, 2010).

Önemli bir hasar türü olan adhezif aşınmayı azaltmak için aşağıdaki önlemler alınmaktadır:

- İyi bir yağlama yapılması, böylece sürtünmenin azaltılması, ortamda ısının uzaklaştırılması ve bu şekilde mikro kaynak bölgeleri oluşumunun önlenmesi.
- Birbiri içinde çözünmeyen metaller kullanılması ve mikro kaynağın engellenmesi.
- Birbiri ile temas eden malzemelerin yüzeylerindeki pürüzlerin küçültülmesi.

1.2.2. Abrazif Aşınma

Sert ve keskin bir parçanın, kendisinden daha yumuşak bir malzeme yüzeyinden parça koparması şeklinde oluşan aşınma türü abrazif aşınma olarak tanımlanmaktadır. Sert malzeme, yumuşak malzeme yüzeyinde bir kazıma etkisi oluşturup hasara yol açmaktadır. Abrazif aşınmanın şematik olarak gösterimi Şekil 1.3’de verilmiştir (Özbek, 2016).



Şekil 1.3. Abrazif aşınmanın şematik olarak gösterimi (Özbek, 2016).

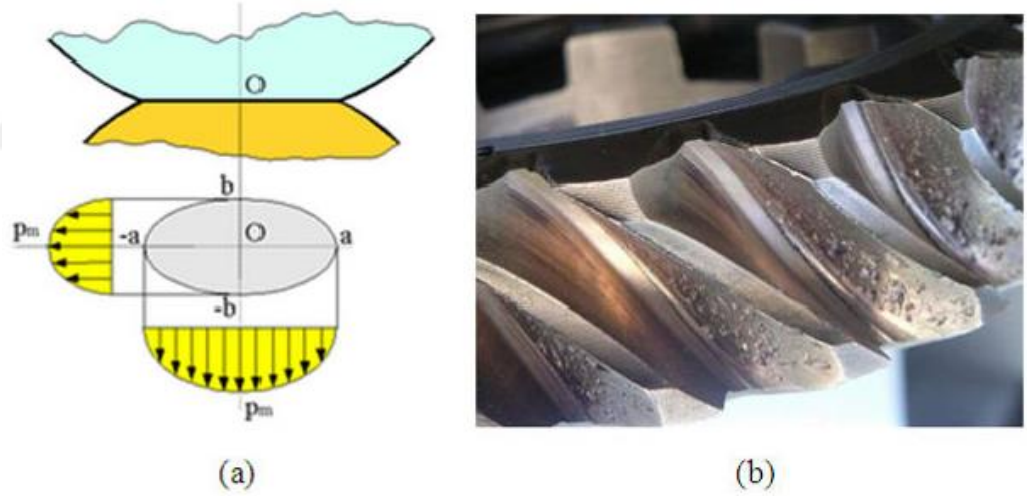
Birbirleriyle eş zamanlı çalışan makina parçalarının sürtünmesi sonucu yüzeylerde küçük sert parçacıklar ayrılır. Ayrılan bu küçük ve sert parçacıklar yumuşak olan yüzeylere saplanır ve yüzeyde aşındırma oluştururlar.

Malzemedeki oluşan abrazif aşınma aşağıdaki önlemlerle azaltılabilmektedir:

- Abrazif aşınma oluşabilecek yüzeylerde sertliğin artırılması.
- Abrazif aşınmaya neden olabilecek sert parçacıkların sistemden uzaklaştırılması için hava veya yağ filtreleri kullanılması.
- Abrazif aşınmaya uğrayacak parçaların kolayca değiştirilebilmesi için uygun tasarımların yapılması.

1.2.3. Yorulma Aşınması

Birbirleriyle temas halinde çalışan malzemelerin, temas alanları çok küçük olduklarında bu malzemelerin yüzeylerinde Hertz basınçları oluşmaktadır (Şekil 1.4a). Bunlar, malzeme yüzeyinin hemen altında değişken yükler sonucunda kayma gerilmeleri oluşturmakta ve bu da parçada yorulmaya sebep olmaktadır. Değişken ve tekrarlı yüklemeler sonucunda maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerlerde plastik deformasyon nedeniyle çok küçük boşluklar oluşur. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru büyüyerek yüzeyde küçük çukurlar meydana gelmesine neden olurlar. Bu şekilde meydana gelen hasar yorulma aşınması olarak tanımlanmaktadır (Küçükömeroğlu, 2013). Bu aşınma türü en çok rulmanlı yataklar, dişli çarklar ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan parçalarda görülmektedir. Şekil 1.4b’de yorulma aşınmasına maruz kalmış bir sonsuz vida dişlisi görülmektedir.

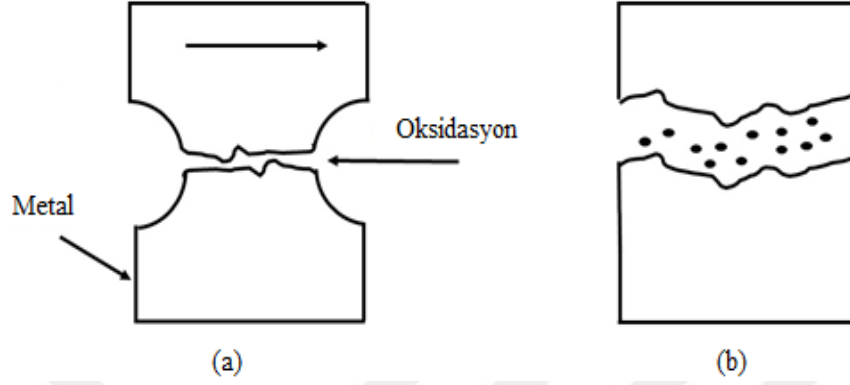


Şekil 1.4. a) Temas yüzeyinde oluşan Hertz basınçlarının şematik gösterimi ve b) sonsuz vida dişlisi yüzeyinde oluşmuş yorulma aşınma sonrası görüntüsü (Küçükömeroğlu, 2013).

1.2.4. Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması iki hasar türünün bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. İlk olarak malzemenin yüzeyinde bulunduğu ortam ile girdiği kimyasal reaksiyon sonucu bir oksit tabaka oluşmaktadır (Şekil 1.5a). Bu tabaka, diğer malzemenin hareketi esnasında yaptığı

abrazif etkiden dolayı çatlak haline dönüşmektedir (Şekil 1.5b). Bu şekilde oluşan hasar türü korozyon aşınması olarak tanımlanmaktadır.

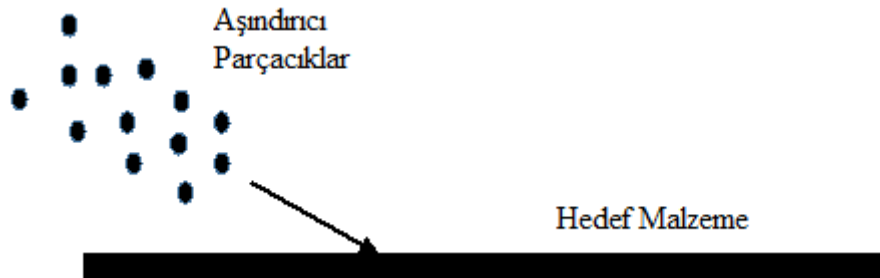


Şekil 1.5. a) Korozyon oluşumu, b) abrazyon etkisi nedeniyle oluşan korozyon aşınması

Korozyon aşınmasının meydana gelmesinde en önemli etken malzemenin çevreyle olan kimyasal etkileşimidir. Bu etkileşim yüzünden malzeme yüzeyinde bir oksit tabakası oluşur ve korozyon aşınmasının ilerlemesini başlatır. Bu sebeple malzeme yüzeyinde oluşabilecek bu oksit tabakasının oluşması engellenmesiyle korozyon aşınması önlenir. Bunun için oksidasyonu önleyici özel yağlar kullanılmalıdır.

1.2.5. Erozyon Aşınması

Bir sıvı veya gaz ortamındaki belirli bir hıza sahip katı parçacıkların bir yüzeye tekrarlı çarpmaları sonucu yüzeyde oluşturdukları hasar, erozyon aşınması olarak tanımlanmaktadır. Erozyon aşınması şematik olarak Şekil 1.6'da gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Katı parçacık erozyonu şematik gösterimi

Katı parçacık erozyonu günümüzde en çok araştırılan hasar türlerinden biridir. Bir ortamda (sıvı veya gaz) akış halinde bulunan küçük katı parçacıklar, hızlarından dolayı kinetik enerjiye sahiptirler. Bu parçacıklar, bir yüzeye çarptıklarında sahip oldukları kinetik enerji hedef malzeme yüzeyinde kırılma, çatlama, ısı artışına neden olmaktadır. Bu çarpma işlemlerinin sürekliliği hedef malzeme yüzeyinde parça kopmasına neden olmaktadır. Bu süreç katı parçacık erozyonu olarak adlandırılmaktadır.

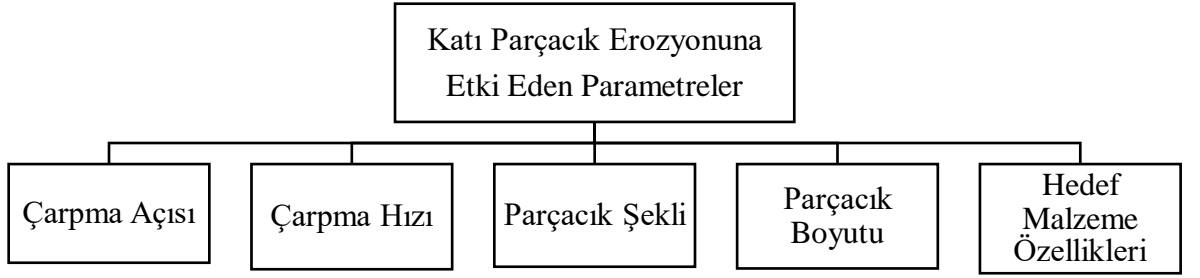
Katı parçacık erozyonu, mühendislikte bazen yararlı işler için kullanılmaktadır. Bunlara; aşındırıcı jet mikro-işleme (AJM: Abrasive Water Jet Machining) ile parça kesme işlemi ve kumlama işlemleri örnek verilebilir. Genel olarak katı parçacık erozyonunun yoğun olarak görüldüğü sistem ve parçalar Tablo 1.2' de verilmiştir (Sundararajan ve Roy, 1997).

Tablo 1.2. Katı parçacık erozyonu görülen sistemler ve parçalar (Bayındır, 2009).

SİSTEM	PARÇALAR
Kimyasal Fabrika	Hava Akışıyla Aşındırıcı Parçacık Taşıyan İletim Tüpleri
Hidrolik Maden Makinaları	Pompa ve Vanalar
İtme Mekanizmaları	Roket Motor Kuyruk Lülesi, Silah Namlusu
Yanma Sistemleri (Odaları)	Yanma Lüleleri, Isıtıcılar
Akışkan Ortamlı Yanma Odaları	Boyer Isı Değiştiricileri, Genişleme Türbinleri
Kömür Gazlaştırma İşlemi	Türbin, Kilit Hazne Valfleri
Kömür Sıvılaştırma İşlemi	Buhar Akışı Kısmı Vanaları
Uçak Motoru	Kompresör ve Türbin Kanatları
Helikopter Motoru	Rotor ve Gaz Türbin Kanatları

1.3. Katı Parçacık Erozyonuna Etki Eden Faktörler

Katı parçacık erozyonu karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu hasar türünü daha iyi anlayabilmek için, katı parçacık erozyonuna etki eden parametreler Şekil 1.7'de görülmektedir.

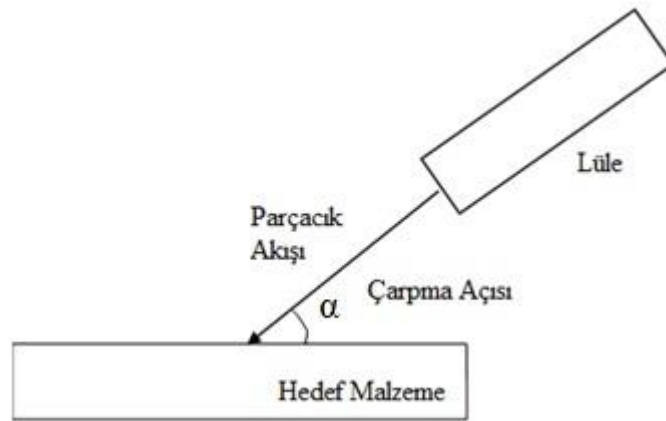


Şekil 1.7. Katı parçacık erozyonuna etki eden parametreler

Bunlara ilave olarak, katı parçacık erozyon olayının gerçekleştiği ortamın, sıcaklığı ve nemi gibi çevresel faktörler de bu olayı etkilemektedir. Bilim adamlarının, katı parçacık erozyonunun temel yapısı ve bunu etkileyen parametreler üzerindeki araştırmaları hala devam etmektedir. Katı parçacık erozyonuna etki eden parametreler ile ilgili literatür çalışması tez kapsamında incelenmiştir.

1.3.1. Çarpma Açısı

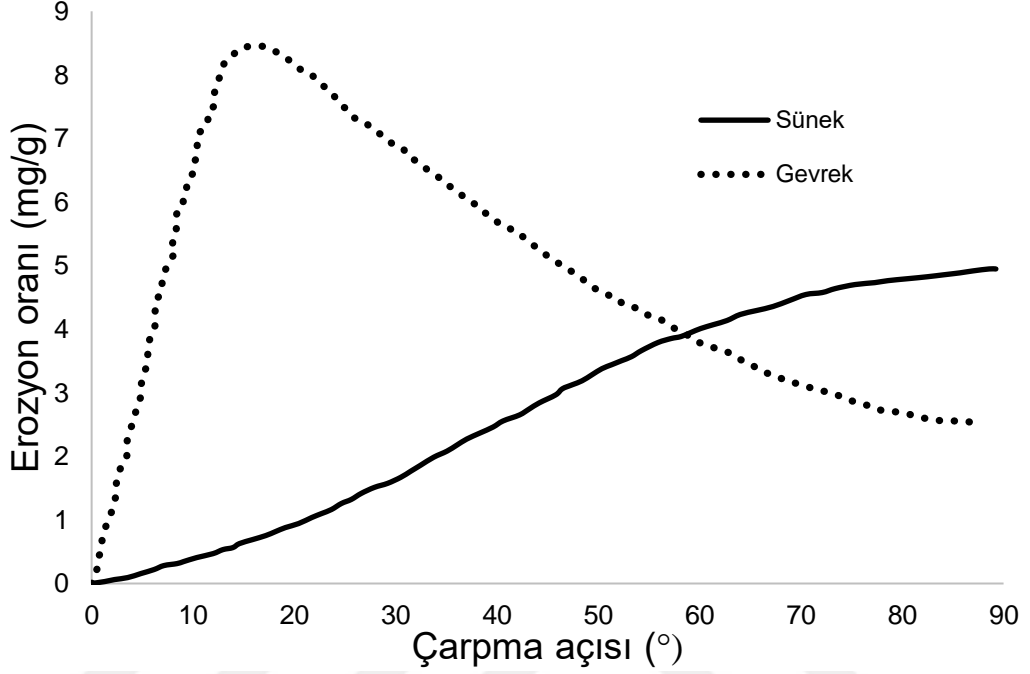
Çarpma açısı, aşındırıcı parçacıkların hedef malzeme yüzeyine çarptıkları anda, parçacıklar ile hedef yüzey arasında oluşan açı olarak tanımlanmaktadır (Nsoesie, 2013). Şekil 1.8’de çarpma açısı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Katı parçacık erozyonunda çarpma açısı

Her malzemenin, maksimum erozyona uğradıkları bir kritik çarpma açısı mevcuttur. Finnie (1958) sünek ve gevrek malzemeler üzerinde erozyon testleri yapmıştır. Bu testler

neticesinde Finnie, sünek malzemelerde maksimum erozyon miktarının $15-30^\circ$ arasında, gevrek malzemelerde ise 90° de gerçekleştiğini tespit etmiştir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Sünek/gevrek malzemelerdeki erozyon miktarının açıya göre değişimi (Finnie, 1958).

Yerramareddy ve Bahadur (1990), Ti-6Al-4V malzemesinin erozyon davranışını belirlemek için bir takım testler gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde 120 grit silikon karbür aşındırıcı parçacıkları, 55 m/s hız ile Ti-6Al-4V malzeme yüzeyine çarptırmışlardır. Testler sonucunda, bu malzemede maksimum erozyon miktarının 30° de olduğunu tespit etmişlerdir.

Zhou ve Bahadır (1995) yaptıkları bir çalışmada, maksimum erozyon miktarı olduğu açı değerinin sıcaklıkla değişimini incelemişlerdir. Ti-6Al-4V malzemesinin $25 - 800^\circ\text{C}$ arasında yedi farklı sıcaklığa hava ortamında ısıtarak ulaştırmış ve bu sıcaklık değerlerinde erozyon testleri yapmışlardır. Araştırmacılar aşındırıcı parçacık olarak 120 grit silikon karbür kullanmışlar ve bu parçacıkların hızlarını 55- 110 m/s arasında seçmişlerdir. Bu parçacıkların hedef yüzeye çarpma açılarını ise $10 - 90^\circ$ arasında belirlemişlerdir. Yapılan testler sonucunda, Ti-6Al-4V malzemesinde maksimum erozyon miktarının 30° olduğunu ve sıcaklığın artmasıyla birlikte bu açı değerindeki erozyon miktarının düzgün olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Fakat 90° 'de özellikle 650 - 800 °C arasında yapılan testlerde erozyon miktarında aşırı bir artış gözlemlemişlerdir.

1.3.2. Çarpma Hızı

Katı parçacık erozyonuna etki eden diğer önemli bir parametrede, aşındırıcı parçacıkların çarpma hızıdır. Hedef malzeme yüzeyine çarpan parçacıkların, erozyon oluşturabilmesi için belirli bir hıza sahip olmaları gerekmektedir.

Yıldırım'ın (2013) yaptığı bir çalışmada hedef malzeme yüzeyine çarpan parçacıkların hızları çok düşük olduğunda, malzeme yüzeyinde plastik deformasyona yol açmadığı tespit etmiştir. Parçacıkların çarpma hızlarının artmasıyla birlikte, hedef malzeme yüzeyinde plastik deformasyonlar oluşur. Eğer hedef malzeme gevrek davranış sergilerse, deformasyonlar malzemenin iç yüzeyinde çatlaklar meydana getirir.

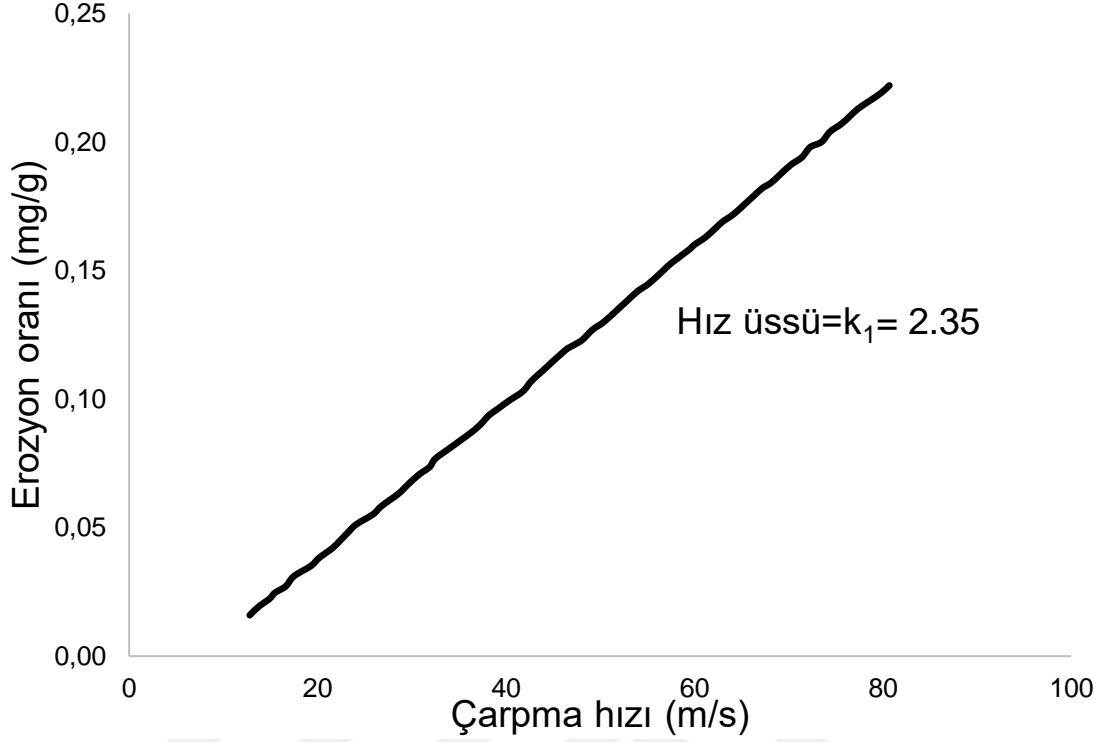
Avcu (2013) yaptığı bir çalışmada; malzeme yüzeyine çarpan parçacıkların hızlarının çok yüksek seviyelerde olmaları durumunda, Ti-6Al-4V malzemesi yüzeyinde yerel erimelere neden olduğunu tespit etmiştir. Zhou ve Bahadır (1995), Ti-6Al-4V malzemesi üzerinde yaptıkları bir çalışmada ise yüksek sıcaklıklarda çarpma hızı arttıkça erozyon miktarının arttığını tespit etmişlerdir. Harsha ve Bhaskar (2008) in demir içeren ve demir içermeyen malzemeler ile yaptıkları bir çalışmada; çarpma açısını 15-90°, çarpma hızını da 24-52 m/s arasında seçip erozyon testlerini yaparak erozyon miktarının çarpma hızının artmasıyla birlikte arttığını tespit etmişlerdir.

Finnie (1958), yaptığı çalışmalar neticesinde, erozyon oranı ile çarpma hızı arasında Denklem 1.1 deki gibi ampirik denklem türetmiştir.

$$E = C_1 V^{k_1} \quad (1.1)$$

Bu denklemde; E erozyon oranını, V çarpma hızını, C₁ sabit bir katsayıyı, k₁ ise hız üssünü ifade etmektedir.

Bir çok araştırmacı, k₁ değerlerini sünek malzemeler için 2-3, gevrek malzemeler içinse 3-5 arasında olduğunu tespit etmişlerdir (Oka vd., 1997). Finnie ve Mc Fadden (1978), AA 1100 - O alüminyum numune üzerinde SiC parçacıkları ile yaptıkları erozyon testleri neticesinde bu k₁ değerinin 2.46 – 3.16 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Yerramareddy ve Bahadır (1990) ise, Ti-6Al-4V sünek malzemesi için bu k₁ değerini 2.35 olarak tespit etmiştir (Şekil 1.10).

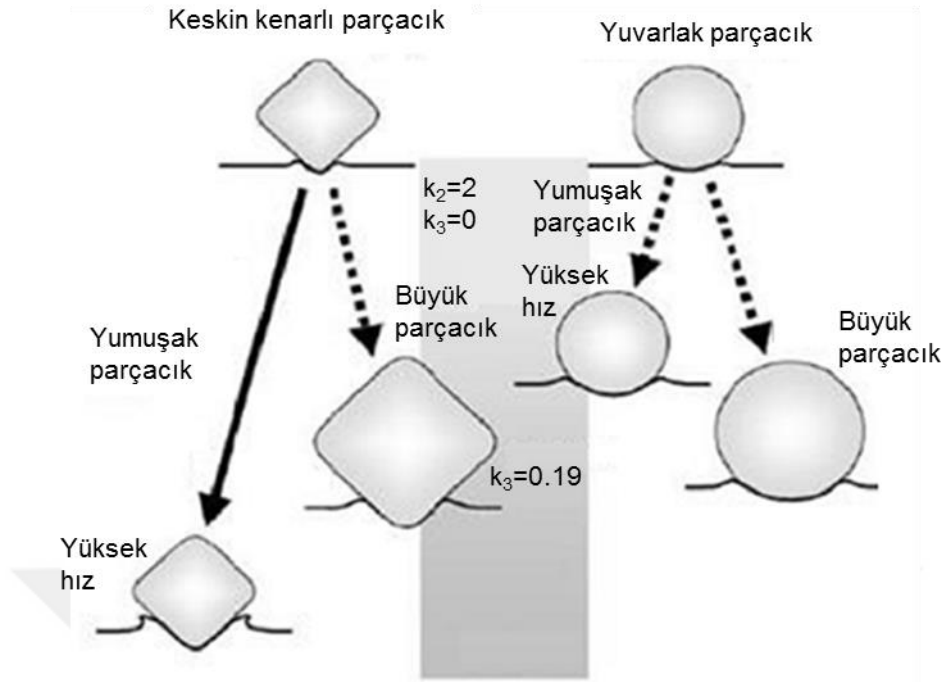


Şekil 1.10. Ti-6Al-4V malzemesi için erozyon oranının parçacık çarpma hızına göre ilişkisi (Yerramareddy ve Bahadur, 1990)

1.3.3. Parçacık Şekli

Katı parçacık erozyonunda parçacıkların şekli de önemli bir etkidir. Doğada bulunan ve erozyon aşınmasına neden olan tozlar genellikle düzgün geometrilere sahip değildirler. Parçacık geometrisinin küresel veya keskin köşeli olması, erozyon mekanizması üzerinde önemli bir değişikliğe ve erozyon miktarında önemli bir değişime neden olabilmektedir.

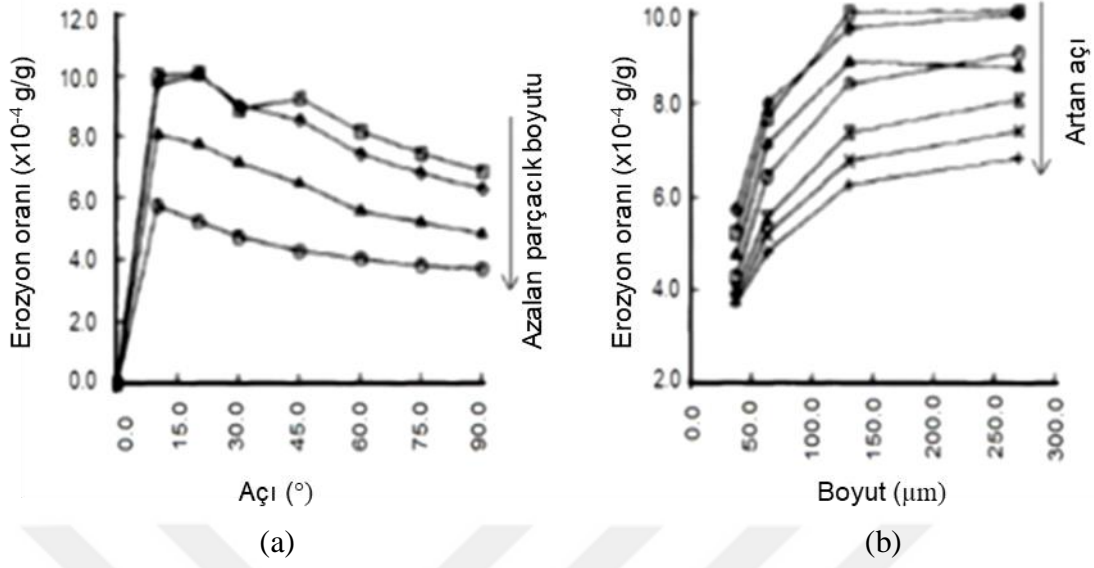
Sapate ve Rama Rao (2002), nun yaptıkları deneysel bir çalışmada 125-150 μm boyutlarındaki sert alumina parçacıklarının, 100-150 μm boyutlarında SiC parçacıklarından 1.3 kat daha fazla erozyona neden olduğunu tespit etmişlerdir. Ally (2010)' nin yaptığı bir çalışmada ise yumuşak sünek yüzeylerde, keskin parçacıkların, yuvarlak hatlara sahip parçacıklara oranla daha fazla erozyona neden olduğunu tespit etmiştir. Araştırmacı, keskin kenarlara sahip parçacıklar ile yuvarlak parçacıkların sünek yüzeylerde oluşturduğu erozyonu Şekil 1.11'de şematik olarak göstermiştir.



Şekil 1.11. Parçacık şeklinin erozyon miktarına etkisi (Ally, 2010)

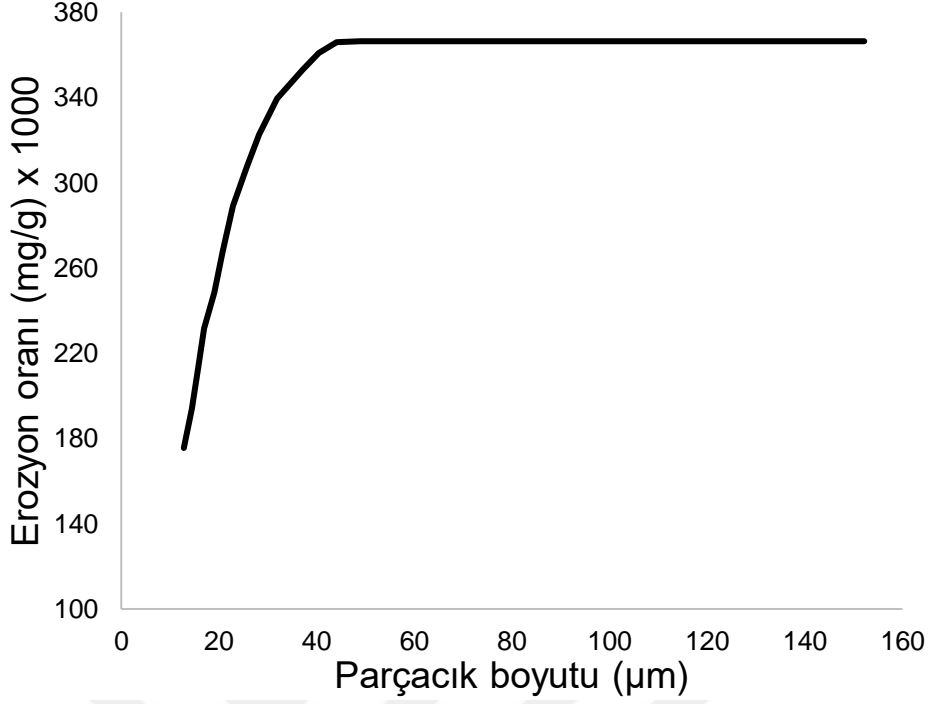
1.3.4. Parçacık Boyutu

Katı parçacık erozyon mekanizmasını incelerken, erozyona neden olan parçacıkların boyutları da incelenmelidir. Morrison ve Scattered (1986), SS 304 paslanmaz çelik malzeme yüzeyinde alümina aşındırıcı parçacıkların oluşturduğu erozyonu incelemiştir. Aşındırıcı parçacıkların boyutlarının 130 μm ye kadar artırıldığında, erozyon miktarının arttığını bu değerden sonra erozyon miktarının değişmediğini belirlemiştir (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi (a) ve erozyon oranının parçacık boyutuna göre değişimi (b), (Morrison ve Scattered, 1986)

Tabakoff ve Vittal (1983), turbo motorların rotor bıçaklarında kullanılan INCO 600 malzemesi üzerinde yaptıkları erozyon testlerinde, belirli bir parçacık boyut aralığında, parçacık boyutunun artırılması erozyon miktarını arttırdığını ve bu değer alt ve üstündeki boyutlarda erozyon miktarının çok az değiştiğini belirlemişlerdir (Yıldıran, 2013). Sundararajan ve Roy (1997) ise SS 304 paslanmaz çeliğinde, 50 μm den büyük boyutlarda erozyon miktarının değişmediğini tespit etmişlerdir. Şekil 1.13'de araştırmacıların elde ettiği, SS 304 malzemesine ait erozyon miktarının parçacık boyutuna göre değişim grafiği gösterilmektedir.



Şekil 1.13. SS 304 paslanmaz çeliğinde erozyon miktarının parçacık boyutuna göre değişimi (Sundararajan ve Roy, 1997)

1.3.5. Hedef Malzeme Özellikleri

Katı parçacık erozyonunda, aşındırıcı parçacık özellikleri kadar hedef malzemenin özellikleri de önemli bir rol oynamaktadır. Hedef malzemenin sertliği, iç yapısı vb. gibi özellikleri katı parçacık erozyon miktarının değişmesine neden olmaktadır. Yıldırım (2013), bir yüksek lisans çalışmasında hedef malzemenin süneklik-gevreklik davranışının katı parçacık erozyon mekanizmasını önemli derecede etkilediğini belirtmiştir.

1.4. Metalik Malzemelerde Katı Parçacık Erozyonu

Katı parçacık erozyonu, küçük katı parçacıkların bir malzeme yüzeyine sürekli çarpması sonucu meydana gelmektedir. Bu çarpma işleminin sürekliliği, hedef malzeme yüzeyinden parça kopmasına yol açmaktadır. Katı parçacık erozyon mekanizması kompleks bir mekanizmadır. Bu mekanizmanın anlaşılması için 20.yüzyıldan itibaren başlayan araştırmalar günümüzde de devam etmektedir.

Havacılık sektöründe ise, çöllere iniş kalkış yapan helikopterlerin gövde malzemelerinde ve rotor bıçaklarında aşırı derece katı parçacık erozyonu görülmektedir. Vietnam savaşı sırasında, Amerikan savaş uçaklarının motorları, toz parçacıklarının sebep olduğu katı parçacık erozyonu sebebiyle, 100 saatten daha kısa sürede değiştirilmek zorunda kalmış ve Amerikan Hükümeti bu savaş sırasında görev alan helikopterlerin türbinlerinin onarımı için yılda 150 milyon dolardan fazla harcama yapmak zorunda kalmıştır. Ayrıca Körfez savaşı sırasında da, çöl ortamlarına çok sayıda iniş kalkış yapmak zorunda kalan Amerikan helikopterlerinin kompresör kanatlarında, aşırı keskin küçük kum parçacıkları katı parçacık erozyonuna sebep olmuştur. Bu parçalar bakımlarından sonra 20 saat sonrasında kullanılamaz hale gelmişlerdir (Woggen, 2011).

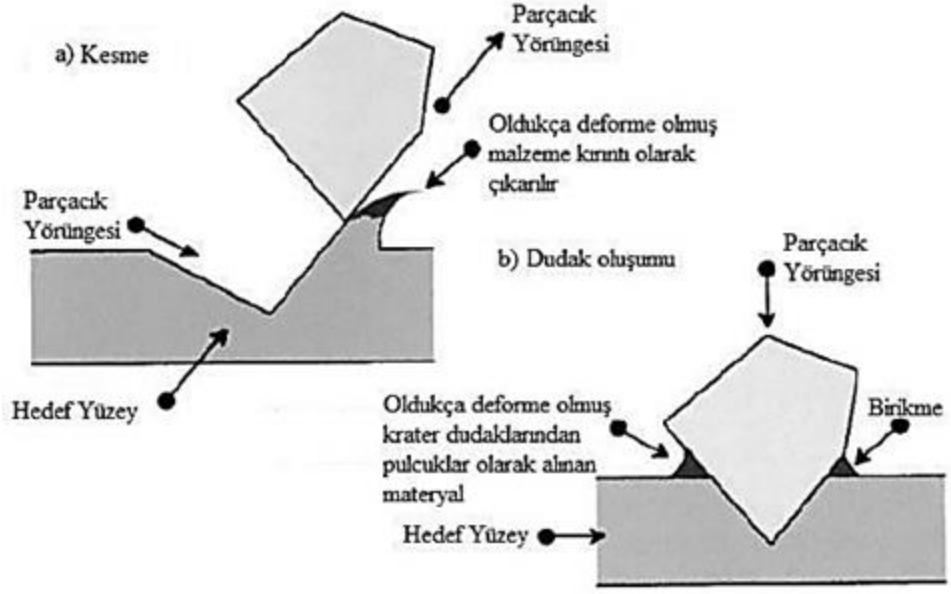
Malzemelerde oluşan erozyon miktarını belirlemede “erozyon oranı” tanımı kullanılır.

$$\text{Erozyon Oran} = \frac{\text{Hedef malzemedeki kaybedilen toplam kütle}}{\text{Hedef yüzeye çarpan katı parçacıkların kütlesi}} \quad (1.2)$$

Erozyon mekanizmasıyla ilgili yapılan araştırmalarda, hedef malzemenin sünek veya gevrek davranış göstermesi durumuna göre birbirinden farklı erozyon davranışları sergilediklerini tespit edilmiştir (Finnie, 1958) (Şekil 1.9).

1.4.1. Sünek Metallerde Katı Parçacık Erozyonu

Sünek malzeme yüzeyine çarpan katı parçacıklar, bu yüzeylerde plastik deformasyona yol açarlar. Bu plastik deformasyon, hedef malzeme yüzeyinde mikro-kazıma ve mikro-kesme şeklinde olmaktadır. Şekil 1.14’de sünek malzemelerde oluşan katı parçacık erozyonu şematik olarak gösterilmiştir.



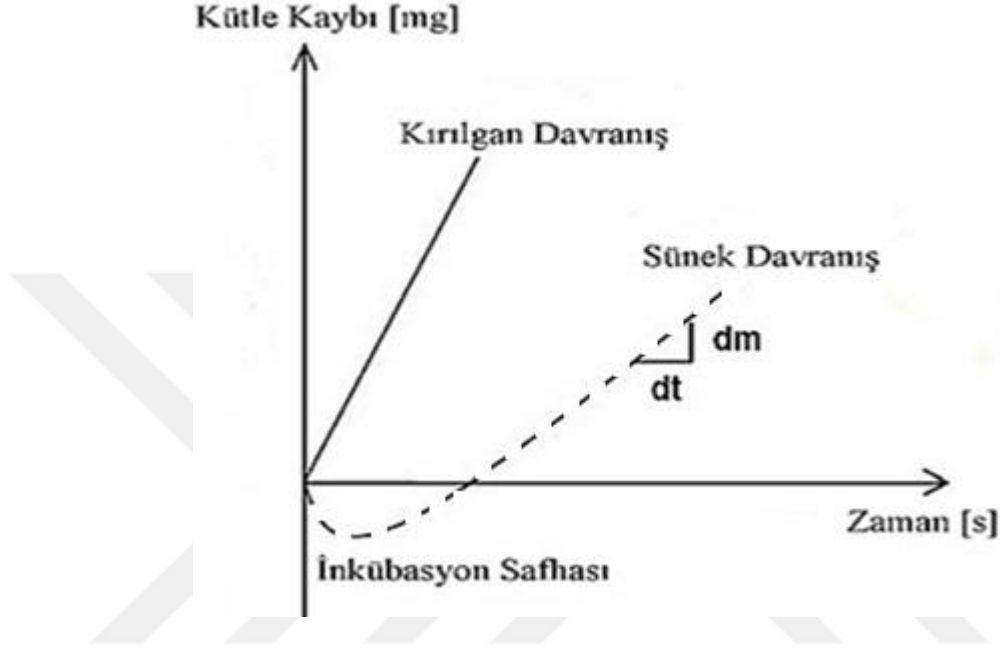
Şekil 1.14 Metallerde katı parçacık erozyonu esnasında malzeme çıkarma mekanizmaları, a) kesme ve b) deformasyon mekanizmaları (Ally, 2010)

Sünek bir malzemeye yüzeyine çarpan parçacıklar keskin uçlara sahiplerse, sahip oldukları kinetik enerjilerinden dolayı malzemeye yüzeyine saplanırlar. Bu parçacıklar eğer belli bir açıda hedef malzeme yüzeyine çarparlarsa, kazıma etkisi ile bir miktar parçayı plastik deformasyona uğratırlar (Şekil 1.14a). Çarpan parçacıklar belli bir miktar malzemeyi önünde biriktirdikten sonra hedef malzemedan ayrılırlar. Arkadan gelen diğer aşındırıcı parçacıklarda aynı plastik deformasyon sürecini devam ettirirler. Hedef yüzeyde biriken malzeme aşırı plastik deformasyona uğrayınca malzeme yüzeyinden koparlar.

Aşındırıcı parçacıklar eğer dik olarak malzeme yüzeyine çarparlarsa, keskin ucu malzeme yüzeyine batarak plastik deformasyona yol açar (Şekil 1.14b). Bu parçacıklar kinetik enerjilerinden dolayı malzeme yüzeyinde krater (çukur) oluşturlar. Krater oluşumu sırasında, aşındırıcı parçacıklar hedef malzemenin kenarlarında malzeme biriktirmesine neden olurlar. Belli bir miktar malzeme biriktirme işlemi yaptıktan parçacıklar malzemedan ayrılır. Bu işlemin diğer parçacıklar tarafından tekrarlanması sonucu plastik deformasyona uğrayan biriken malzeme numune yüzeyinden kopar. Böylece malzemedde, bir miktar kayıp oluşup, hasar meydana gelmektedir.

Bazı malzemelerde, parçacıklar yüzeye çarptıkları zaman yüzeye gömülebilir ve malzemedde bir miktar kütle artışına yol açabilir. Diğer parçacıklarında malzemeye yüzeyine çarpma proseslerinin devam etmesi neticesinde malzeme yüzeyinden parça kopmaları

oluşmakta, bu da malzemenin kütlesinde bir azalmaya yol açmaktadır. Sünek malzemelerde belirgin olarak gözlenen bu sürece “inkübasyon safhası” denilmektedir. Kırılgan davranış gösteren malzemelerde bu süreç gözlenmemektedir. Şekil 1.15’de sünek malzemelerde görülen inkübasyon safhası gösterilmektedir.



Şekil 1.15. Kütleye kaybının aşındırıcı parçacıkların toplam kütlesiyle ilişkisi (Hutchings, 1996)

Finnie (1958) sünek malzemelerde katı parçacık erozyonu ile ilgili çalışmalar yapmış ve bir analitik model oluşturmuştur (Denklem 1.1). Finnie’ nin bu ilk modeline göre, hedef malzemede mikro-kesme ile malzeme kaybı olmaktadır. Bir parçacık, farklı açılarda hedef malzeme yüzeyine çarparsa krater oluşumuna sebep olurlar. Diğer parçacıklarında yüzeye çarpmaları sonucu krater oluşumu süreci devam eder. Finnie’ nin bu modelinde önemli bir eksiklik bulunmaktaydı. Bu modelde 90° de gerçekleşen çarpmalarda malzemede erozyon kaybı oluşmamaktaydı. Finnie bu önemli eksikliği, 1960 yılında yaptığı ikinci modelinde düzeltti ve geniş bir çarpma açısı aralığında geçerli bir modeli ortaya koydu (Finnie,1960). Bitter (1963), tüm çarpma açıları için bir erozyon modeli oluşturdu. Bitter’in modeline göre erozyonda iki mekanizmanın (malzeme yüzeyine batma, kesme) aynı anda varlığı söz konusuydu. Sünek malzemeler için, düşük açılardaki çarpmalarda kesme prosesi, yüksek açılarda ise saplanma (gömülme) prosesi etken olmaktadır.

Sheldon ve Kanhere (1972) ise sünek malzemelerde tek parçacığın neden olduğu erozyon davranışını incelemiş, deformasyon ve işleme süreçlerini bir arada içeren bir model ortaya çıkarmışlardır. Araştırmacılar bu modeli, parçacıkların sahip oldukları enerji üzerine kurmuşlardır. Bu model, iki sonucu ortaya çıkarmıştır. Birincisi, erozyondaki hız üssü katsayısının (k_1), 3 olması, ikincisi ise tekli ve çoklu parçacıkların aynı erozyona neden olmasıdır. Tilly (1973), iki mekanizmalı bir erozyon modeli oluşturmuştur. Birinci mekanizma, parçacığın çarpması sonucu malzeme yüzeyine saplanması ve malzeme yüzeyinden bir parçayı koparmasını içermektedir. İkinci mekanizma ise malzemedan radyal olarak parça dağılımını içermektedir. Tilly, parçacık boyutunun azalması erozyon miktarını azaltacağını, bu yüzden belli bir minimum parçacık boyutu olması gerektiğini vurgulamıştır.

Hutching vd (1974), alüminyum malzeme yüzeyine 3 mm boyutlarında çelik parçacıkların 250 m/s hızla çarpması sonucu oluşturdukları erozyonu incelemişlerdir. Bu çarpmalar sonucu, malzeme yüzeyinde bir krater oluşmuş ve bu kraterin bitiminde dudak profili şeklinde bir malzeme yığılması oluşmuştur. Bu malzeme yığılması, parçacıkların çarpmasının devam etmesi ile parça yüzeyinden ayrılmıştır. Araştırmacılar, bu parça kopması işleminin kritik bir çarpma hızının üstünde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, sertleştirilmiş bakırın tavllanmış bakıra göre daha kolay aşındığını tespit etmişlerdir. Sertleştirilmiş malzeme yüzeyinde oluşan deformasyon kırılğan dudak formu şeklinde yoğunlaşmış halde iken, tavllanmış malzemedede ise darbe sonucu oluşan enerjinin büyük bir kısmı malzemeye dağılmaktadır. Hutching' in bir diğer çalışmasında ise küresel parçacıkların metal yüzeylerde 90° de oluşturduğu erozyon için "kritik plastik uzama (critical plastic strain)" isimli bir hasar kriterini tanımlamasıdır. Bu tanımlamada, iki malzeme dayanım özelliği olan dinamik sertlik ve sünekliliği birleştirdi ve bu malzeme özelliklerinin $k_1 = 3$ hız katsayısı için erozyon direncinin iyileştirdiğini belirtmiştir (Hutching, 1981).

Bellman vd (1981) yapmış oldukları bir araştırmada parçacıkların yüzeye çarpması sonucu girinti, kazıma, leke kraterleri şeklinde üç tip oluşumu gözlemlemiştir. Çarpma açısına bağlı olarak, bu kraterlerin oluşma sıklığı değişmektedir. Araştırmacılar, test verileri yardımıyla, erozyon sırasında malzeme yüzeyindeki yığılmalar oluştuğunu ve bunun da tekrar eden çarpmalar sonucu metal malzeme yüzeyden ayrıldığını doğrulamayı başarmışlardır. Rao ve arkadaşları ise 1983 yılında yaptıkları test çalışmalarıyla erozyon sırasındaki hacim kaybının çarpma süresiyle ilişkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, cam aşındırıcı ile yaptıkları testlerde erozyon süresi ile çukur morfolojisi (genişlik, derinlik ve

genişlik-derinlik oranı) arasında doğrudan bir bağıntı bulmuşlardır. Testler sonucunda, erozyon-zaman grafiğinde; inkübasyon, hızlanma/yavaşlama, durağan olmak üzere dört süreç belirlemişlerdir (Rao vd., 1983).

Levy (1983), gevrek ve sünek metallerin erozyon davranışları üzerinde çalışmalar yapmış ve bu çalışmalar sonucu sünek ve gevrek metallerin erozyon davranışlarının birbirinden tamamen farklı olduğunu tespit etmiştir. Levy, sünek malzemelerin erozyon davranışını, Bellman vd 1981 nin erozyon mekanizması ile benzer olduğunu belirlemiştir.

Hutching vd. (1986) yaptıkları bir çalışmada yüksek hızlı çarpma sırasında, malzeme yüzeyinde meydana gelen ısı artışının, çarpma bölgesi yakınlarında yumuşamaya neden olduğunu tespit etmişlerdir. Isıl işlem görmüş bu yüzeye çarpan parçacıklar malzemede üzerinde bir örs etkisi göstermişlerdir. Test sonuçlarına göre erozyon mekanizmasında ısıl olarak yumuşatılmış yüzeylerin önemli bir gereksinim olmadığını tespit ettiler. Shimizu vd. (1994) menevişlenmiş demir (ADI), ferritik demir (FDI) ve perlitik demir malzemeler üzerinde yaptıkları erozyon çalışmaları sonucunda menevişlenmiş demirde mükemmel bir erozyon dayanımı tespit etmişlerdir.

Levy (1995) yapmış olduğu tüm deneysel ve teorik sonuçları bu konuda yapılan diğer teorilerle bir kitap içinde ilişkilendirmek için çalışmalar yapmıştır. Levy, sünek metallerde erozyon davranışını, malzeme yığılması ve krater oluşumuna neden olan bir takım işlemler olarak açıklamıştır. Levy'e göre ilk olarak aşındırıcı parçacıklar malzeme yığılmasına neden olmakta fakat bu süreçte malzeme kaybı oluşmamaktadır. Çarpma bölgelerinde oluşan adyabatik ısı, yüzeyde ısıl işlem görmüş bölge oluşumuna neden olurken yüzeye çarpan parçacıklar ise bu bölgede dövme işlemine neden olur.

Bayındır (2009)'ın yapmış olduğu bir çalışmada alüminyum alaşımlarının erozyon davranışları incelemiştir. Bu çalışmada, 1050, 3003, 5754, 6061 ve 7075 alüminyum alaşımları üzerinde erozyon testlerini gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı parçacık olarak 200 ve 400 µm boyutlarında Al₂O₃ ile 400 µm boyutunda çelik aşındırıcı parçacıkları kullanmıştır. Testler 30 m/s parçacık çarpma hızı ve 30, 45, 60° üç farklı çarpma açısında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, katı parçacık aşınmasında çarpma açısı, malzeme cinsi ve aşındırıcı parçacık boyutunun ve miktarının etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda çelik parçacığın Al₂O₃ parçacıklarına göre daha fazla erozyon oluşturduğu, aşındırıcı parçacık boyutunun artırılmasıyla erozyon oranını arttırdığını tespit etmiştir. Kullanılan numuneler arasında en fazla erozyon miktarı 1050 alüminyum alaşımında ve 30° çarpma açısında elde edildiğini belirlemiştir.

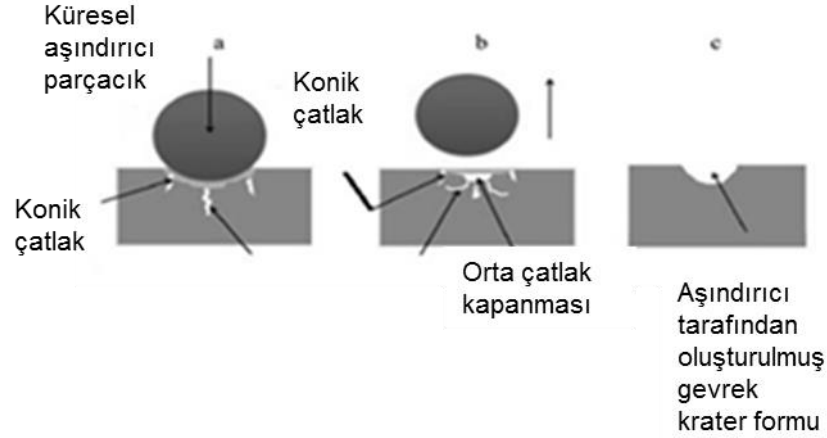
Ally (2010) ise bir çalışmasında, AA 6061, Ti-6Al-4V ve 316 paslanmaz çelik malzemelerinin erozyon davranışlarını inceleyip birbirleriyle kıyaslamıştır. Aşındırıcı parçacık olarak 50 µm boyutunda Al₂O₃ kullanmış, parçacıkların çarpma açılarını ise 30, 45, 60 ve 90° olarak belirlemiştir. Yaptığı testler sonucunda tüm malzemeler için elde ettiği erozyon oranlarını bir grafikte birleştirmiş ve bu malzemelerin erozyon davranışlarını karşılaştırmıştır. Ally, yaptığı çalışma sonucunda en fazla erozyonun 316 paslanmaz çelikte en az aşınmanın da Al6061’de olduğunu tespit etmiştir.

Yıldırım (2013), yapmış olduğu bir çalışmada 3003 H14 alüminyum alaşımının katı parçacık erozyon davranışını incelemiştir. Araştırmacı, testlerini 15, 30, 45 ve 60° çarpma açılarında gerçekleştirmiş ve aşındırıcı parçacık olarak 80 ve 180 grid boyutlarında garnet minerali kullanmıştır. Testlerde toz parçacıklarını iten havanın basıncını, 1.5, 3 ve 4 bar olarak ayarlamıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda Yıldırım, 15° çarpma açısı ve 4 bar basınçta maksimum erozyon miktarını elde etmiştir. Testler sonrasında aşınmış numunelerin yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelemiştir. Bu incelemelerde 15° ve 30° çarpma açılarında numune yüzeylerinde mikro-kazıma ve mikro-kesme şeklindeki erozyon mekanizmaları ile 45 ve 60° çarpma açılarında ise derin çukurlar gözlemlemiştir.

Avcu (2013)’ nun yapmış olduğu bir doktora çalışmasında titanyum alaşımlarının katı parçacık erozyonu incelenmiştir. Bu sebeple, Ti-6Al-4V malzemesi için erozyon testlerini değişik basınç değerlerinde (1.5, 3 ve 4 bar) ve değişik çarpma açılarında (30, 60, 90°) gerçekleştirmiştir. Testler sonucunda aşınmış numunelerin yüzey morfolojisini ve pürüzlülük değerlerini incelemiştir. Elde ettiği bu değerler yardımıyla Ti-6Al-4V malzemesinin erozyon davranışını için özgün bir görüntü analiz yöntemi geliştirmiştir.

1.4.2. Gevrek Malzemelerde Katı Parçacık Erozyonu

Gevrek malzemelerde erozyon mekanizması çatlak formu şeklinde olmaktadır. Aşındırıcı parçacıklar, gevrek bir malzeme yüzeyine çarptığı zaman, yatay ve dikey çatlaklara, çarpmaların devam etmesi durumunda çatlağın büyümesine neden olur. Malzemedeki yatay ve dikey çatlaklar, yüzeyde küçük parçacıklar şeklinde dağılırlar. Malzeme yüzeyinde dağılan bu parçalar ve diğer aşındırıcı parçacıkların çarpması ile birleşerek yüzeyde erozyon oluştururlar. Gevrek malzemelerde oluşan katı parçacık erozyonu mekanizması Şekil 1.16’da gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Gevrek malzeme erozyon mekanizması: a) konik ve orta çatlağın oluşumu, b) orta çatlağın kapanarak yatay çatlakların oluşumu (Najafifard, 2014).

Yapılan çalışmalar sonucu, sünek malzemelerin aksine, gevrek malzemelerde maksimum erozyon miktarının 90° deki çarpma açısında olduğu tespit edilmiştir (Finnie, 1958; Wada ve Wantanabe, 1987). Finnie (1960), elastik bir küreyi çeşitli hızlarda cam malzeme üzerinde erozyon testleri yapmıştır. Hedef malzemenin elastisite modülü ve poisson oranının etkisi ile aşındırıcı parçacığın yoğunluğu, hızı, poisson oranı ve elastisite modülünü içeren maksimum radyal gerilme denklemlerini ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada Finnie, maksimum çekme gerilmesinin yüzeyde çarpma bölgesi çevresinde radyal yönde meydana geldiğini göstermiştir. İlave olarak gevrek malzemede darbenin, bir halka çatlağı oluşturduğunu belirlemiştir.

Sheldon vd (1966) ise çarpma sırasında meydana gelen Hertz temas gerilmeleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma neticesinde gevrek malzemelerde oluşan erozyonun bu temas gerilmelerinden dolayı gerçekleştiğini varsaydılar. Araştırmacılar sürekli bir düzlemde klasik bir küre ile çarpma koşullarını içeren Hertz denklemlerini genişletmiş ve erozyonun bir temas gerilmesi sonucunda meydana geldiğini kabul etmiştir. Erozyon esnasındaki malzeme kaybının, parçacığın yarıçapı ve çarpma hızının bir fonksiyonu olduğunu ifade etmişlerdir.

Hockey vd (1978), magnezyum oksit ve alüminyum oksit malzemelerinde çarpma bölgesinde oluşan kraterlerinin altında dislokasyon yapılarının gözlemlenmesi için elektron mikroskopu kullanmışlardır. Parçacıkların çarptıkları bölgenin altında bası gerilmeleri

nedeniyle meydana gelen plastik deformasyona rastlamışlardır. Ayrıca tüm durumlarda yüksek dislokasyon yoğunluğu tespit etmişlerdir.

Evans vd (1978) ise, tekli parçacık çarpması sürecinde oluşan çatlak oluşumunu test verilerini dikkate alarak açıklamaya çalıştılar. Çarpan parçacıklar tarafından oluşturulan plastik dalgaların yanı sıra elastik etkilerini de içeren bir erozyon modeli ortaya çıkarmışlardır. Wiederhorn vd (1979), Evans vd. (1978) nin erozyon modelinde bulunan dinamik etkileri ihmal ederek yeni bir model oluşturdular. Bu modelde yanal çatlak boyutunun radyal çatlak boyutuyla orantılı olduğu ve yanal çatlakların derinliğinin maksimum parçacık penetrasyonu ile orantılı olduğu varsaymışlardır. Parçacık penetrasyon derinliğini, çarpan parçacıkların yaptığı iş ile kinetik enerjilerine eşitleyerek yeni bir erozyon modeli oluşturmuşlardır.

Mehrothra vd (1980) nin, daha sonraki yıllarda yaptıkları çalışmada; başlangıçtaki konik çatlakların etkileşimi ile parçalanmanın başladığı ve bunun ardından malzeme kaybı işleminin gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Zembelli vd (1981), yüksek sıcaklıkta oluşan NiO (Nikel oksit) malzemelerinin, sütunlu bir dış tabaka ile ince taneli bir iç tabakaları olmak üzere iki farklı tabakaya sahip olduklarını ve bu tabakaların farklı erozyon mekanizması ve erozyon oranına sahip olduklarının tespit etmişlerdir. Bu araştırmacılar, çatlak ilerlemesi kavramlarını kullanarak iki aşamalı erozyon mekanizmasını önermişlerdir. Bu mekanizmalardan birincisi, dış tabakada plastik akma girintisi ve yanal çatlak büyümesi oluşumu, ardından iç kısımdaki çukur oluşumu şeklindedir. Wada ve Wantanabe (1987) nin yapmış oldukları bir çalışmada, 80° darbe açısında kırılğan materyaller üzerine çarpan parçacıkların sertliğinin hedef malzemedен daha sert olduğu zaman, erozyon miktarını arttırdığını tespit etmişlerdir.

1.5. Katı Parçacık Erozyon Aşınmasının Sayısal Modellemesi

Katı parçacıkların oluşturdukları erozyon miktarı, çarpma açısı, çarpma hızı, parçacıkların şekli ve malzeme cinsi gibi değişkenlere bağlıdır. Bu etkilerin olası sonuçları hakkında birçok analitik, deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Araştırmacılar, bu çalışmalarla birlikte çarpma prosesi hakkında bilgi sahibi olmak hedeflemişlerdir.

Katı parçacık erozyonu hakkında yapılan bu deneysel ve analitik çalışmalar aşırı işgücü ve zaman kaybına neden olmaktadır. Katı parçacık analizinde kullanılan analitik modeller ve denklemler genellikle deneysel sabitler içermektedirler. Ayrıca tüm malzemeler

ve erozyon parametreleri için genelleştirilememektedir. Bu sebeple 1990'lı yıllarından itibaren, malzemelerin erozyon davranışı incelemek için sayısal yöntemler kullanılmaya başlanmıştır (Liu vd, 2014; Wang ve Yang, 2009; Takaffoli ve Papini, 2009; El Tobgy vd, 2005; Griffin vd, 2004).

Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak son yıllarda erozyon aşınmasının sayısal modellenmesi ve simülasyonları üzerine yoğun ilgi oluşmuştur. Bu çalışmalar sayısal araçların ve çözüm mekanizmalarının gelişmesine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Erozyon aşınmasının ilk sayısal modelleri, sonlu elemanlar yöntemi üzerine temellenirken, zamanla SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), DEM (Discrete Element Method) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği gibi ağ bağımsız teknikler üzerine evrilmiştir.

1.5.1. Katı Cisimler Mekanik Yöntemiyle Modelleme

Malzemelerin katı parçacık erozyon aşınma davranışları genellikle deneysel olarak çalışılmıştır. Fakat 1990'lı yıllardan sonra sayısal yöntemlerle erozyon aşınmasının incelenmesi ile ilgili çalışmalar başlamıştır. Katı parçacık erozyonunun sayısal olarak modellenmesinde birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmalarda katı parçacık erozyonuna etki eden parametreler sistematik olarak incelenmiştir. Katı parçacık modelleri genelde çoklu çarpma analizleri içerdiğinden zaman alıcı olmaktadır. Bu sebeple çok yoğun sayıda parça çarpma analizleri için uygun olmamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin bu yetersizliklerinden dolayı, genelde limitli sayıda parça çarpma sonuçlarıyla test sonuçlarına karşılaştırma yoluna gidilmektedir.

Li vd, (1999) oluşturdukları iki boyutlu (2D) sayısal modelde alüminyum malzeme üzerinde çarpan alüminyum parçacıklarla, hedef malzemenin deformasyon davranışını Arbitrary Lagrangian Eularian (ALE) metodu ile incelemişlerdir. Shimuzu vd (2001) yaptıkları bir çalışmada düşük karbonlu çelik malzeme meydana gelen malzeme kaybı prosesini temsil etmesi amacıyla tekli katı parçacık çarpması içeren bir sayısal model kurmuştur.

İki boyutlu sayısal modellerde daha düzgün ağ yapısı ve düşük işlem zamanı avantajları olmasına rağmen bu modeller erozyon davranışı tam olarak simüle edememektedir. Bu nedenle analizlerin her ikisinde de düzlemsel gerilme varsayımı ile modeller oluşturulmuş ve erozyon bazı değişkenler üzerinden incelenmesine rağmen,

belirtilen bu değişkenler ve erozyon parametresi arasında doğrudan bir ilişki kurulamamıştır. Düzlem gerilme yaklaşımının bu tarz problemlere uygulanması basit olmasına rağmen bu uygulama erozyonu doğru bir şekilde ifade eden bir yaklaşım olmadığı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, bu analizlerden elde edilen kütle kaybı veya erozyon oranları gerçek erozyon verileri ile uyuşmamaktadır. Bu sebeple iki boyutlu (2D) modellemeler daha iyi ağ bağımlı ve daha az hesaplama süreci içermesi bakımında avantajlı bir yöntem olması için düzlem gerilme, düzlem şekil değiştirme ve aksenal simetrik model varsayımları gibi kabullerin yapılması gerekmektedir. Bunun sonucu olarak, çoklu çarpmaların oluşturduğu hasarın etkileri tam olarak temsil edilememiş ve çarpma sonucu oluşan hasar bölgesi gerçek hasar bölgesi ile örtüşmemiştir. Bu sebeple, üç boyutlu (3D) sonlu eleman modellemelerinin kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Alman vd, (1999) hem sünek hem de gevrek malzemelerin erozyon aşınma davranışları üzerine sayısal çalışmalar gerçekleştirmiş ve çarpma açısının erozyon oranı değeri için önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca sünek malzemelerin yaklaşık 20°- 40°'lik çarpma açılarında, gevrek malzemelerin ise 90° civarında maksimum erozyon oranı değerine ulaştığını göstermiştir. Diğer bir çalışmada, Woytowitz ve Richman (1999) çarpma bölgesi için rastgele sayıda elde edilen parçacıklar ile rastgele çarpma analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada DYNA-3D programı yardımıyla bakır hedef malzemeye çarpan küresel parçacıkların etkisini ele almışlardır. Çalışmada oluşturulan model herhangi bir malzeme hasar modeli ve kütle kaybı tahmini içermemekteydi.

Griffin vd, (2004), beş adet küresel alümina parçacıklarının sünek malzeme üzerine çarpıtılmasını içeren üç boyutlu dinamik analizler gerçekleştirmiştir. Bu sayısal model yardımıyla hedef malzemedeki kütle kaybının, aşındırıcı malzemenin kütle debisi ve çarpma açısının bir fonksiyonu olarak meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, bu modelde düşük hızlarda malzeme kaybı değerlendirilmesi için tek parça çarpmasının yeterli olmayacağı ve en az 3 farklı parçacık çarpma etkisinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir.

El Tobgy vd, (2005), Ti-6Al-4V alaşımındaki katı parçacık erozyonu için dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Bu analizler yardımıyla elde ettikleri sonuçları analitik modellerden elde edilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Çalışmada Abaqus/Explicit ticari yazılımı kullanılmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda erozyon hasarı ve modeli için tekli çarpmanın yetersiz olduğunu bildirmişlerdir. Yine Ti-6Al-4V malzemesinin katı parçacık erozyonunun sayısal modellemesiyle ilgili diğer bir çalışma Wang ve Yang (2008) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar bu çalışmada, sırasıyla sünek ve gevrek malzeme

davranışını incelemek istemişlerdir. Bunun için 120µm boyutundaki silikon karpit parçacıklarının Ti-6Al-4V ve SiC (Silisyum Karbür) malzemelerine çarpmaları sonucu oluşturduğu erozyonu modellemeye çalışmışlardır. Oluşturdukları modelde her bir sette 10 parçacık olacak şekilde, toplam 100 adet parçacığın çarpmasını modellemişlerdir. Bu çalışma sonucunda hem sünek (Ti-6Al-4V) hem de gevrek (SiC) hedef yüzeylerdeki hasar tipi ve erozyon nedeniyle meydana gelen kütle kaybının partikül çarpma açılarıyla ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Takaffoli ve Papini (2009), tekli açıl çarpma modellemesini yaparak, parçacık şeklinin erozyon miktarına etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar ilk önce kurdukları erozyon düzeneği ile açıl parçacıkların yüksek iletkenliğe sahip bakır malzeme yüzeyine çarpmasını test etmişlerdir. Aynı araştırmacılar çalışmanın ikinci aşamasında testin sayısal modellemesi yapmışlardır. Bu çalışmada araştırmacılar Ls-Dyna ticari paket yazılım kullanmışlardır. Sayısal modellemede oluşan krater derinlikleri ile deneyler sonucunda elde edilen krater derinliği karşılaştırmışlar ve sonuçlarının birbirleriyle uyduğunu tespit etmişlerdir.

Liu vd, (2014) yaptıkları sayısal çalışmada parçacık şeklinin sünek malzeme yüzeyinde oluşturdukları katı parçacık erozyonuna etkisini incelemek istemişlerdir. Aşındırıcı parçacıkları; kübik, küresel, on yüzlü ve yirmi yüzlü şekillerinde modellemişlerdir. Araştırmacıların sayısal modellerinde aşındırıcı parçacık olarak SiC (Silisyum Karbür) ve hedef malzeme olarak ise Ti-6Al-4V malzemesini kullanmışlardır. Bir çok katı parçacık erozyonu modelinin aksine Hadavi vd, (2016), aşındırıcı parçacıkları rijit olarak modellemek yerine parçacıkların kırılmasının ve parçalanmasının etkilerini incelemek istemiştir. Bu sebeple parçacıklarda da hasar parametrelerini içeren bir sayısal model oluşturmuşlardır. Gerçekleştirilen analizler sonrasında parçacıkların sahip olduğu enerjinin yüzeye çarpmasından önceki ve sonraki dağılımı daha detaylı olarak inceleyebilmişlerdir. Böylece erozyon aşınmasının daha doğru bir şekilde modellenmesi sağlanmış ve aynı zamanda aşınma mekanizmasını etkileyen aşındırıcı boyutu, çarpma hızı, çarpma açısı gibi parametrelerin yanında parçacıkların kırılması ve geri yansıma kinematığının erozyon aşınması davranışı üzerine etkilerinin olduğu göstermişlerdir.

Ağ bağımsız yöntemler, ağ bağımlı yöntemlere göre daha uzun çözüm zamanı içermektedir. Bu sebeple daha yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duymaktadır. Çözüm zamanının kısalması için araştırmacılar, son zamanlarda ağ bağımlı ve ağ bağımsız yöntemleri beraber kullanmakta ve bu şekilde çözüm zamanında tasarruf etmektedir. Bu

konuda bir çalışma yapan Wang ve Yang'ın (2009), çarpma bölgesinde daha hassas hesaplama için SPH yöntemini, hasarın daha önemsiz olduğu diğer bölgelerde ise ağ bağımlılı yöntemi bir arada kullanmışlardır. Bu şekilde çözüm sürecini kısaltmışlardır. Bu çalışmada araştırmacılar, Ti-6Al-4V malzeme yüzeyine 500 µm boyutundaki 5 adet küresel parçanın ard arda çarpması sonucu malzeme yüzeyinde oluşan erozyonu araştırmışlardır. Bu çalışmada ANSYS/Ls-Dyna ticari paket yazılımı kullanılmışlardır. Bu çalışmada çarpma açılarını 15-90° arasında almışken aşındırıcı parçacıkların hızlarını, 60 -105 m/s arasında 15 m/s'lik artışlarla almışlardır. Araştırmacılar yaptıkları sayısal model ile Bitter ve Coupling modeli ile örtüşen erozyon oranlarını elde etmişlerdir. Li vd. (2010) yapmış oldukları bir çalışmada, 500 m/s çarpma hızına sahip bakır aşındırıcı parçacıkların, yine bakır numune yüzeyinde oluşturduğu katı parçacık erozyonunu modellemişlerdir. Çalışmada, araştırmacılar hem sonlu elemanlar hem de SPH metoduyla katı parçacık erozyonunu ayrı ayrı modellemişler ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

1.5.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Modelleme

Katı parçacık erozyonunun sayısal modellemesinde, katı cisimler mekaniği yönteminin yanı sıra hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden de yararlanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, akış ortamında karmaşık geometriye sahip parçalarda erozyonun hesaplanmasında son yıllarda güçlü bir araç olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar teknolojisinin hızla gelişimiyle birlikte; otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılan aşınma kalkanlarındaki erozyon hasarının belirlenmesi hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları kullanılarak yapılabilmektedir. Özellikle akış-parçacık etkileşimli mikro boyuttaki gerçek ortamın erozyon davranışı, akış/ayırık faz yöntemiyle birlikte kullanılan erozyon modelleriyle belirlenmeye çalışılmaktadır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak yapılan bazı çalışmalarda araştırmacılar, akışkan içerisindeki kum gibi katı parçacıkların boru dirseklerinde meydana getirdiği erozyon hasarını simüle etmişlerdir. Bu yöntem ile modelleme çalışmalarında STAR CCM+, ANSYS Fluent ve ANSYS CFX gibi paket programlar kullanılmakta ve bu paket programlar sürekli olarak geliştirilmektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde, değişik şartlarla ve farklı hassasiyetli geometrilerle çalışılması durumunda akış alanının en iyi şekilde hesaplanması için uygun bir türbülans modeli seçmek önemlidir. Uygun bir türbülans modelinin seçilmesi de ilgili

geometrideki akış karakteristiklerinin iyi bir şekilde anlaşılmasını gerektirir. Bunun yanı sıra hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde sonuçların hassasiyeti bakımından yapılan modele uygun bir ağ örgüsünün oluşturulması önemlidir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada; Shin (2010), ticari ANSYS Fluent paket programı kullanarak değişik çalışma şartları için bir helikopter palinin yüzeyindeki erozyonu belirlemek için iki ve üç boyutlu sayısal analizler yapmıştır. Simülasyonlar için en uygun olan türbülans modelini belirlemek için kum parçacıklarının olmadığı hava şartlarında helikopter pali etrafındaki hava akışını değişik türbülans modelleri kullanarak analizler yapmış ve k- ω SST türbülans modeli kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarının test sonuçlarıyla yüksek derecede uyum içerisinde olduğunu tespit etmiştir. Shin, katı parçacıkların olduğu hava şartlarında helikopter pali yüzeyindeki erozyon miktarını hesaplamak için kullanıcı tanımlı bir kod yazmıştır. Daha sonra bu kodu ANSYS Fluent ticari paket yazılımının kütüphanesine ekletmiştir. Araştırmacı simülasyonun da elde ettiği sonuçlara dayanarak, helikopter kanadı yüzeyindeki erozyon miktarının palin dönme hızına, açı durumuna ve uzunluğuna bağlı olarak değiştiğini ifade etmiştir.

Azimian ve Hans (2013) ise içerisinde su-kum karışımı içeren bir tankta St-50 malzemesinden yapılmış aşınma kalkanının dönme hareketi yapması sonucu kalkanın yüzeyinde oluşan erozyon oranını belirlemek için deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmalar için sonlu hacimler metodunu kullanan ticari ANSYS CFX paket programı kullanmışlardır. Yapılan sayısal çalışmalardan elde etmiş oldukları sonuçların aynı zamanda test sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğunu görmüşlerdir. Araştırmacılar, sayısal çalışmalarda akış alanında meydana gelen hesaplamaların doğru bir şekilde yapılması için seçilecek türbülans modeline dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Nguyen vd (2014), uzay sanayiinde kullanılan bir aşınma kalkanında yüksek hızlı (Mach sayısı > 3) hava akışlarında oluşan katı parçacık erozyon oranının çarpma açısına göre değişimini belirlemeye çalışmışlardır. Araştırmacılar, çarpma açısının 0° den 40° ye kadar arttırıldığında katı parçacık erozyon oranının arttığını, 40° daha büyük açılarda ise azaldığını tespit etmişlerdir. Maksimum katı parçacık erozyon oranının 40° çarpma açısında meydana geldiğini hem deneysel hem de sayısal çalışmalarda tespit etmişlerdir.

Kim vd (2015) nin yapmış oldukları başka bir çalışmada; WC-Ni kaplama malzemesi ile kaplanmış bir aşınma kalkanı üzerinde oluşan erozyon oranını belirlemek için deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmalar sonlu hacimler metodunu kullanan ANSYS CFX ticari paket programında yapılmıştır. Hava ortamında meydana gelen

akışı modellemek için $k-\varepsilon$, SST türbülans modelini ve aşınma kalkanı üzerinde oluşan katı parçacık erozyon oranını hesaplamak için Finnie erozyon modelini kullanmışlardır. Sayısal çalışmalardan elde etmiş oldukları erozyon oranı sonuçlarını deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmışlar ve SST türbülans modeli kullanarak elde etmiş oldukları sonuçların deneysel çalışma sonuçlarıyla daha iyi derecede uyum içerisinde olduğunu tespit etmişlerdir.

1.6. Tezin Konusu ve Amacı

Bu çalışmada AISI 1020, AA 6061, SS 304, Ti-6Al-4V, Hardox 450, DP 600 gibi metalik malzemelerin katı parçacık erozyon davranışının deneysel ve sayısal olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda katı parçacık erozyon deneyleri iki aşamada gerçekleştirilecektir. Birinci aşamada; malzemelerin katı parçacık erozyonu davranışının çarpma açısına göre değişimi incelenecektir. Bunun için sabit bir çarpma hızında (100 m/s) ve değişik çarpma açılarında (20, 30, 45, 60, 90°) erozyon testleri yapılacaktır. İkinci aşamadaki ise erozyon testleri sabit 90° çarpma açısında ve değişik çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210 ve 250 m/s) gerçekleştirilecektir. Böylece yukarıda ifade edilen metalik malzemelerin farklı çarpma hızı ve çarpma açısındaki erozyon performanslarının, erozyon kayıpları ve/veya hacimsel değişimlerinin, belirlenmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilecek testler her bir malzeme için en az iki tekrarlı olarak yapılacaktır.

Çalışmanın sayısal kısmında ise erozyonun modellenmesinde katı cisimler mekaniğini ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılacaktır. İlk olarak erozyon analizleri, katı cisimler mekaniği yöntemine göre işleyen ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan Ls-Dyna ticari paket programında gerçekleştirilecektir. Diğer sayısal yaklaşım ise hesaplamalı akışkanlar mekaniği (HAD) olup erozyon analizleri ANSYS Fluent ticari paket programında yapılacaktır.

Çalışmanın amacı literatürden farklı olarak; AISI 1020, AA 6061, SS 304, Ti-6Al-4V, Hardox 450, DP 600 gibi farklı türden metalik malzemelerin yüksek hızlardaki katı parçacık erozyon davranışının deneysel ve sayısal olarak belirlemektir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında AISI 1020, AA 6061, Ti-6Al-4V, SS 304, Hardox 450, DP 600 metalik malzemelerinin katı parçacık erozyon davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Test bölümünde, bu altı farklı malzemenin erozyon davranışlarının çarpma açısına ve çarpma hızına göre değişimi incelenmiştir. İlk olarak 100 m/s çarpma hızı için farklı çarpma açılarında (20, 30, 45, 60, 90°) erozyon testleri yapılmıştır. İkinci kısımda ise 90° çarpma açısında, değişik çarpma hızlarındaki (100, 127, 170, 210, 250 m/s) erozyon testleri her bir malzeme için ayrı ayrı yapılmıştır. Her test en az iki defa tekrarlanarak bu ölçümler arasındaki hata oranları belirlenmiştir.

Sayısal kısımda ise, elde edilen test verilerinin doğruluğu için öncelikli olarak katı cisimler mekaniği yöntemi kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuş ve test verileriyle karşılaştırılmıştır. Katı cisimler mekaniğinde sonlu elemanlar yöntemini kullanan Ls-Dyna ticari paket programı kullanılmışken, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminde ANSYS Fluent ticari paket programı kullanılmıştır.

2.1. Test Çalışmaları

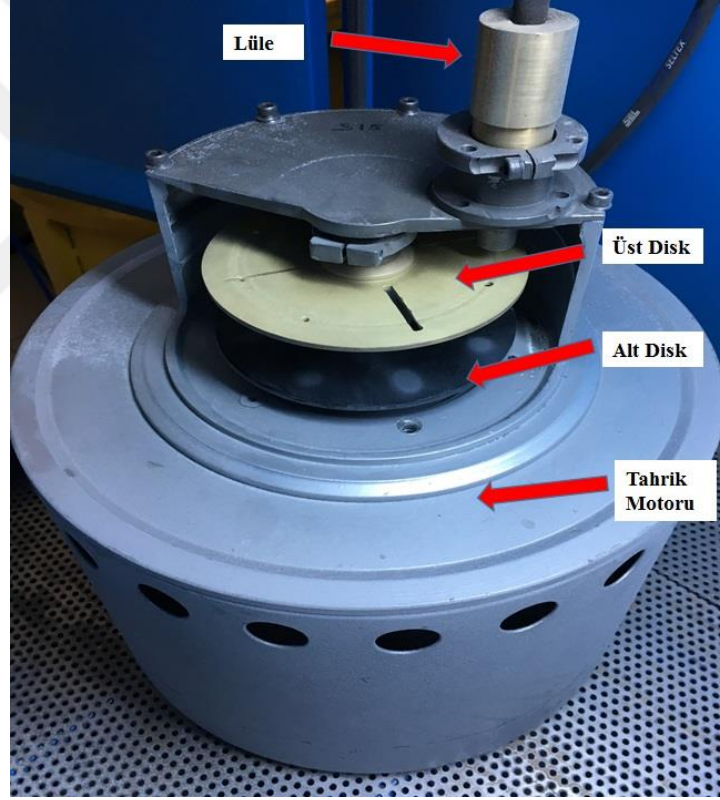
Testler, bölümümüz mekanik anabilim dalı öğretim üyeleri tarafından tasarlanan ASTM-G76, ASTM-F1864 ve MIL-STD-3033 standartlarına uygun testlerin gerçekleştirilebildiği erozyon test düzeneği ile yapılmıştır. İstenilen standartlarda belirtilen lüle ve toz tipi kullanılarak bu testlerin yapılması mümkündür.

2.1.1. Aşındırıcı Parçacık Özellikleri ve Hız Ölçümü

Tez kapsamında yapılan testlerde aşındırıcı parçacık olarak, ASTM-G76 Standartı'nda önerilen 50 mikron boyutunda, alümina oksit (Al_2O_3) tozu kullanılmıştır. Piyasadan hazır olarak temin edilen, alümina oksit tozlarının boyut dağılımlarının standartta belirtilene göre uygun olup olmadığı kontrol etmek için boyut ölçümleri "Malver Mastersizer" cihazında yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde testlerde kullanılacak tozlarımızın, ortalama boyutu 52 μm olarak belirlenmiş olup, toz boyutu ölçüm raporu EK- 1' de verilmiştir.

Testlerden önce, numune yüzeyine püskürtülecek alümina oksit tozlarının hız ölçümleri “Çift Disk Hız Ölçüm Düzeneği” ile yapılmıştır. Şekil 2.1’de hız ölçüm düzeneğinin resmi gösterilmektedir. Düzenek aynı açısal hızla dönen iki diskten ve bu diskleri döndüren bir adet tahrik motorundan oluşmaktadır. Çift Disk Hız Ölçüm Yöntemi, araştırmacılar Ruff ve Ives tarafından 1975 yılında kullanılmış olup yöntem EK-2’ te ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Alümina oksit tozlarının, çift disk yöntemi ile yapılan hız ölçümleri sonucu, basınç-parçacık hız kalibrasyon eğrisi elde edilmiştir. Bu kalibrasyon eğrisi kullanılarak farklı hızlarda erozyon testleri yapılmıştır.

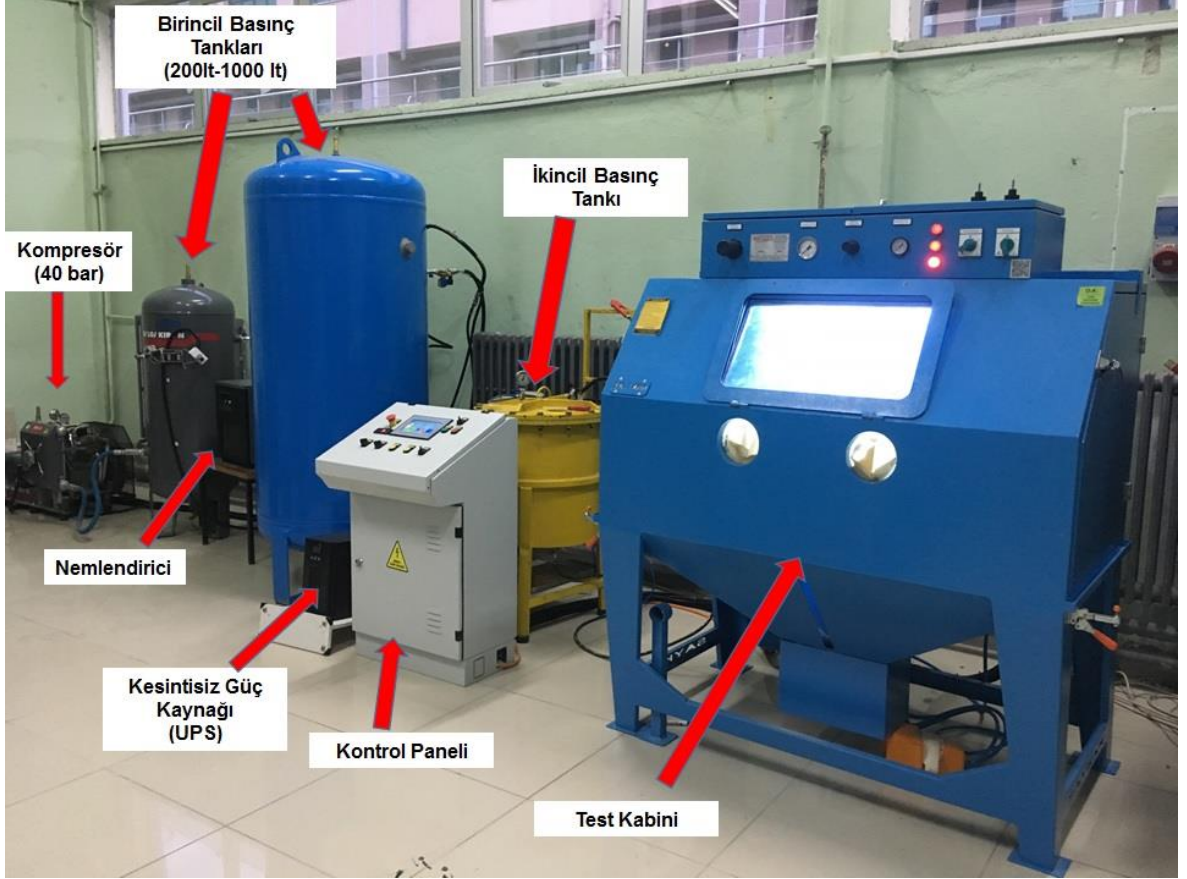


Şekil 2.1. Çift disk hız ölçüm düzeneği

2.1.2. Erozyon Test Sistemi ve Test Prosedürü

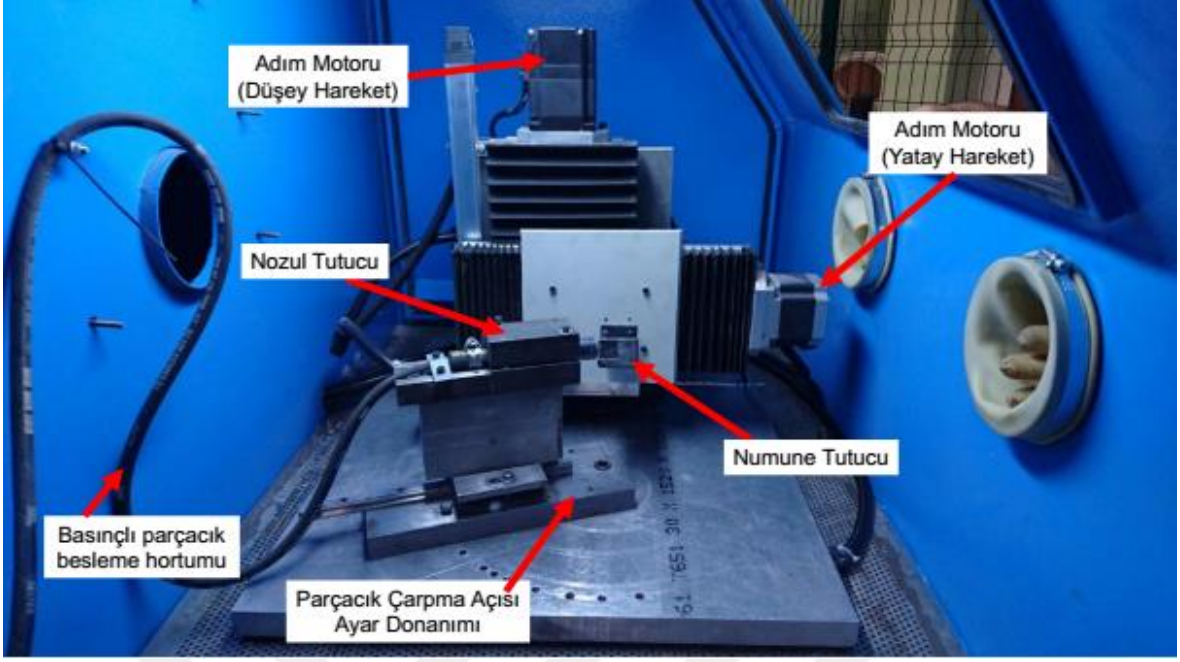
Literatürde katı parçacık erozyonu ile ilgili ASTM-G76 ve ASTM-F1864 standartları mevcuttur. Ancak bu standartlar, özellikle helikopterin iniş kalkış sırasında meydana gelen koşulları temsil etmemektedir. Bu nedenle pallerde kullanılacak malzemeler için MIL-STD

3033, Amerikan askeri standardı geliştirilmiştir. Bu standartlarda takip edilmesi gereken test prosedürü ve şartları ayrıntılı bir şekilde tanımlanmaktadır. Standartta belirtilen bu hususlara uygun olarak bölümümüzde tasarlanan ve imal edilen erozyon test sistemimizin görünümü Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Katı parçacık erozyon test sistemi

Test düzeneğinde istenilen basınç değerini sağlamak amacıyla, 40 bar basınç kapasiteli bir adet kompresör, biri 200 litrelik diğeri 1000 litrelik olan toplam iki adet hava tankı mevcuttur. Test esnasındaki havanın neminin almak için nem alma cihazı kullanılmaktadır. Testler sırasında aşındırıcı parçacıkların istenilen hızda test numunelerine yönlendirilmesi için basınçlandırılmasını sağlayan bir adet ikincil basınç tankı mevcuttur. Bu tankın içerisinde de bir adet hassas dozajlama düzeneği bulunmakta olup, düzenek yardımıyla 0.2 g/dk hassasiyet ile sisteme parçacıklar gönderilmektedir. İkincil basınç tankında basınçlandırılan aşındırıcı parçacıklar, Şekil 2.3’de detaylı olarak iç kısmı gösterilen test kabini içindeki lüle yardımıyla numune yüzeyine püskürtülmektedir.



Şekil 2.3. Erozyon test sistemi kabini içi

Test düzeneğinde, test esnasında bazı test parametrelerin kontrol edilebilmesi için bir kontrol paneli bulunmaktadır. Bu panel sayesinde kompresörün açılıp/kapatılması, nem alma sisteminin açılıp/kapatılması, birincil ve ikincil tanklarındaki havanın basıncının ayarlanması, hassas dozajlama ünitesinin hızının ayarlanması, MIL-STD-3033 testleri için numune tutucu tablanın hareket hızı ve çalışma bölgesinin belirlenmesi ile test kabini içindeki sıcaklık, basınç ve nem ölçümleri de yapılabilmektedir. Kumanda paneli, elektrik kesilmeleri ve gerilim değişimlerinin önlenmesi için kesintisiz güç kaynağı ile beslenmektedir.

Erozyon testleri yapılırken aşağıdaki işlem sırası takip edilmiştir.

1. Plaka halinde gelen test numuneleri çarpma açılarına göre gereken ve Tablo 2.4 de verilen boyutlarda kesilmiştir.
2. Her testden önce test numunelerinin ilk ağırlıkları 0,1 mg hassasiyete sahip hassas terazi ile ölçülerek test föylerine kaydedilmiştir.
3. Test numunesi, test kabini içindeki tutucu aparata yerleştirilmiş ve lüle istenilen çarpma açısına göre ayarlanmıştır.
4. Aşındırıcı parçacıkların istenilen hızlarda numune yüzeyine çarpması için gerekli basınç miktarları, kontrol paneline girilmiş ve istenilen basınç değeri sağlanmıştır.

5. Aşındırıcı Al_2O_3 tozları, test esnasında dakikada 2,5 g olacak şekilde numune yüzeyine atılmıştır. Bu debi değeri ikincil basınç tankı içerisinde bulunan hassas dozajlama düzeneği ile sağlanmıştır.
6. Her bir erozyon testi 4 dakikada bir ölçüm yapılarak toplamda 16 dakikada gerçekleştirilmiştir. Her bir periyot sonunda test durdurulmuş ve numunenin kütlesi hassas terazi ile ölçülmüştür.
7. Testler iki aşamada yapılmıştır.
 - 7.1. Birinci aşamada erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimleri incelenmiştir. Sabit bir hız değerinde (100 m/s), erozyon testleri değişik çarpma açıları için yapılmıştır. Gerçekleştirilen testler Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Erozyon miktarının açıya göre değişimi testleri

Çarpma Hızı [m/s]	100 (Sabit)				
Test Süresi [Dk]	16 dk (4 dk' lık 4 set)				
Test Tekrar Sayısı	En az 2 tekrar				
Çarpma Açısı Değeri	20 °	30 °	45 °	60 °	90 °
AISI 1020	✓	✓	✓	✓	✓
Al 6061	✓	✓	✓	✓	✓
SS 304	✓	✓	✓	✓	✓
Hardox 450	✓	✓	✓	✓	✓
Ti-6Al-4V	✓	✓	✓	✓	✓
DP 600	✓	✓	✓	✓	✓

- 7.2. İkinci aşamada ise erozyon miktarının çarpma hızına göre değişimleri incelenmiştir. Bu kısımda 90° çarpma açısı değeri için değişik çarpma hızları (100, 127, 170, 210 ve 250 m/s) için testler tekrarlanmıştır. Bu aşamada yapılan testler ise Tablo 2.2’ de verilmiştir.

Tablo 2.2. Erozyon miktarını çarpma hızına göre değişimi testleri

Çarpma Açısı [°]	90 (Sabit)				
Test Süresi [Dk]	16 dk (4 dk' lık 4 set)				
Test Tekrar Sayısı	En az 2 tekrar				
Çarpma Hızı Değerleri [m/s]	100	127	170	210	250
AISI 1020	✓	✓	✓	✓	✓
Al 6061	✓	✓	✓	✓	✓
SS 304	✓	✓	✓	✓	✓
Hardox 450	✓	✓	✓	✓	✓
Ti-6Al-4V	✓	✓	✓	✓	✓
DP 600	✓	✓	✓	✓	✓

8. Testlerden sonra, Ti-6Al-4V malzemesinin her açı değerinde yapılmış birer numunesi ile her malzemenin 90° çarpma açısında yapılmış birer numunesinin yüzey taramaları alınmıştır.

2.1.3. Numune Özellikleri

1020 çelikleri (AISI 1020) düşük karbonlu çeliklerdir. Karbon oranları düşük olması nedeniyle yumuşak çelikler olarak tanınırlar. Yapı ve inşaat ve makina parçaları imalatı sektörlerinde kullanılmaktadır (URL-3, 2018). 304 paslanmaz çelikleri (SS 304) günümüzde yaygın olarak kullanılan yüksek korozyon-oksidasyon direnci olan malzemelerdir. Bu malzemeler kolay şekil verilebilme özellikleri nedeniyle yoğun kullanıma sahiptirler (URL-4, 2018). Alüminyum 6061 (AA 6061) ise yüksek korozyon dayanımı olan bir alaşım türüdür. Ayrıca bu malzemenin kaynak edilebilirliği yüksek olup, yüksek sertlik değerine sahip alaşımlardır (URL-5, 2018). Ti-6Al-4V malzemesi de çok iyi korozyon direnci olan kolay şekil alabilen bir alaşım türüdür. Bu alaşımın ayrıca yüksek mukavemet özelliği de bulunmaktadır. Havacılık, denizcilik ve medikal sanayisinde yoğun olarak tercih edilen bir alaşımdır (URL-6, 2018). Hardox 450 çeliği, İsvec SSAB firması tarafından geliştirmiş

olduğu aşınmaya dayanıklı bir malzeme türüdür. Bu çelikler sertliği ile ön plana çıkan çelikler olup Brinel sertlik değerleri ile belirtilerek isimlerini almaktadır. Bu çelik türleri yüksek aşınma direnci özellikleri nedeniyle kırıcılar, endüstriyel kamyonlarda, kazıcı – yükleyiciler, kamyonlar, presler gibi aşınmanın fazla olduğu parçalarda kullanılırlar (URL-7, 2018). Son olarak DP 600 malzemesi ise özellikle ağırlıklarının önemli bir etken olduğu otomobillerde yoğun olarak kullanılmaya başlayan çift fazlı bir çelik türüdür. Bu malzeme yüksek mukavemet ağırlık oranının yüksek olması sebebiyle araçlarda kullanılmaktadır. Böylece yakıt tüketimi ve çevreye yayılan egzoz emisyon gazlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. (Hayat ve Demir, 2009)

Test numunelerine ait ağırlıkça kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri Tablo 2.3 ve Tablo 2.4’ de verilmiştir.

Tablo 2.3. Test numunelerinin ağırlıkça kimyasal bileşenleri

	AISI 1020	SS 304	AA 6061	Ti-6Al-4V	Hardox 450	DP 600
Karbon (C)	0.24	0.08		0.10	0.23	0.182
Demir (Fe)			0.5	0.40		
Azot (N)				0.05		
Silisyum (Si)	0.4	0.75	0.6		0.50	
Mangan (Mn)	0.7	2	0.2		1.60	1.6
Çinko (Zn)			0.25			
Bakır (Cu)			0.6			
Magnezyum(Mg)			0.8			
Fosfor (P)	0.035	0.045			0.025	
Kükürt (S)	0.04	0.03				
Krom (Cr)	0.4	18	0.1		1.20	0.341
Nikel (Ni)	0.4	8			0.25	0.027
Molibden (Mo)	0.1				0.25	0.098
Bor (B)					0.005	
Niyobyum (Nb)						0.0037
Titanyum (Ti)			0.1	90		0.002
Alüminyum (Al)				6		0.053
Vanadyum (V)				4		

Tablo 2.4. Test numunelerinin mekanik özellikleri

	AISI 1020	SS 304	AA 6061	Ti-6Al-4V	Hardox 450	DP 600
Yoğunluk (kg/m ³)	7850	7850	270	4428	7850	7850
Akma Dayanımı (Mpa)	500	600	240	896	1000	370
Çekme Dayanımı (MPa)	340	310	260	820	1250	636
Uzama (%)	20	60	20	10	10	27

Testler için gerekli numuneler piyasadan hazır olarak temin edilmiştir. Bu numuneler farklı firmalardan temin edildiğinden, her malzeme türünün kalınlıkları birbirinden farklı değerlerdedir. Tablo 2.5’de mevcut malzemelerin kalınlıkları gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Test numunesi türleri ve kalınlıkları

Numune Türü	Kalınlık (mm)
AISI 1020	5
AA 6061	10
Ti-6Al-4V	2
SS 304	5
Hardox 450	8
DP 600	1,5

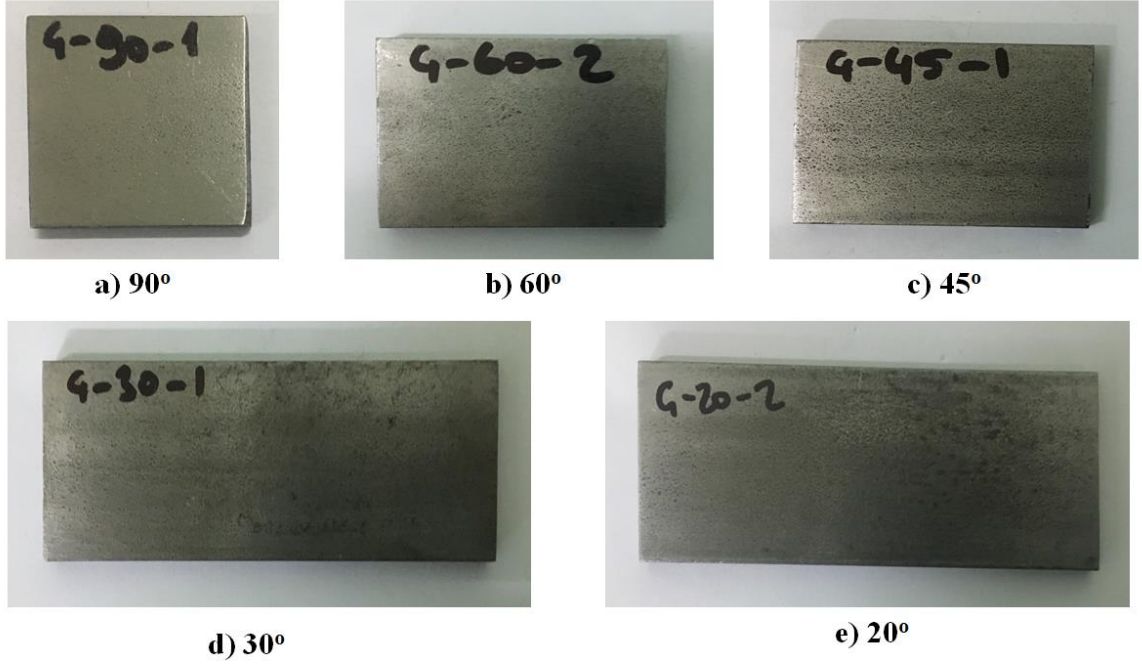
Tablo 2.5’den de görüldüğü üzere en düşük kalınlığa sahip numune türü DP 600 malzemesidir. Bu numune için en yüksek hız değerinde (250 m/s), toplam 16 dakika süren erozyon testleri yapılmıştır. Testler sonucu hiçbir DP 600 malzeme delinmemiş bu sebeple bütün testler (erozyon miktarının; çarpma açısı ve çarpma hızına göre değişimi) toplam 16 dakika üzerinden yapılmıştır.

Yapılan erozyon testleri sonucunda; çarpma açısı azaldıkça, numune yüzeyinde oluşan aşınma izi bölgesinin arttığı tespit edilmiştir. Bu sebeple numune boyutları her çarpma açısı için farklı uzunlukta hazırlanmıştır. Tablo 2.6’de numune boyutları görülmektedir. Tablodan görüldüğü üzere en uzun test numunesi 20° ve 30° çarpma açılarında kullanılmaktadır.

Tablo 2.6. Çarpma açısına göre test numunesi boyutları

Açı (°)	Boy [mm]	Genişlik [mm]
90	30	30
60	45	30
45	45	30
30	90	30
20	90	30

Test numuneleri Tablo 2.6' de belirtilen ölçülerde kesilip, düzgün yüzeyler elde etmek için testlerin yapılacağı yüzeyleri zımparalanmıştır. AISI 1020 çelik malzemesinin testleri için hazırlanmış numuneler Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Testler için a) 90°, b) 60°, c) 45°, d) 30°, e) 20° testleri için hazırlanmış AISI 1020 numuneleri

2.1.4. Krater Derinliklerinin Ölçümü

Katı parçacık erozyonu testlerine tabii tutulan test numunelerinin deforme olmuş yüzeyleri üç boyutlu temassız lazer optik profilometre cihazı ile incelendi. Yüzey taramaları

esnasında kullanılan 3-boyutlu lazer yüzey tarama cihazı Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Erozyon testleri sonucunda malzeme yüzeylerinde oluşan krater derinlikleri ölçülmüştür.



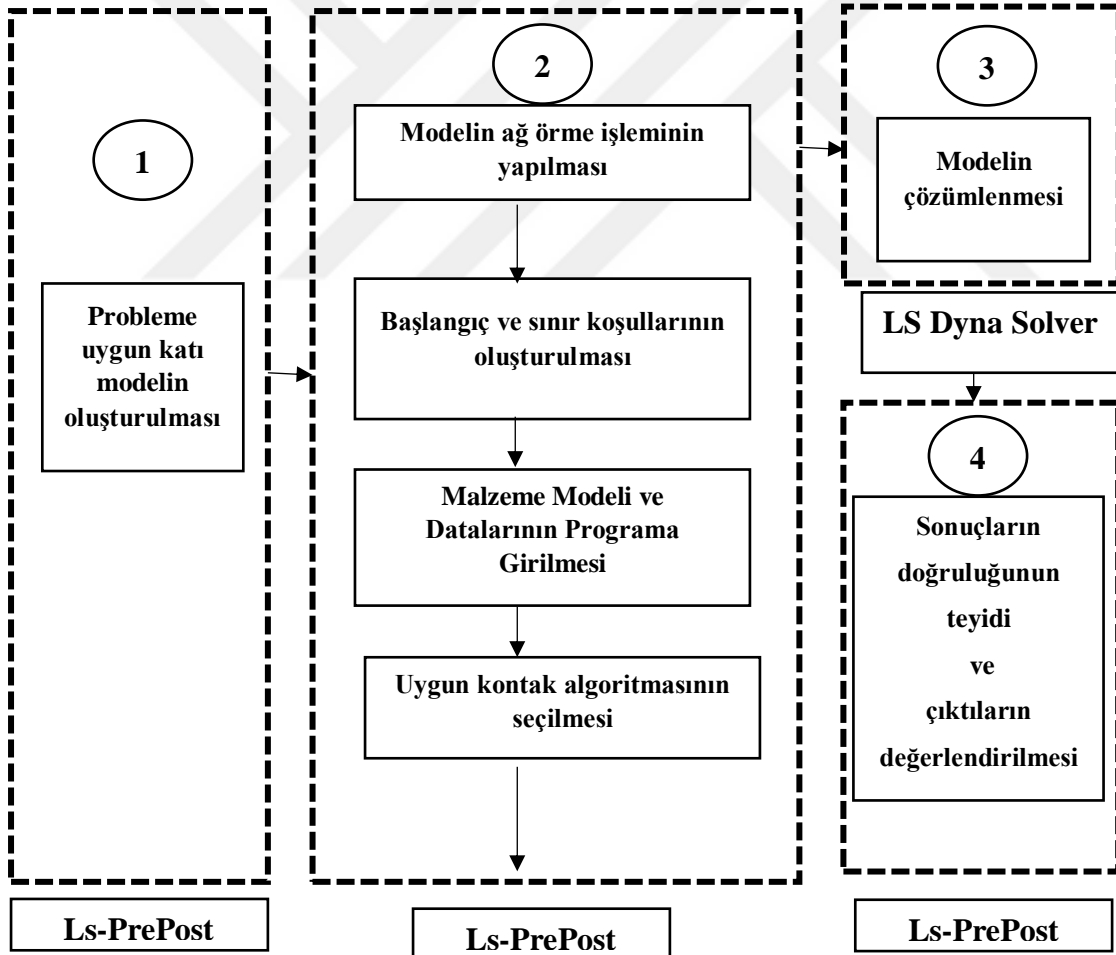
Şekil 2.5. Üç boyutlu yüzey taraması işleminde kullanılan temassız lazer optik profilometre

2.2. Sayısal Çalışmalar

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak modeller oluşturulmuştur. İlk olarak katı cisimler mekaniği yaklaşımı ile Ti-6Al-4V metalik malzemesinin katı parçacık erozyonu davranışının çarpma açısına göre değişimi incelemek üzere sayısal bir model oluşturulmuştur. Bu sayısal modeli oluşturmak için Ls-Dyna ticari paket yazılımı kullanılmıştır. İkinci olarak akışkanlar dinamiği yöntemine dayanan ANSYS Fluent ticari yazılımı kullanılmıştır. Yine aynı malzemenin (Ti-6Al-4V) sayısal modeli tekrar oluşturulmuş ve bu malzemenin katı parçacık erozyon davranışının çarpma açısına göre değişimi incelenmiştir.

2.2.1. Katı Cisimler Mekanikçi Yöntemiyle Modelleme Çalışmaları

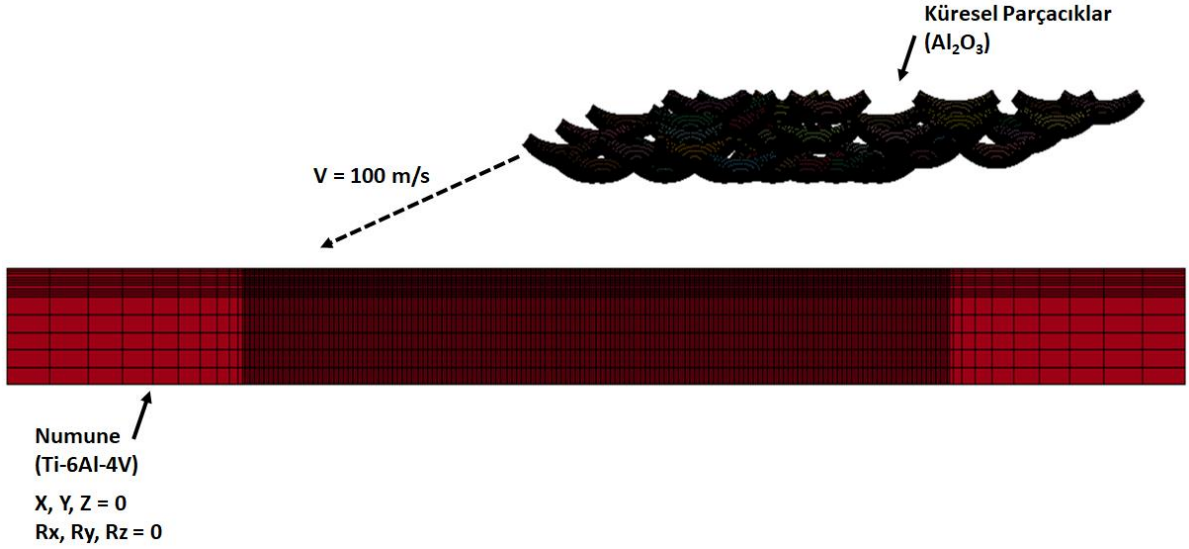
Katı cisimler mekanikçi yöntemiyle yapılan analizlerde; sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu yardımıyla Ti-6Al-4V malzemesinin katı parçacık erozyonunun modellenmesi yapılırken, yapılan işlem adımları Şekil 2.6' de gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi ilk adım olarak probleme uygun katı bir model oluşturuldu. İkinci adımda bu modelin ağ örgüsünün oluşturulması, başlangıç ve sınır koşulları, malzeme modeli seçilmesi ve temas algoritması seçildi. Analiz sonuçlarında test verilerine yakınlığı ve gerilme değerleri kontrol edilmiştir. Her çarpma açısı değeri için modeller oluşturulmuş ve çözümlenmiştir. Her açı değeri için elde edilen erozyon değerleri grafiklere işlenerek test verilerine yakınlığı incelenmiştir.



Şekil 2.6. Sonlu elemanlar modellemesindeki işlem adımları

Modelleme çalışmasında; alttaki numune (1x1x0.08 mm) boyutlarında solid eleman olarak oluşturulmuştur. Çarpma bölgesine yoğun ağ örgüsü atılırken, çarpma bölgesinden uzaklaştıkça ağ boyutu artırılarak daha az sayıda ağ oluşturulmuştur. Bu şekilde eleman sayısı azaltılıp çözüm süresinin düşürülmüştür.

Numune yüzeyine çarpan parçacıklar 50 mikrometre çapında küresel şeklinde kabuk (Shell) elemanlar olarak oluşturulmuştur. Çözüm süresinin azaltılması için küresel parçacıkların sayısı 50 ile sınırlandırılmıştır. Bu parçacıklar her set 10 parçacıktan oluşan toplam 5 set halinde numune yüzeyine çarptırılması sağlanmıştır. Ayrıca yine çözüm süresinin azaltılması için küresel parçacıkların üst kısımları silinerek sadece numune yüzeyine çarpan kısımları modellenmiştir. Parçacıkların bu şekilde azalan kütleleri telafi etmek için ELEMENT_MASS kartı yardımıyla her bir parçacığın kütleleri modelde eklenmiştir. Analiz için oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Ti-6Al-4V malzemesine ait sonlu elemanlar modeli

Sayısal analizlerde; Johnson-Cook (MAT015) malzeme modeli kullanılmış olup, bu malzeme modeli sıcaklık değişimleri, deformasyon hızlarındaki değişimleri iyi bir şekilde modelleyebilmektedir. Bu malzeme modeline ait gerilme denklemi aşağıdaki gibidir (Johnson ve Cook, 1983).

$$\sigma_f = [A + B (\epsilon_p^n)] \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^m \right) \quad (2.1)$$

Bu formülde; A, B, c, n ve m değerleri malzemeye ait sırasıyla; akma dayanımı, sertleşme katsayısı, şekil değiştirme üssü, pekleşme katsayısı, ısı yumuşama katsayısı olarak tanımlanmakta olup bu değerler her malzeme için testler yoluyla elde edilmektedir. T_M , T_R ve ϵ_p ise sırasıyla ergime sıcaklığı, oda sıcaklığı ve etkin plastik şekil değiştirmedir. Ti-6Al-4V malzemesine ait Johnson-Cook malzeme modeli değerleri ve doğrusal malzeme özellikleri Tablo 2.7’de sunulmuştur. Küresel parçacıklar için MAT_ELASTIC kartı kullanılmıştır. Parçacıkların yoğunluğu 3200 kg/m^3 , elastisite modülü 201 MPa ve poisson oranı da 0.30 olarak malzeme kartına girilmiştir. Numunenin alt yüzeyindeki bütün nodlar tüm yönlerdeki hareketlere (X, Y, Z) ve tüm yöndeki dönmelere (R_x , R_y , R_z) karşı sabitlenmiştir. Bu şekilde parçacıklar numune yüzeyinde erozyona yol açması sağlanmıştır.

Tablo 2.7. Ti-6Al-4V malzemesine ait doğrusal malzeme özellikleri ve Johnson-Cook malzeme sabitleri (Lesuer, 2000).

Malzeme	Johnson-Cook Malzeme Modeli Katsayıları					Lineer Malzeme Özellikleri		
	A [MPa]	B [MPa]	C	n	m	E [MPa]	ρ [kg/ m ³]	ν
Ti-6Al-4V	1098	1092	0.98	0.014	1.1	41900	4428	0.31

Numune yüzeyinde oluşan erozyon miktarının hesaplanması için Johnson-Cook malzeme modeli içindeki hasar denklemlerinden yararlanılmıştır. Bu denklem 2.2’de gösterilmiştir (Johnson ve Cook, 1983).

$$\epsilon_f = (d_1 + d_2 \exp \left[d_3 \frac{p}{\sigma_y} \right]) (1 + d_4 \ln \dot{\epsilon}_{eff}) (1 + d_5 T^*) \quad (2.2)$$

Denklemden $d_1 - d_5$ değerleri Johnson-Cook hasar sabitleri olmak üzere bu değerler her malzeme için testlerle elde edilmektedir. Diğer parametre olan, p ise hidrostatik basınç olarak tanımlanmaktadır. LS DYNA her adımda bu denklemi kullanarak, bütün elemanlar için ϵ_f değerini hesaplar ve bu değer 1 e ulaşan elemanları modelden siler. Bu şekilde malzemede ki hasar modellenmiş olmaktadır. Ti-6Al-4V malzemesine ait Johnson-Cook hasar sabitleri Tablo 2.8’de gösterilmiştir.

Tablo 2.8. Ti-6Al-4V malzemesine ait Johnson-Cook hasar sabitleri (Lesuer, 2000).

Malzeme	Johnson-Cook Hasar Sabitleri				
Ti-6Al-4V	d1	d2	d3	d4	d5
	-0.09	0.27	-0.48	0.014	3.87

LS DYNA yazılımında Johnson-Cook malzeme modelinin kullanılması halinde, program EOS_GRUNEISEN kartının da aktif hale getirilmesi gerekir. Bu sebeple, Ti-6Al-4V malzemesine ait EOS_GRUNEISEN değerleri girilerek kart aktif hale getirilmiştir. Buna ilaveten modelin çözümü esnasında oluşacak sıfır enerji modları sorununu çözebilmek için HOURGLASS kartı da aktif hale getirilmiştir.

Parçacıklar ile numune arasında temas için program içindeki kontak kartlarında CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE seçilmiştir. Bu kart içinde statik ve dinamik sürtünme katsayılarının her ikisi de 0.2 olarak alınmıştır. Ayrıca kontak kartı içinde bulunan SOFT (Soft constraint option) kısmı açılıp 2 numaralı parametre (pinball segment based contact) aktif hale getirilmiştir. Bu sayede parçacıklar ile numune arasında düzgün bir temas sağlanmıştır.

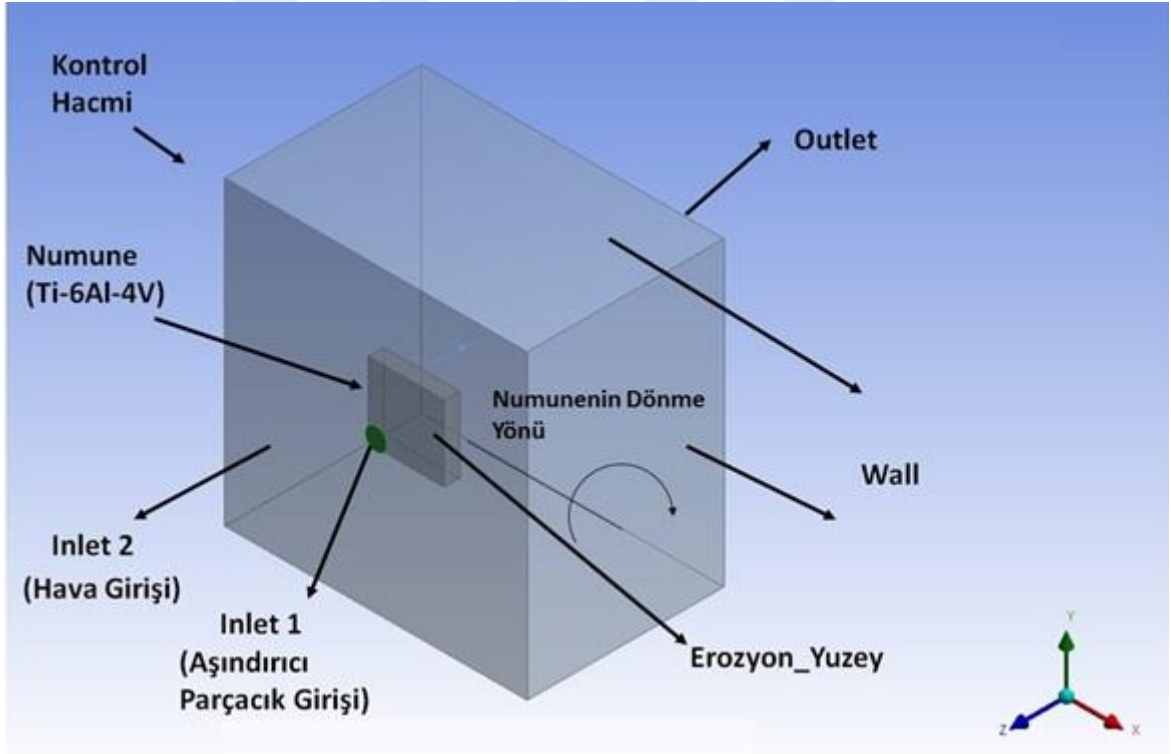
Parçacıklara çarpma hızlarının verilmesi kısmında ise ilk olarak tüm parçacıklar SET_PART_LIST kartı kullanılarak tek bir part halinde programa tanımlanması sağlandı. Daha sonra INITIAL_VELOCITY_GENERATION kartı içinde bu part list' te tanımlanan parçacıklara 100 m/s düşey yönde hız tanımlandı. Her çarpma açısı için oluşturulan diğer modellerde de bu hız bileşenleri vektörel toplamı 100 m/s olacak şekilde değiştirilmiştir. Son olarak ta analizin süresini belirlemek için CONTROL_TERMINATION kartı aktif hale getirilerek analiz süresi girilmiştir.

2.2.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Modelleme Çalışmaları

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akış ortamında karmaşık geometriye sahip parçalarda erozyon hızı miktarının hesaplanmasında güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. Bilgisayar teknolojisinin hızla gelişimiyle birlikte; otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılan aşınma kalkanlarındaki erozyon hasarının belirlenmesi hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları yardımıyla yapılmaktadır. Bu analizlerde

bir çok ticari paket programı kullanılmakta olup, tezde Euler Lagrange yaklaşımını kullanan ANSYS Fluent ticari paket programı tercih edilmiştir.

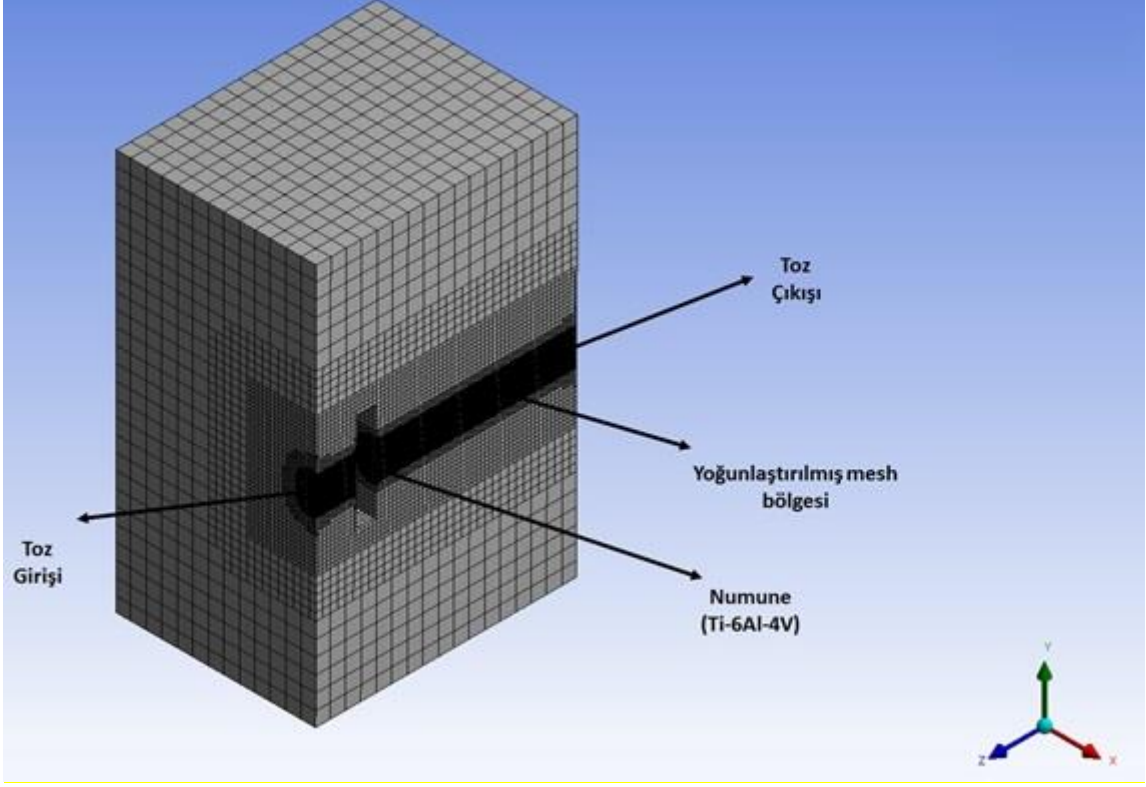
ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak oluşturulan model Şekil 2.8’de gösterilmiştir. ANSYS Fluent yazılımı kontrol hacmi içerisinde problemin çözümü gerçekleştirilir. Bu kontrol hacmi içerisinde INLET, OUTLET ve WALL tanımlamaları yapılması gerekir. Programda aşındırıcı parçacıkların ortama giriş yaptığı lüle ucu INLET1, havanın ortama giriş kısmı ise INLET2 olarak tanımlanmıştır. Havanın ortamdaki çıkış yaptığı arka kısım OUTLET, kontrol hacminin alt, üst ve yan kısımlarının hepsi WALL olarak tanımlanmıştır. Erozyon hesaplamalarının yapılacağı Ti-6Al-4V malzemesinin ön yüzeyi EROZYON_YUZEY, diğer yüzeyler ise DİĞER_YUZEYLER olarak tanımlanmıştır. Şekil 2.8’de çarpma açısının 90° olduğu modellenmeyi göstermektedir. Diğer çarpma açılarındaki erozyon testlerinde ise numune Şekil 2.8’ de gösterilen dönme yönünde hareket ettirilerek yeni modeller oluşturulmuştur.



Şekil 2.8. Ti-6Al-4V malzemesi için oluşturulan hesaplamalı akışkanlar modeli

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği için oluşturulan modelde akış ortamı ve numune için yaklaşık 500784 adet hexagon (dikdörtgen prizması) şeklinde elemanlarla ağ yapısı

oluşturulmuştur. Bu modelde aşınma kalkanı yüzeylerine yakın yerlerde yoğunlaştırılmış ağ yapısı kullanılmıştır. Böylece çözümün yakınsaması sağlanmıştır. Model için oluşturulmuş ağ yapısı Şekil 2.9’de verilmiştir.



Şekil 2.9. Ti-6Al-4V malzemesi için oluşturulan ağ örgüsü yapısı

Akışkanlar dinamiği yaklaşımıyla gerçekleştirilen analizlerde en iyi yakınsama veren model $k-\omega$ türbülans modeli seçilmiştir.

Erozyon modellemelerinde DNV firmasına tarafından geliştirilen ve Denklem 2.3’de verilen erozyon eşitliği kullanılmıştır (DNV, 2007).

$$E_R = \sum_{i=1}^{N_i} \frac{m_i \times K \times V_i^n \times F(\alpha)}{A_i} \quad (2.3)$$

Bu denklemde;

E_R : Erozyon Hızı (kg / m²s)

m_i : Hedef yüzeye çarpan parçacığın kütleli debisi (kg / s)

V_i : Hedef yüzeye çarpan parçacıkların hızı (m/s)

K : Hedef malzeme yüzeyine bağlı malzeme sabiti

n : Hedef malzeme yüzeyine bağlı hız üssü sabiti

A_i : Parçacıkların çarptığı hedef yüzeyin alanı

$F(\alpha)$: Çarpma açısına bağlı fonksiyon sabiti

olarak tanımlanmakta olup, K ve n malzeme sabitleri yapılan erozyon testleri sonucu elde edilmiştir. K ve n katsayılarının hesaplanmasında kullanılan denklemler Denklem 2.4 ve 2.5’de sırasıyla verilmiştir (DNV, 2007).

$$K = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{e(V_{p,i})}{V_{p,i}^n} \quad (2.4)$$

$$n = \frac{1}{N-1} \sum_i^{N-1} \frac{\ln\left(\frac{e_{90}(V_{p,i+1})}{e_{90}(V_{p,i})}\right)}{\ln\left[\frac{V_{p,i+1}}{V_p}\right]} \quad (2.5)$$

Denklem 2.4 ve 2.5 kullanılarak elde edilen Ti-6Al-4V malzemesine ait K ve n katsayılarına Tablo 2.9’de gösterilmiştir. Bu katsayılar hesaplanırken Ti6Al-V malzemesine ait 90° çarpma açısındaki yüksek hızlardaki erozyon değerleri kullanılmıştır.

Tablo 2.9. Ti-6Al-4V malzemesine ait K ve n katsayıları

Malzeme	K	n
Ti-6Al-4V	1.72962E-8	2.3

Parçacıkları kontrol hacmine INLET1’de giriş yapmakta ve OUTLET kısmından çıkış yapmaktadır. Inlet kısmına ANSYS-Fluent programında, parçacık girişi için Injection tanımı

yapılmıştır. Bu injection tanımlaması yapılırken, ortama giren parçacıkların çapı 50 μm , hızları ise 100 m/s olarak ayarlanmıştır. Ayrıca bu parçacıkların kontrol hacmine giriş debisi de 2.5 gr/dk olacak şekilde tanımlanmıştır. Parçacık olarak alümina oksit (Al_2O_3) dataları girilmiştir.

Programdaki, Boundary Conditions kısmında INLET1, INLET2 ve OUTLET harici tüm yüzeyler (WALL, EROZYON_YUZEY) için sabit duvar (Stationary Wall) tanımlaması yapılmıştır. Fakat EROZYON_YUZEY kısmında programın erozyon hesaplamaları yapabilmesi için DPM kartı açılmış ve bu kart içinde "Impact Angle Function" ,"Velocity Exponent Function" kısımlarına sırasıyla yukarıdaki denklemlerde hesaplanan, çarpma fonksiyonu sabiti ($F(\alpha)$) ve bağlı hız üssü sabiti (n) girilmiştir.

Bu değerler yardımıyla ANSYS Fluent te her çarpma açısı için ayrı ayrı modellemeler gerçekleştirildi. Bu şekilde elde edilen erozyon değerleri, Ti-6Al-4V malzemesinin test verileriyle çok iyi bir şekilde uyum göstermiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

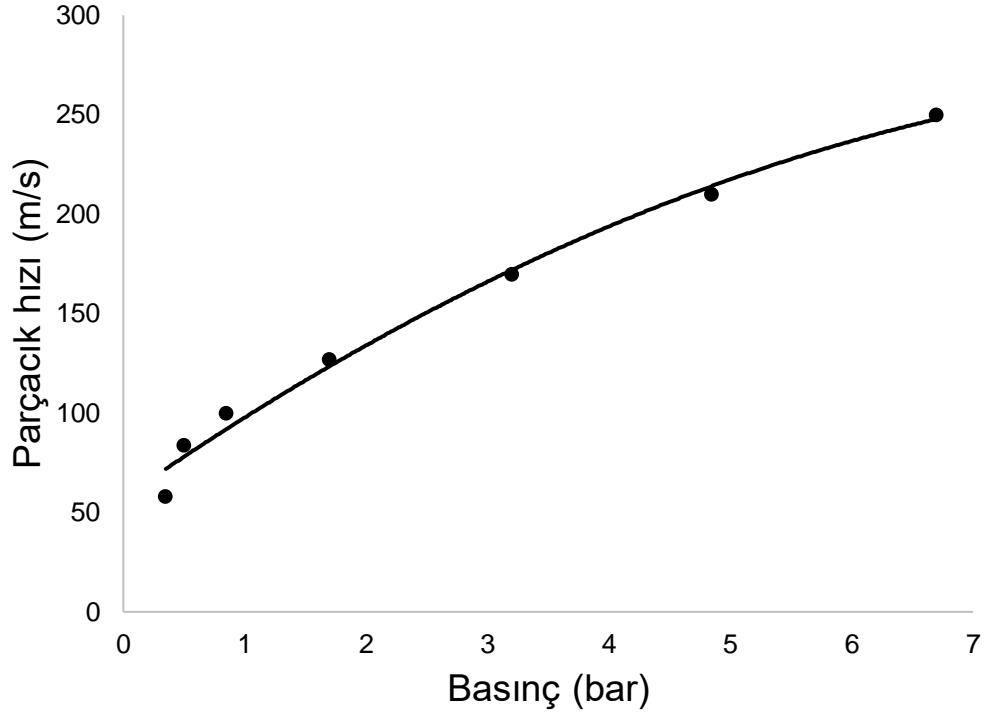
3.1. Test Sonuçları

Hız Kalibrasyon Eğrisi

Testlerden önce alümina oksit (Al_2O_3) parçalarının çift disk yöntemiyle hız-basınç kalibrasyon testleri yapılmıştır. Testler sonucunda hız-basınç kalibrasyon eğrisi Şekil 3.1’de değerleri ise Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Alümina oksit aşındırıcı parçacığına ait hız-basınç değerleri

Çarpma Hızı [m/s]	Basınç [mbar]
100	850
127	1700
170	3200
210	4850
250	6700

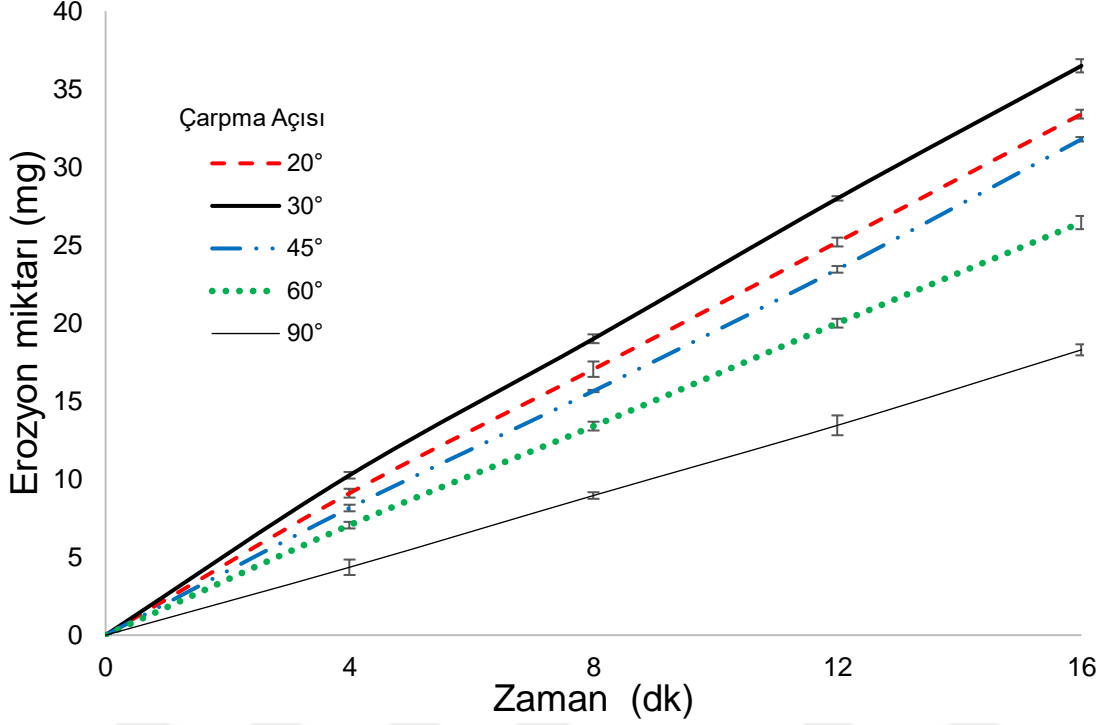


Şekil 3.1. Alümina oksit (Al_2O_3) parçacığının ($50 \mu m$) hız-basınç kalibrasyon grafiği

3.1.1. Erozyon Miktarının Zamana Göre Değişimi

Şekil 3.2’de AISI 1020 çelik malzemesinin 100 m/s sabit hızında değişik çarpma açılarında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere AISI 1020 malzemesinde en düşük erozyon miktarı 90° ’lik çarpma açısında elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda en düşük erozyon miktarı 4.35 mg olarak belirlenmiştir. Erozyon miktarları 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 8.95, 13.45 ve 18.15 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarları, her açı değeri için doğrusal olarak artmıştır. İkinci olarak en düşük erozyon miktarı 60° ’lik çarpma açısında belirlenmiştir. Bu açı değerinde ise 4. dakika sonunda 7.05 mg erozyon değeri ölçülmüştür. Diğer dakikalarda (8, 12, 16) ise sırasıyla 13.40, 20 ve 26.30 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. 45° ’de erozyon miktarı 4. dakika sonunda 8.15 mg olarak ölçülmüş diğer 8., 12., 16. dakikalarda doğrusal artış göstererek sırasıyla 15.65, 23.45 ve 31.60 mg olarak ölçülmüştür. 20° ’lik çarpma açısında yapılan testlerde ise yine aynı dakikalardaki erozyon miktarları sırasıyla 9.10, 17.05, 25.20 ve 33.40 mg olarak belirlenmiştir. Bu malzemedeki en yüksek erozyon miktarı 30° ’de yapılan testlerde elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda 10.25 mg

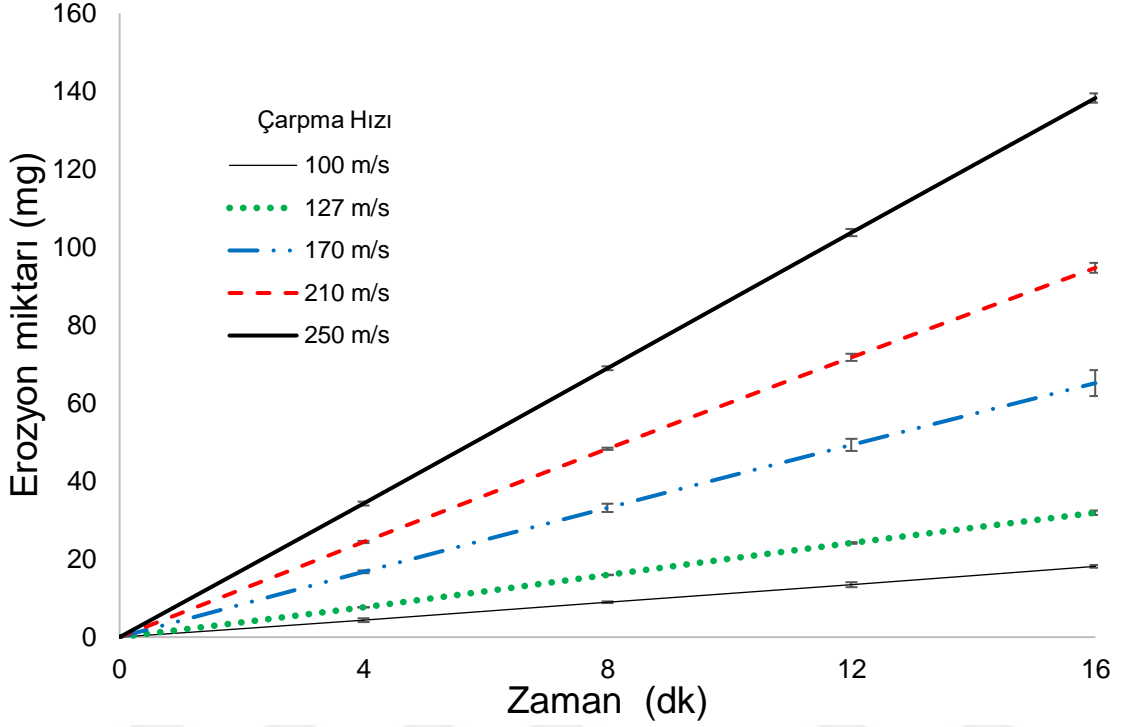
olarak ölçülen erozyon miktarları doğrusal olarak artarak 8., 12., ve 16. dakika sonunda sırasıyla 19, 28 ve 36.30 mg değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 3.2. AISI 1020 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 3.3’de AISI 1020 çelik malzemesinin çarpma açısı 90° için erozyon davranışlarının çarpma hızına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde görülmekte olup, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı artmaktadır. Erozyon miktarları aynı malzeme için; 100 m/s çarpma hızında 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 4.35, 8.95, 13.45 ve 18.15 mg olarak ölçülmüşken, 127 m/s hız değerinde sırasıyla 7.65, 15.95, 24.15 ve 31.90 mg olarak ölçülmüştür. 170 m/s hızda yapılan testlerde ise 4. dakika sonunda 16.75 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu erozyon miktarı diğer dakikalarda beklendiği gibi zamanlar doğrusal olarak artmıştır. 210 m/s hız değerindeki testler için ise aynı dakikalar sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 24.40, 48.30, 71.75 ve 94.70 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. Son olarak 250 m/s hız değerinde yapılan testlerde, maksimum erozyon miktarları elde edilmiştir. Bu değerlerde 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 34.25, 68.95, 103.75 ve 138.35 mg olarak belirlenmiştir.

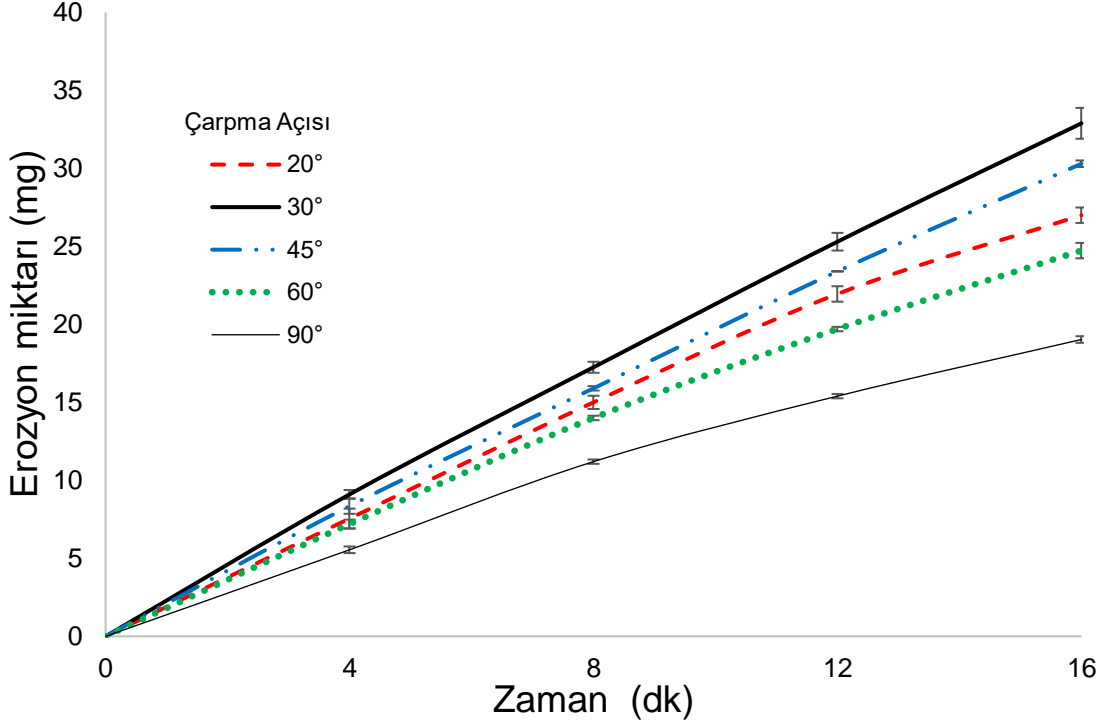
Sonuçlara bakıldığında AISI 1020 malzemesinin erozyon hasarları zamanla doğrusal arttığı görülmüştür.



Şekil 3.3. AISI 1020 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 3.4’de SS 304 çelik malzemesinin 100 m/s sabit hızında değişik çarpma açıları arasında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere SS 304 malzemesinde en düşük erozyon miktarı 90°’lik çarpma açısında elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda en düşük erozyon miktarı 5.55 mg olarak belirlenmiştir. Erozyon miktarları 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 11.20, 15.40 ve 19.03 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarları, her açı değeri için doğrusal olarak artmıştır. İkinci olarak en düşük erozyon miktarı 60°’lik çarpma açısında belirlenmiştir. Bu açı değerinde ise 4. dakika sonunda 7.20 mg erozyon değeri ölçülmüştür. Diğer dakikalarda (8, 12, 16) ise sırasıyla 14.00, 19.70 ve 24.73 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. 20°’de erozyon miktarı 4. dakika sonunda 7.55 mg olarak ölçülmüş diğer 8., 12., 16. dakikalarda doğrusal artış göstererek sırasıyla 15.00, 21.95 ve 27.00 mg olarak ölçülmüştür. 45°’lik çarpma açısında yapılan testlerde ise yine aynı dakikalardaki erozyon miktarları sırasıyla 8.35, 15.90, 23.40 ve 30.30 mg olarak belirlenmiştir. Bu malzemede en yüksek erozyon

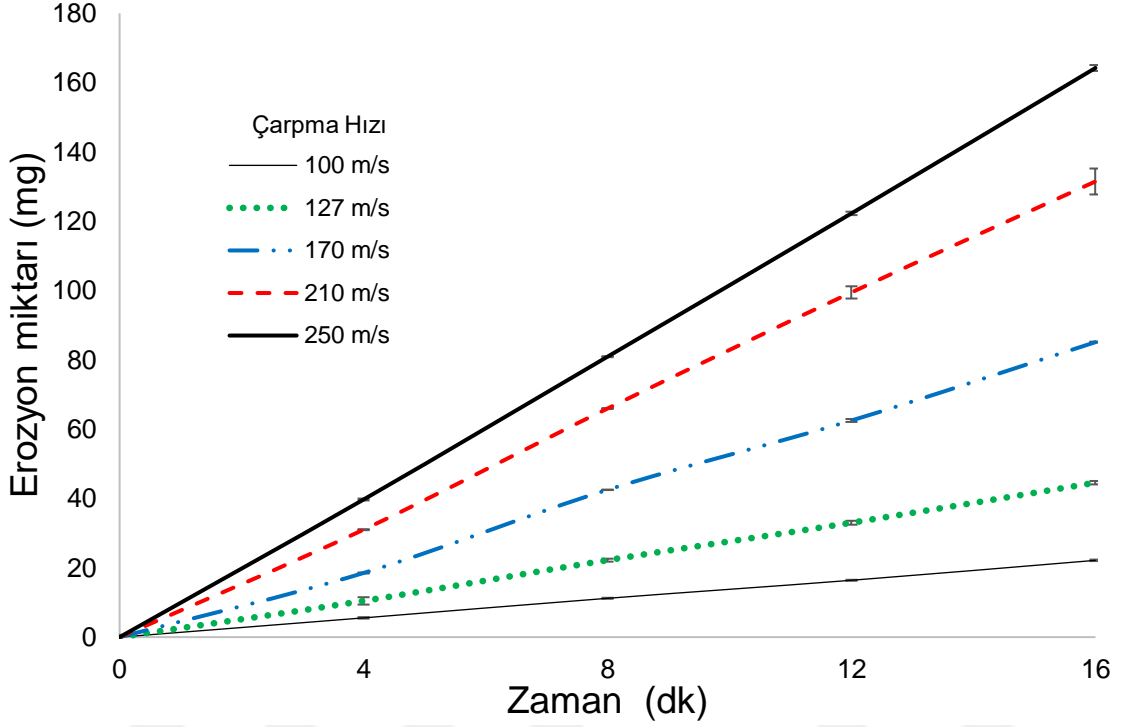
miktarı 30° de yapılan testlerde elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda 9.10 mg olarak ölçülen erozyon miktarları doğrusal olarak artarak 8., 12., ve 16. dakika sonunda sırasıyla 17.25, 25.30 ve 32.89 mg değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 3.4. SS 304 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 3.5’de SS304 çelik malzemesinin çarpma açısı 90° için erozyon davranışlarının çarpma hızına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde görülmekte olup, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı artmaktadır. Erozyon miktarları aynı malzeme için; 100 m/s çarpma hızında 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 5.55, 11.20, 16.40 ve 22.15 mg olarak ölçülmüşken, 127 m/s hız değerinde sırasıyla 10.45, 22.20, 33.00 ve 44.55 mg olarak ölçülmüştür. 170 m/s hızda yapılan testlerde ise 4. dakika sonunda 18.50 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu erozyon miktarı diğer dakikalarda beklendiği gibi zamanlar doğrusal olarak artmıştır. 210 m/s hız değerindeki testler için ise aynı dakikalar sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 31.00, 65.95, 99.45 ve 131.45 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. Son olarak 250 m/s hız değerinde yapılan testlerde, maksimum erozyon miktarları elde edilmiştir. Bu değerlerde 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 39.70, 80.90, 122.25 ve 164.20 mg olarak belirlenmiştir.

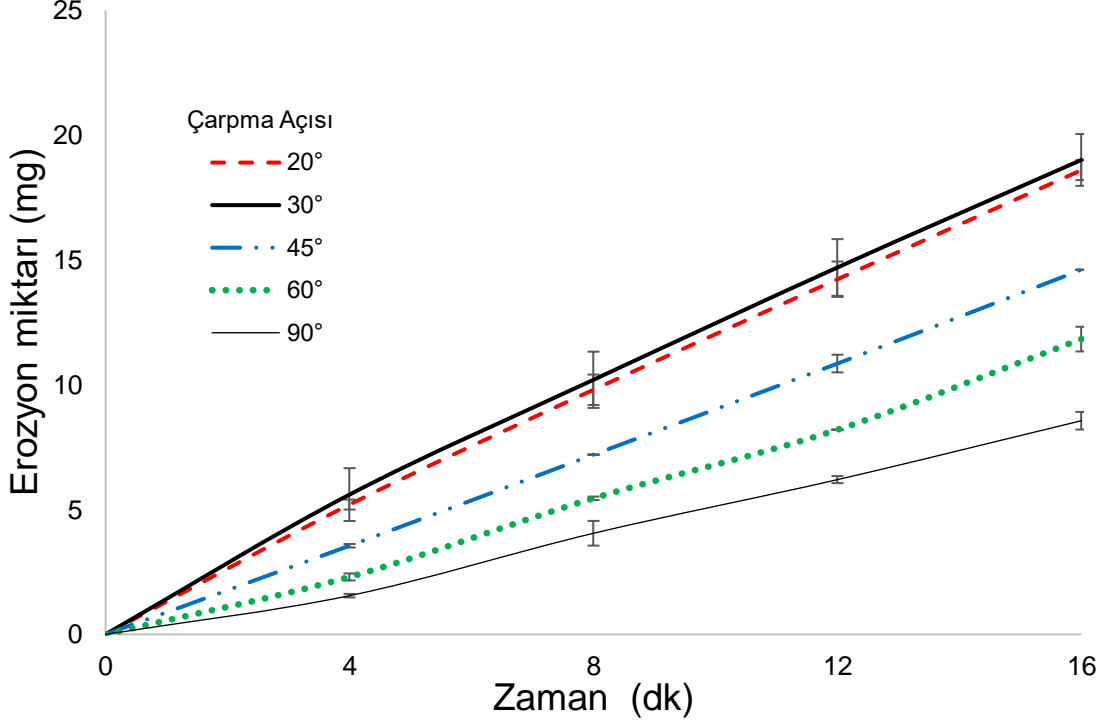
Sonuçlara bakıldığında SS 304 malzemesinin erozyon hasarları zamanla doğrusal arttığı görülmüştür.



Şekil 3.5. SS 304 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 3.6'de AA 6061 malzemesinin 100 m/s sabit hızında değişik çarpma açılarında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere AA6061 malzemesinde en düşük erozyon miktarı 90°'lik çarpma açısında elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda en düşük erozyon miktarı 1.55 mg olarak belirlenmiştir. Erozyon miktarları 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 4.05, 6.20 ve 8.56 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarları, her açı değeri için doğrusal olarak artmıştır. İkinci olarak en düşük erozyon miktarı 60°'lik çarpma açısında belirlenmiştir. Bu açı değerinde ise 4. dakika sonunda 2.30 mg erozyon değeri ölçülmüştür. Diğer dakikalarda (8, 12, 16) ise sırasıyla 5.45, 8.20 ve 11.83 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. 45°'de erozyon miktarı 4. dakika sonunda 3.55 mg olarak ölçülmüş diğer 8., 12., 16. dakikalarda doğrusal artış göstererek sırasıyla 7.20, 10.85 ve 14.61 mg olarak ölçülmüştür. 20°'lik çarpma açısında yapılan testlerde ise yine aynı dakikalardaki erozyon miktarları sırasıyla 5.20, 9.80, 14.23 ve 18.60 mg olarak belirlenmiştir. Bu malzemede en yüksek erozyon miktarı 30° de yapılan

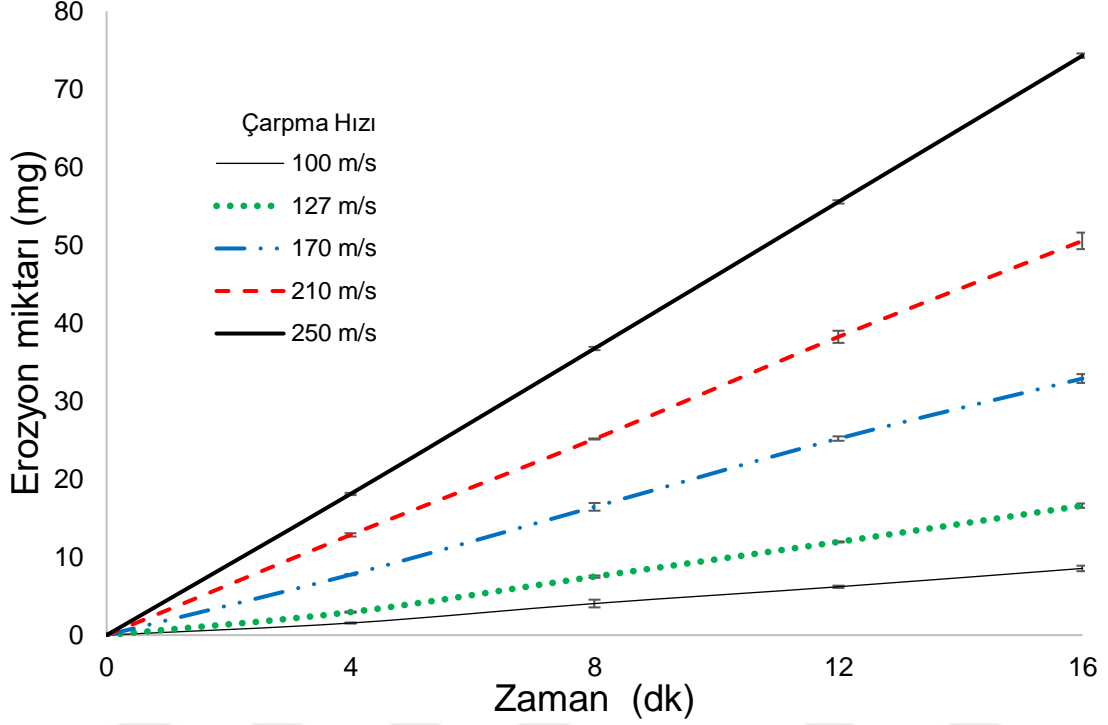
testlerde elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda 5.60 mg olarak ölçülen erozyon miktarları doğrusal olarak artarak 8., 12., ve 16. dakika sonunda sırasıyla 10.20, 14.70 ve 19.01 mg değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 3.6. AA 6061 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 3.7’de AA 6061 malzemesinin çarpma açısı 90° için erozyon davranışlarının çarpma hızına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde görülmekte olup, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı artmaktadır. Erozyon miktarları aynı malzeme için; 100 m/s çarpma hızında 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 1.55, 4.05, 6.20 ve 8.55 mg olarak ölçülmüşken, 127 m/s hız değerinde sırasıyla 2.95, 7.50, 11.95 ve 16.60 mg olarak ölçülmüştür. 170 m/s hızda yapılan testlerde ise 4. dakika sonunda 7.75 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu erozyon miktarı diğer dakikalarda beklendiği gibi zamanlar doğrusal olarak artmıştır. 210 m/s hız değerindeki testler için ise aynı dakikalar sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 12.85, 25.15, 38.25 ve 50.55 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. Son olarak 250 m/s hız değerinde yapılan testlerde, maksimum erozyon miktarları elde edilmiştir. Bu değerlerde 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 18.10, 36.75, 55.55 ve 74.30 mg olarak belirlenmiştir.

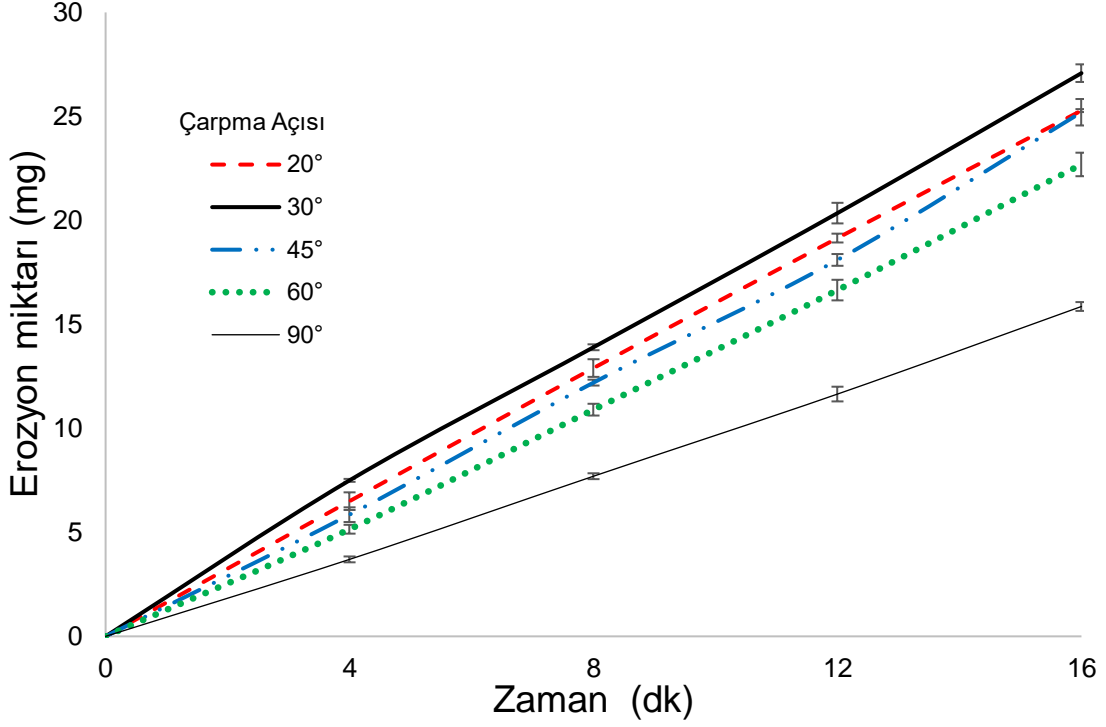
Sonuçlara bakıldığında AA 6061 malzemesinin erozyon hasarları zamanla doğrusal arttığı görülmüştür.



Şekil 3.7. AA 6061 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 3.8’de Hardox 450 malzemesinde 100 m/s sabit hızında değişik çarpma açıları altında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere Hardox 450 malzemesinde en düşük erozyon miktarı 90°lik çarpma açısında elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda en düşük erozyon miktarı 3.70 mg olarak belirlenmiştir. Erozyon miktarları 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 7.70, 11.65 ve 15.86 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarları, her açı değeri için doğrusal olarak artmıştır. İkinci olarak en düşük erozyon miktarı 60°lik çarpma açısında belirlenmiştir. Bu açı değerinde ise 4. dakika sonunda 5.15 mg erozyon değeri ölçülmüştür. Diğer dakikalarda (8, 12, 16) ise sırasıyla 10.90, 16.65 ve 22.69 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. 45° de erozyon miktarı 4. dakika sonunda 5.85 mg olarak ölçülmüş diğer 8., 12., 16. dakikalarda doğrusal artış göstererek sırasıyla 12.20, 18.10 ve 25.20 mg olarak ölçülmüştür. 20° lik çarpma açısında yapılan testlerde ise yine aynı dakikalardaki erozyon miktarları sırasıyla 6.50, 12.90, 19.15 ve 25.28 mg olarak belirlenmiştir. Bu malzemede en yüksek erozyon

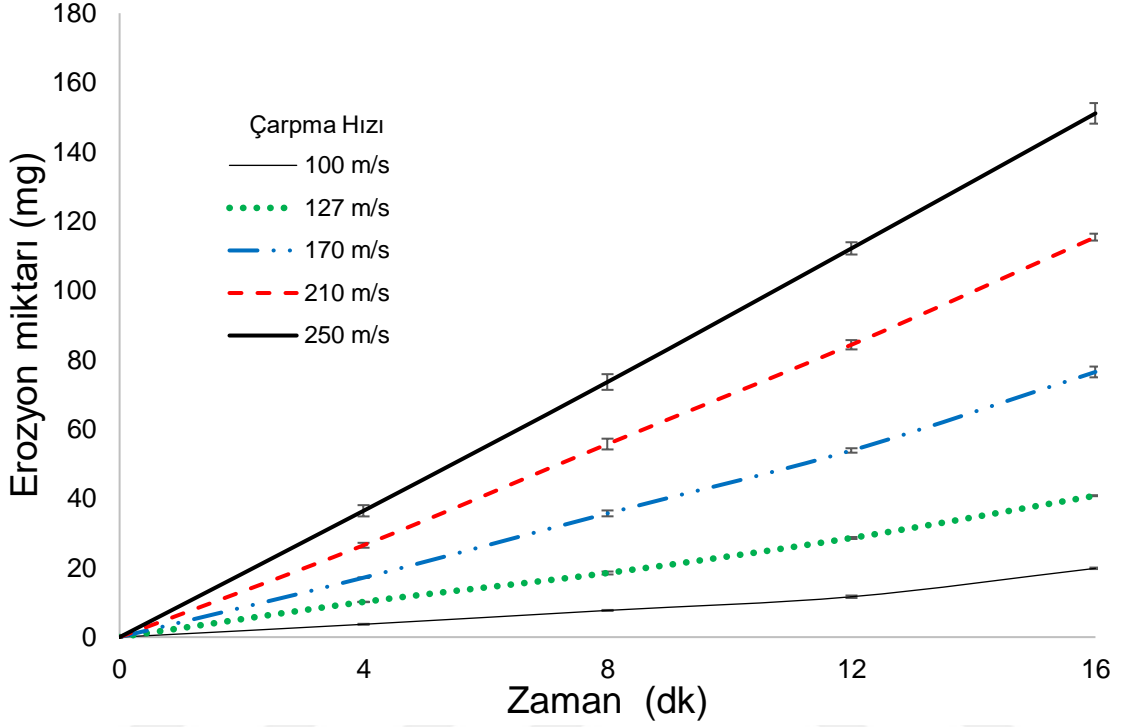
miktarı 30° de yapılan testlerde elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda 7.50 mg olarak ölçülen erozyon miktarları doğrusal olarak artarak 8., 12., ve 16. dakika sonunda sırasıyla 13.90, 20.35 ve 27.08 mg değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 3.8. Hardox 450 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarındaki kütle erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 3.9’de Hardox 450 malzemesinde çarpma açısı 90° için erozyon davranışlarının çarpma hızına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde görülmekte olup, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı artmaktadır. Erozyon miktarları aynı malzeme için; 100 m/s çarpma hızında 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 3.70, 7.70, 11.65 ve 19.85 mg olarak ölçülmüşken, 127 m/s hız değerinde sırasıyla 10.15, 18.50, 28.60, 40.80 mg olarak ölçülmüştür. 170 m/s hızda yapılan testlerde ise 4. dakika sonunda 17.15 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu erozyon miktarı diğer dakikalarda beklendiği gibi zamanlar doğrusal olarak artmıştır. 210 m/s hız değerindeki testler için ise aynı dakikalar sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 26.50, 55.70, 84.35 ve 115.40 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. Son olarak 250 m/s hız değerinde yapılan testlerde, maksimum erozyon miktarları elde edilmiştir. Bu değerlerde 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 36.45, 73.60, 112.15 ve 151.10 mg olarak belirlenmiştir.

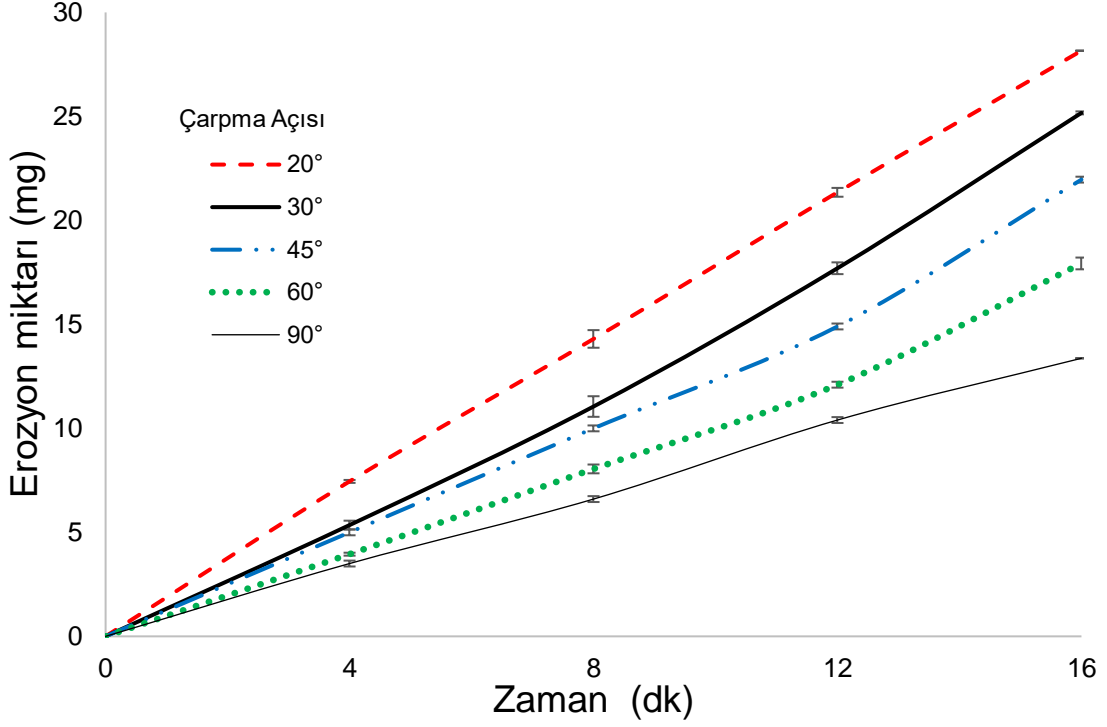
Sonuçlara bakıldığında Hardox 450 malzemesinin erozyon hasarları zamanla doğrusal arttığı görülmüştür.



Şekil 3.9. Hardox 450 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 3.10'de Ti-6Al-4V malzemesinin 100 m/s sabit hızında değişik çarpma açıları altında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere Ti-6Al-4V malzemesinde en düşük erozyon miktarı 90°'lik çarpma açısında elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda en düşük erozyon miktarı 3.50 mg olarak belirlenmiştir. Erozyon miktarları 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 6.60, 10.40 ve 13.37 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarları, her açı değeri için doğrusal olarak artmıştır. İkinci olarak en düşük erozyon miktarı 60°'lik çarpma açısında belirlenmiştir. Bu açı değerinde ise 4. dakika sonunda 3.95 mg erozyon değeri ölçülmüştür. Diğer dakikalarda (8, 12, 16) ise sırasıyla 8.05, 12.10 ve 17.93 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. 45° de erozyon miktarı 4. dakika sonunda 5.00 mg olarak ölçülmüş diğer 8., 12., 16. dakikalarda doğrusal artış göstererek sırasıyla 10.00, 14.90 ve 21.96 mg olarak ölçülmüştür. 30° lik çarpma açısında yapılan testlerde ise yine aynı dakikalardaki erozyon miktarları sırasıyla 5.35, 11.05, 17.70 ve 25.17 mg olarak belirlenmiştir. Bu malzemede en yüksek erozyon

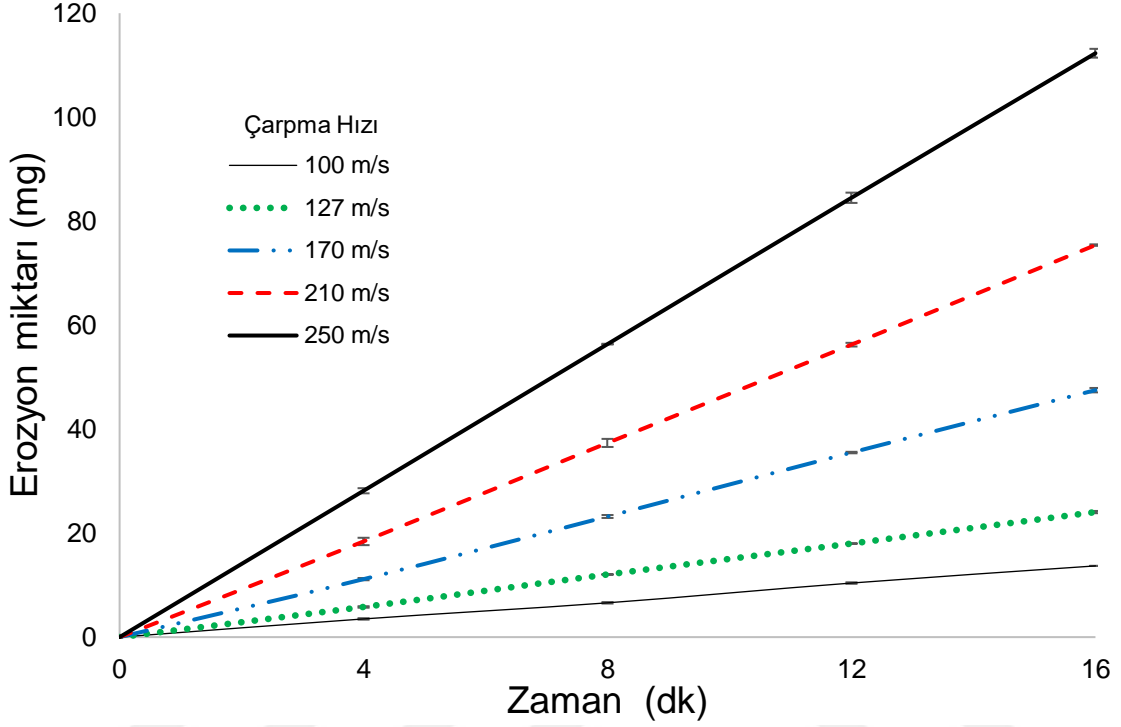
miktarı 20° de yapılan testlerde elde edilmiştir. Bu açı değeriinde ilk 4. dakika sonunda 7.45 mg olarak ölçülen erozyon miktarları doğrusal olarak artarak 8., 12., ve 16. dakika sonunda sırasıyla 14.30, 21.35 ve 28.16 mg değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 3.10. Ti-6Al-4V malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 3.11’de Ti-6Al-4V malzemesinin çarpma açısı 90° için erozyon davranışlarının çarpma hızına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değeriinde görülmekte olup, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı artmaktadır. Erozyon miktarları aynı malzeme için; 100 m/s çarpma hızında 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 3.50, 6.60, 10.40 ve 13.70 mg olarak ölçülmüşken, 127 m/s hız değeriinde sırasıyla 5.80, 12.05, 18.00 ve 24.05 mg olarak ölçülmüştür. 170 m/s hızda yapılan testlerde ise 4. dakika sonunda 11.15 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu erozyon miktarı diğer dakikalarda beklendiği gibi zamanlar doğrusal olarak artmıştır. 210 m/s hız değeriindeki testler için ise aynı dakikalar sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 18.40, 37.35, 56.25 ve 75.40 mg erozyon değeri elde edilmiştir. Son olarak 250 m/s hız değeriinde yapılan testlerde, maksimum erozyon miktarları elde edilmiştir. Bu değeriinde 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 28.15, 56.35, 84.50 ve 112.30 mg olarak belirlenmiştir.

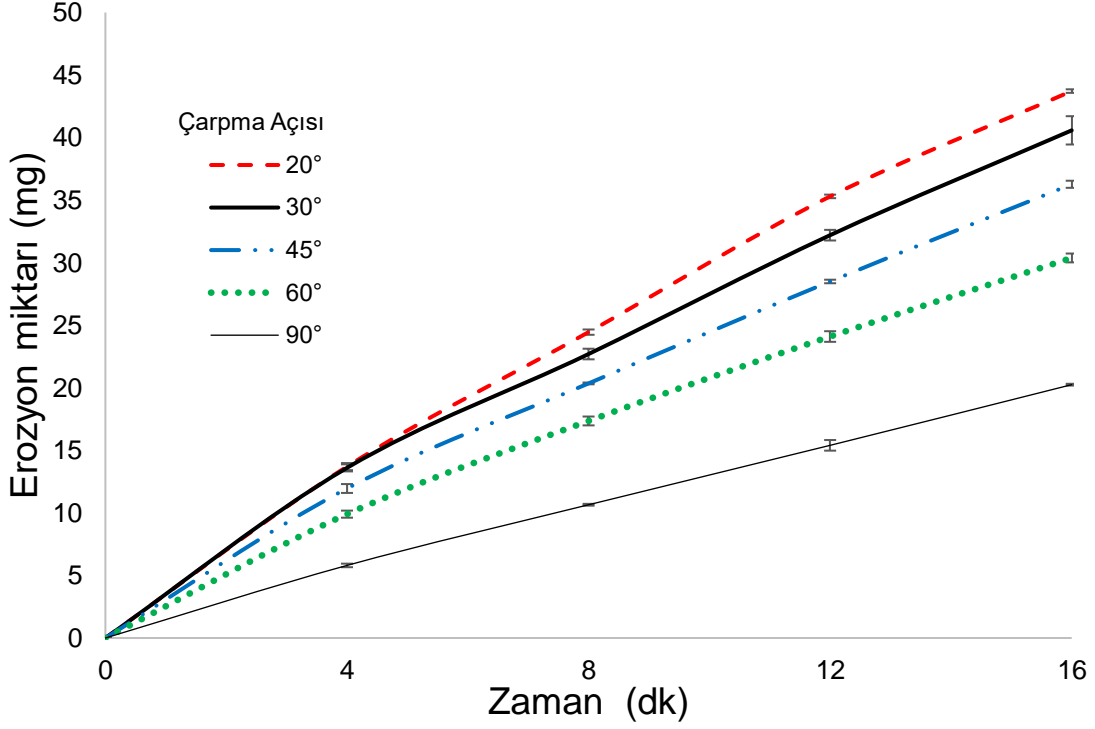
Sonuçlara bakıldığında Ti-6Al-4V malzemesinin erozyon hasarları zamanla doğrusal arttığı görülmüştür.



Şekil 3.11. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

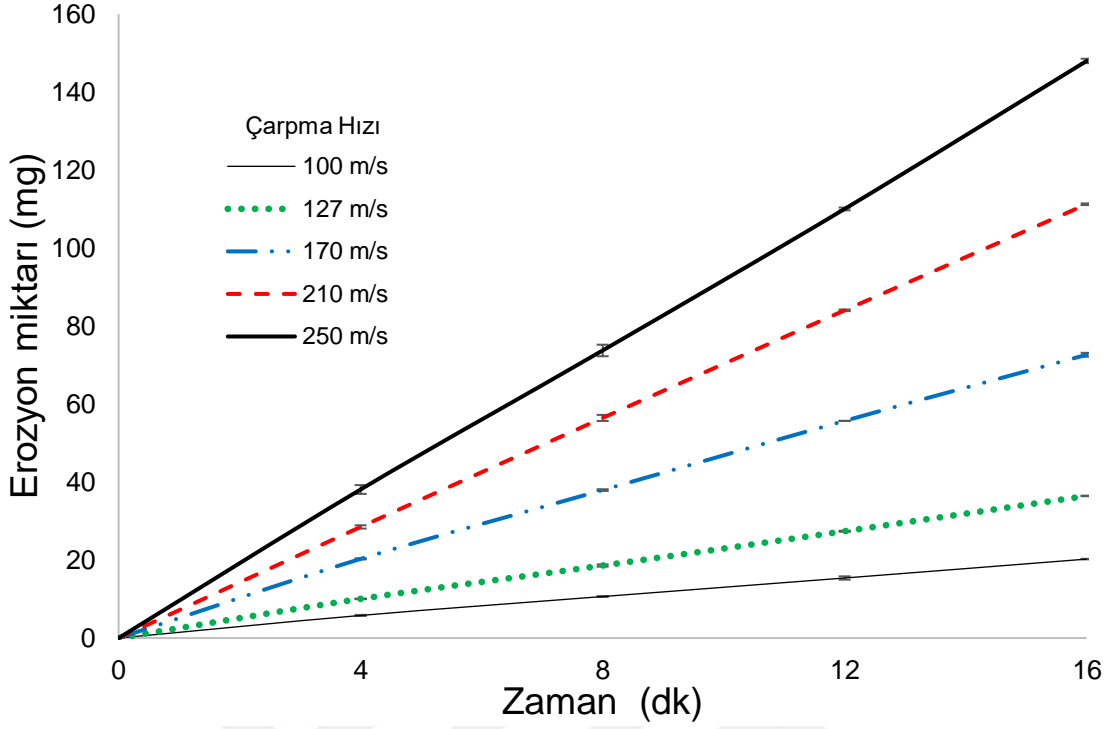
Şekil 3.12’de DP 600 çelik malzemesinin 100 m/s sabit hızında değişik çarpma açıları altında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere DP 600 malzemesinde en düşük erozyon miktarı 90°lik çarpma açısında elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda en düşük erozyon miktarı 5.80 mg olarak belirlenmiştir. Erozyon miktarları 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 10.65, 15.40 ve 20.25 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarları, her açı değeri için doğrusal olarak artmıştır. İkinci olarak en düşük erozyon miktarı 60°lik çarpma açısında belirlenmiştir. Bu açı değerinde ise 4. dakika sonunda 9.90 mg erozyon değeri ölçülmüştür. Diğer dakikalarda (8, 12, 16) ise sırasıyla 17.35, 24.10 ve 30.38 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. 45° de erozyon miktarı 4. dakika sonunda 11.95 mg olarak ölçülmüş diğer 8., 12., 16. dakikalarda doğrusal artış göstererek sırasıyla 20.35, 28.50 ve 36.27 mg olarak ölçülmüştür. 20° lik çarpma açısında yapılan testlerde ise yine aynı dakikalardaki erozyon miktarları sırasıyla 13.60, 22.70, 32.20 ve 40.58 mg olarak belirlenmiştir. Bu malzemede en yüksek erozyon

miktarı 30° de yapılan testlerde elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda 13.70 mg olarak ölçülen erozyon miktarları doğrusal olarak artarak 8., 12., ve 16. dakika sonunda sırasıyla 24.45, 35.30 ve 43.72 mg değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 3.12. DP 600 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

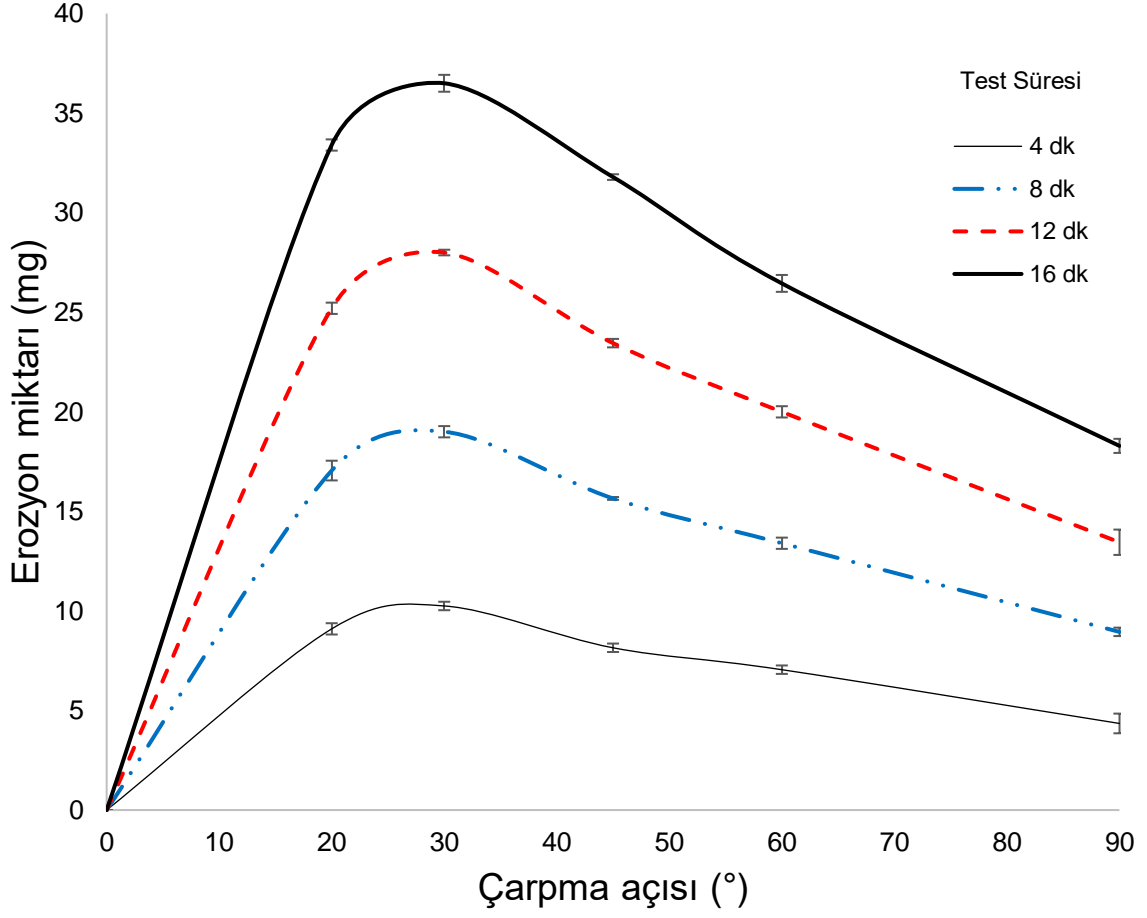
Şekil 3.13’de DP 600 çelik malzemesinin çarpma açısı 90° için erozyon davranışlarının çarpma hızına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde görülmekte olup, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı artmaktadır. Erozyon miktarları aynı malzeme için; 100 m/s çarpma hızında 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 5.80, 10.65, 15.40 ve 20.25 mg olarak ölçülmüşken, 127 m/s hız değerinde sırasıyla 10.05, 18.60, 27.40 ve 36.45 mg olarak ölçülmüştür. 170 m/s hızda yapılan testlerde ise 4. dakika sonunda 20.30 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu erozyon miktarı diğer dakikalarda beklendiği gibi zamanlar doğrusal olarak artmıştır. 210 m/s hız değerindeki testler için ise aynı dakikalar sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 28.50, 56.45, 84.05 ve 111.25 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. Son olarak 250 m/s hız değerinde yapılan testlerde, maksimum erozyon miktarları elde edilmiştir. Bu değerlerde 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 38.10, 73.75, 110.05 ve 148.00 mg olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.13. DP 600 malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

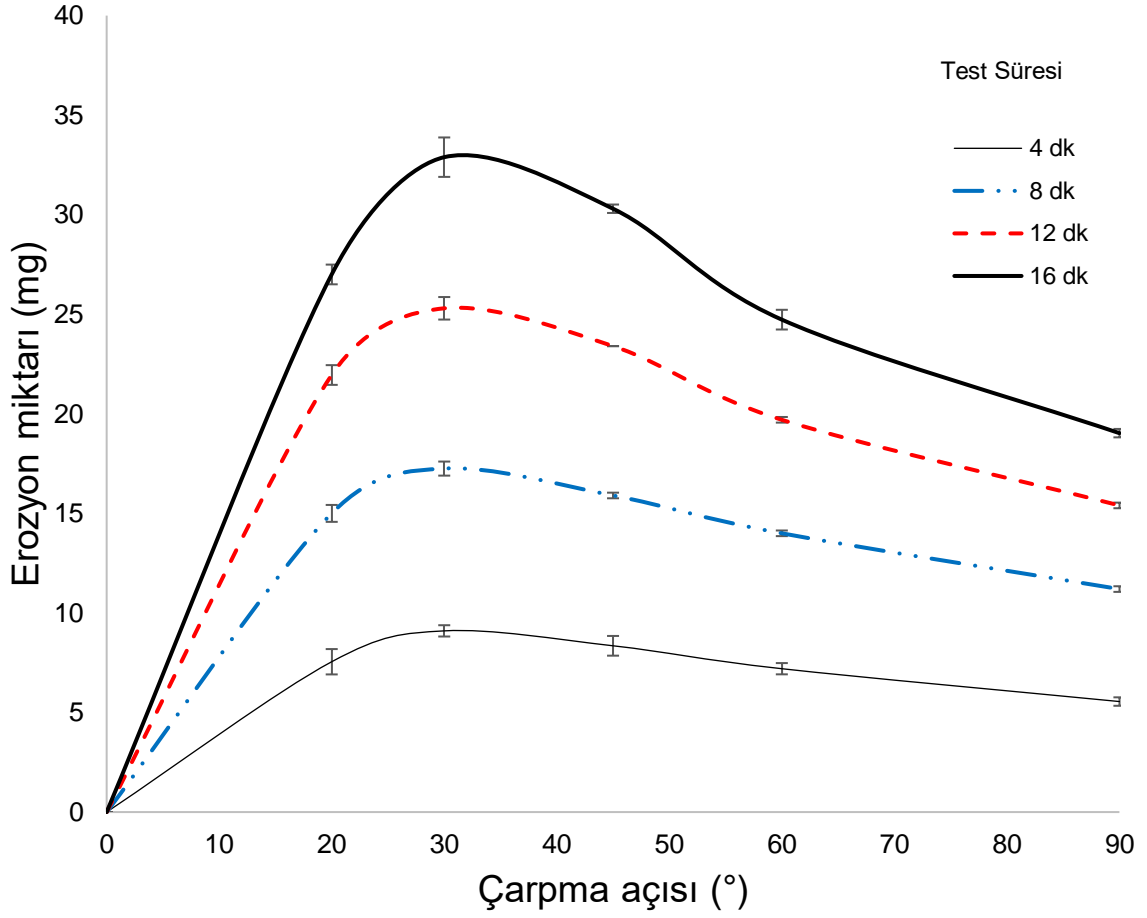
3.1.2. Erozyon Miktarının Çarpma Açısına Göre Değişimi

Şekil 3.14'de AISI 1020 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi grafiği verilmiştir. Grafikte her 4 dakika sonundaki farklı çarpma açıları (20, 30, 45, 60 ve 90°) oluşan erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 90° 'deki çarpma açısında 4.35 mg olarak elde edilmiştir. Erozyon miktarları çarpma açısı 60° , 45° ve 30° için sırasıyla 7.05 mg, 8.15 mg ve 10.25 mg değerlerine yükselmiş, çarpma açısı 20° de ise erozyon miktarı 9.10 mg değerine düşmüştür.



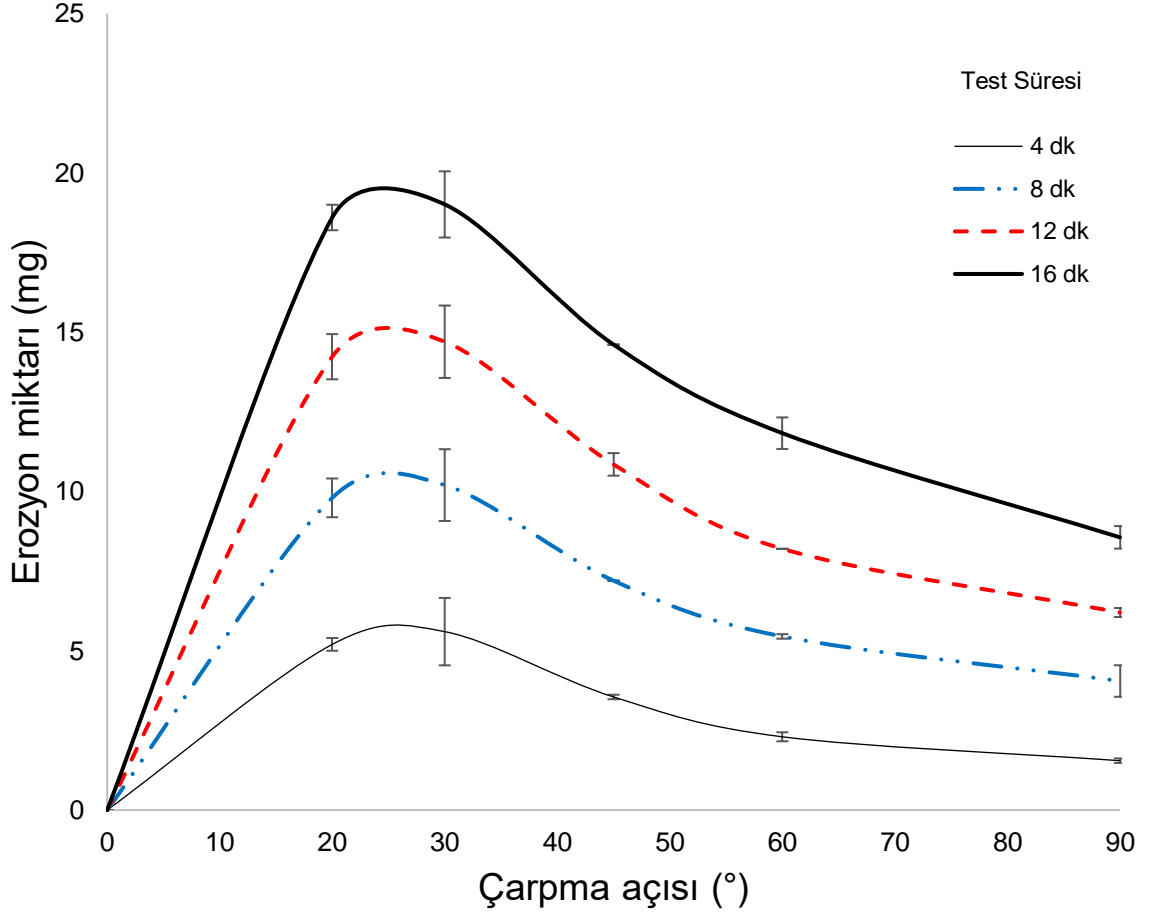
Şekil 3.14. AISI 1020 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.15’de SS 304 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi grafiği verilmiştir. Grafikte her 4 dakika sonundaki farklı çarpma açılarında (20, 30, 45, 60 ve 90°) oluşan erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 90°’deki çarpma açısında 5.55 mg olarak elde edilmiştir. Erozyon miktarları çarpma açısı 60°, 45° ve 30° için sırasıyla 7.20 mg, 8.35 mg ve 9.10 mg değerlerine yükselmiş, çarpma açısı 20° de ise erozyon miktarı 7.55 mg değerine düşmüştür.



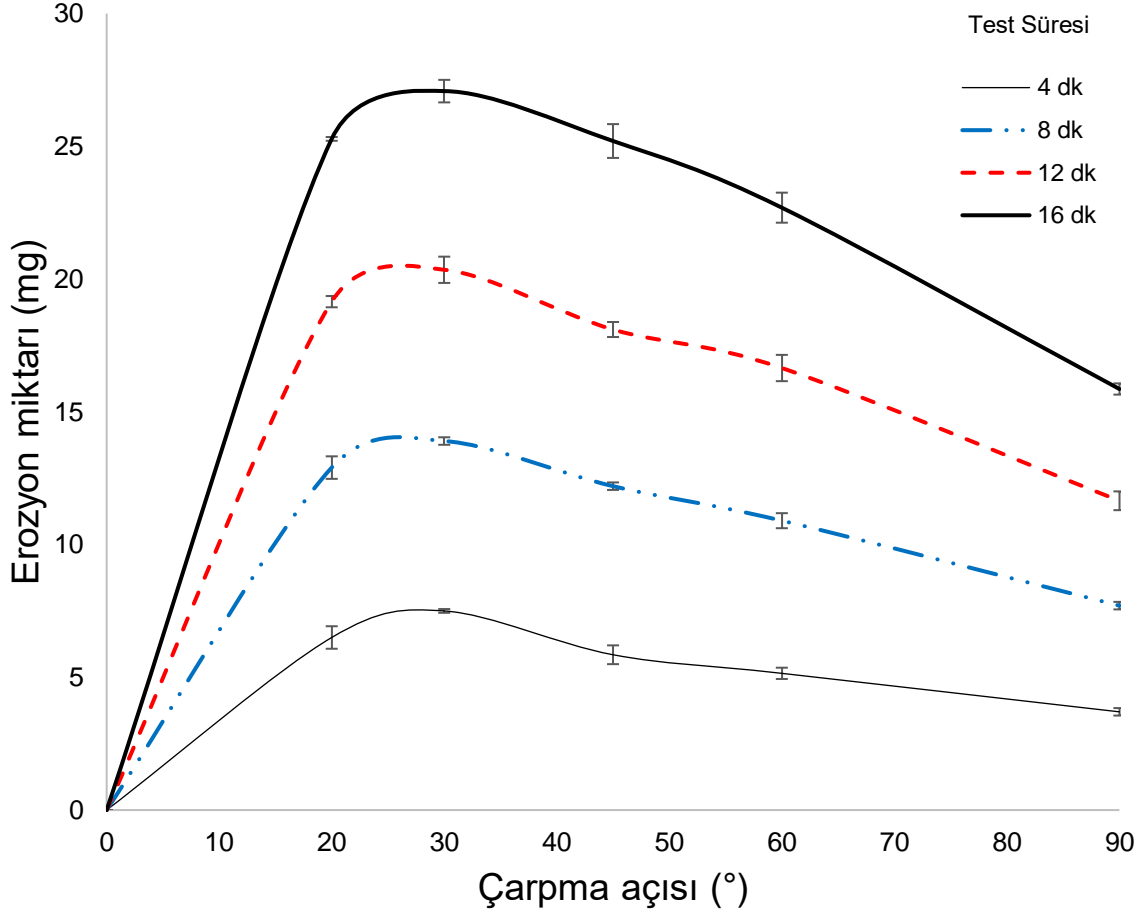
Şekil 3.15. SS 304 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.16'de AA 6061 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi grafiği verilmiştir. Grafikte her 4 dakika sonundaki farklı çarpma açıları (20, 30, 45, 60 ve 90°) oluşan erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 90°deki çarpma açısında 1.55 mg olarak elde edilmiştir. Erozyon miktarları çarpma açısı 60°, 45° ve 30° için sırasıyla 2.30 mg, 3.55 mg ve 5.60 mg değerlerine yükselmiş, çarpma açısı 20° de ise erozyon miktarı 5.20 mg değerine düşmüştür.



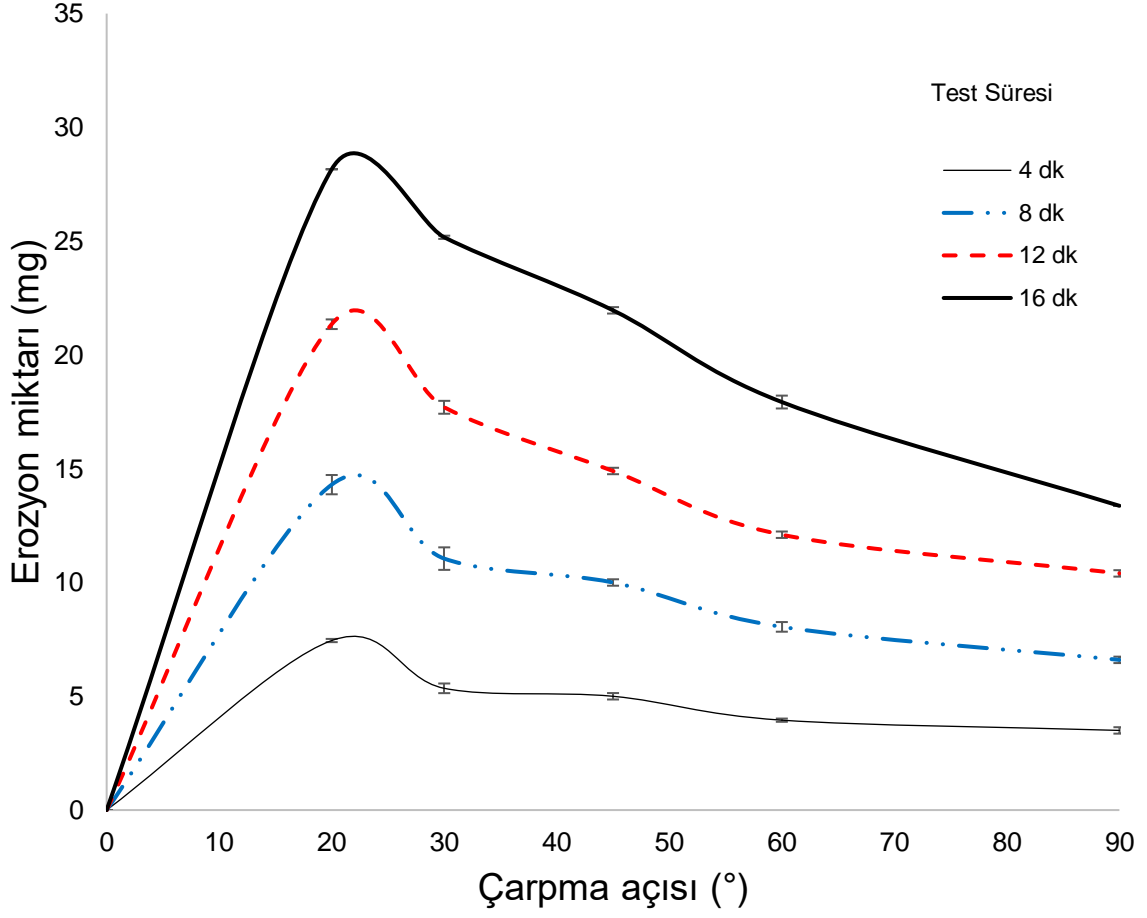
Şekil 3.16. AA 6061 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.17’de Hardox 450 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi grafiği verilmiştir. Grafikte her 4 dakika sonundaki farklı çarpma açıları (20, 30, 45, 60 ve 90°) oluşan erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 90°’deki çarpma açısında 3.70 mg olarak elde edilmiştir. Erozyon miktarları çarpma açısı 60°, 45° ve 30° için sırasıyla 5.15 mg, 5.85 mg ve 7.50 mg değerlerine yükselmiş, çarpma açısı 20° de ise erozyon miktarı 6.50 mg değerine düşmüştür.



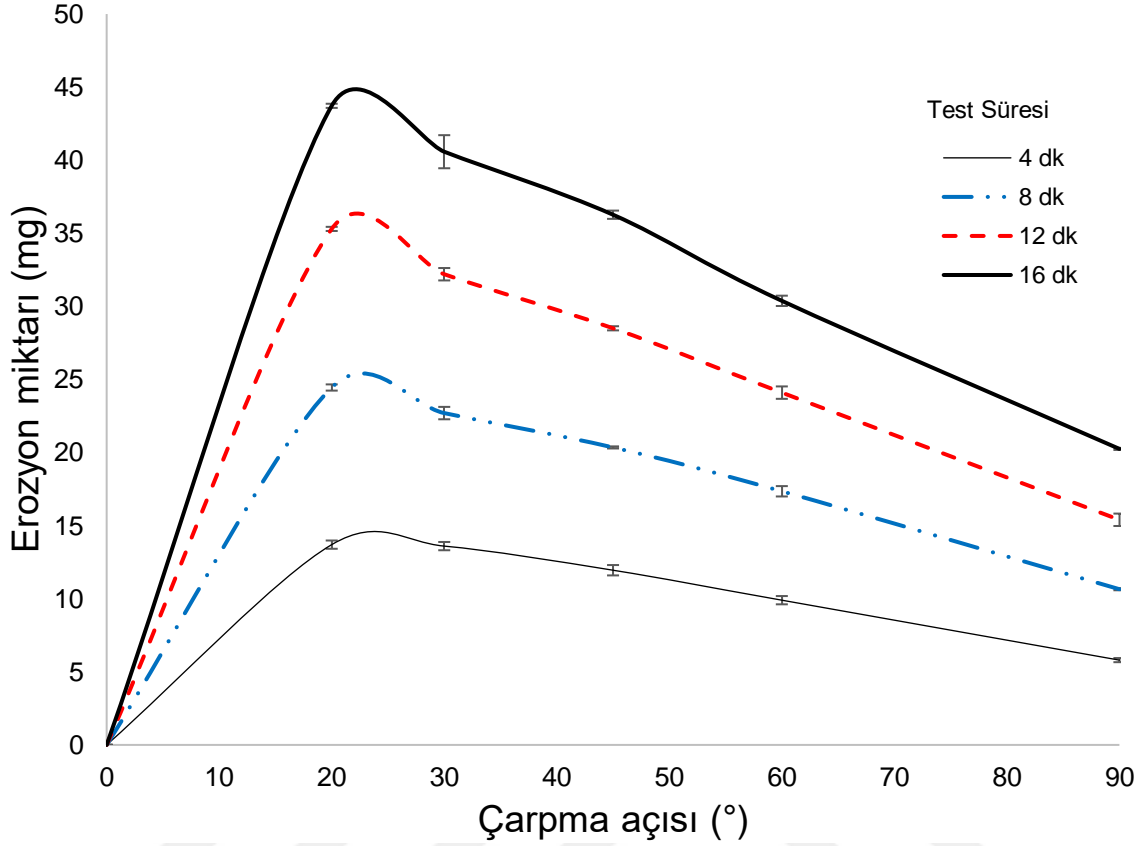
Şekil 3.17. Hardox 450 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.18’de Ti-6Al-4V malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi grafiği verilmiştir. Grafikte her 4 dakika sonundaki farklı çarpma açıları (20, 30, 45, 60 ve 90°) oluşan erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 90°’deki çarpma açısında 3.50 mg olarak elde edilmiştir. Erozyon miktarları çarpma açısı 60°, 45° ve 30° için sırasıyla 3.95 mg, 5.00 mg ve 5.35 mg değerlerine yükselip, çarpma açısı 20° de ise erozyon miktarı 7.45 mg değerinde maksimum değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.18. Ti-6Al-4V malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

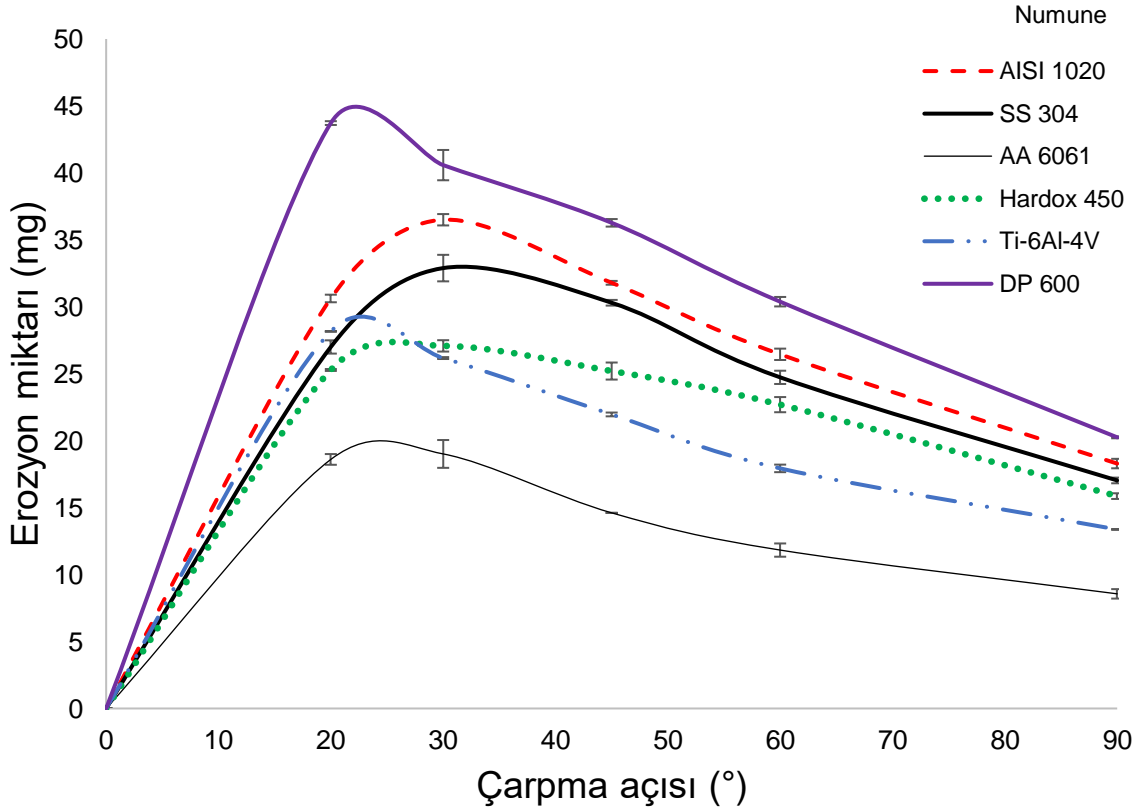
Şekil 3.19’de DP 600 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi grafiği verilmiştir. Grafikte her 4 dakika sonundaki farklı çarpma açıları (20, 30, 45, 60 ve 90°) oluşan erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 90°’deki çarpma açısında 5.80 mg olarak elde edilmiştir. Erozyon miktarları çarpma açısı 60°, 45° ve 30° için sırasıyla 9.90, mg, 11.95 mg ve 13.60 mg değerlerine yükselmiş, çarpma açısı 20° de ise erozyon miktarı 13.70 mg değerinde maksimum değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.19. DP 600 malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.20’de tüm malzemeler için 100 m/s çarpma hızında 16 dakika sonunda kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde kütleli erozyon miktarı bakımından en kötü erozyon davranışını DP 600 malzemesinde elde edilmişken en iyi erozyon davranışı AA 6061 malzemesinde elde edilmiştir. Şekilden erozyon miktarı DP 600 malzemesi için 20° çarpma açısında 16. dakika sonunda 43.70 mg’a yükselmiştir. Bu erozyon miktarı, diğer malzemelere göre en yüksek erozyon miktarıdır. İkinci en kötü erozyon davranışını ise AISI 1020 malzemesinde elde edilmiştir. AISI 1020 malzemesinde en yüksek erozyon miktarı 30° lik çarpma açısında 36.40 mg olarak gerçekleşmiştir. Bu iki malzeme arasında 100 m/s çarpma hızı oluşan erozyon testlerinde 7.4 mg lik bir aşınma miktarı fark oluşmuştur. Erozyon testlerinde en çok aşınmaya maruz üçüncü malzeme ise SS 304 paslanmaz çelik olmuştur. Bu malzememizde 100 m/s hızda 16. dakika sonunda maksimum erozyon aşınması 30° çarpma açısında yapılan testlerde 33.50 mg olarak gerçekleşmiştir. Bu malzemedeki aşınma miktarı AISI 1020 çeliğinin aşınma

miktarına çok yakındır. Hardox 450 malzemesi DP 600, AISI 1020, SS 304 malzemelerine göre iyi kütle erozyon miktarı performansı sergilemiştir. Ti-6Al-4V ile Hardox 450 malzemelerinde oluşan maksimum erozyon miktarları birbirine çok yakındır. Fakat çarpma açısı arttığında, Hardox 450 malzemesinin erozyon dayanımı Ti-6Al-4V ye göre kötüleşmektedir. Bu açılardaki erozyon kayıplarına kütleli bakıldığında Ti-6Al-4V malzemesinin Hardox 450'ye göre daha iyi bir erozyon performansı sergilemiştir. AA 6061 malzemesi ise kütleli erozyon kaybına bakımından en iyisidir. Bu malzemede maksimum erozyon miktarı çarpma açısı 30° de 19.00 mg olarak gerçekleşmiştir. DP 600 deki erozyonla karşılaştırıldığında, AA 6061 malzemesi %56 daha az hasara uğramıştır.

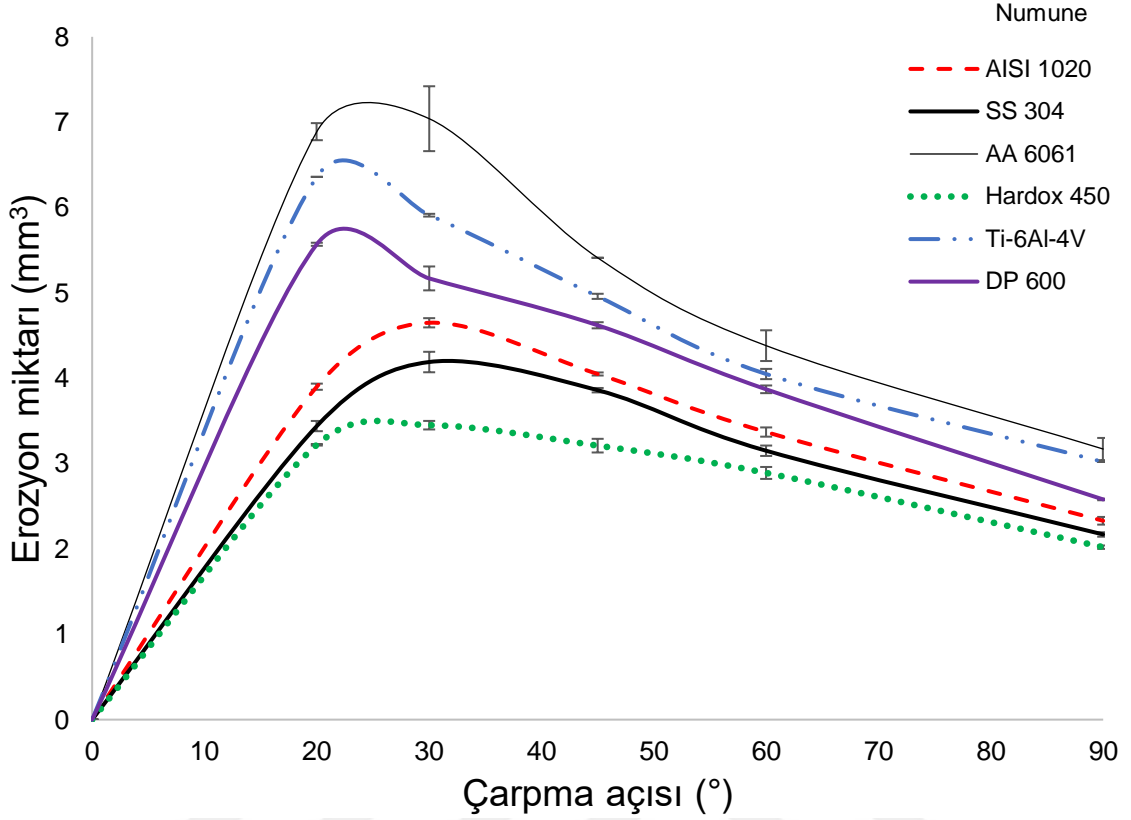


Şekil 3.20. Tüm malzemelerin 100 m/s parçacık hızı altında 16 dakika sonunda oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.21'de tüm malzemelerde 16 dakika sonunda oluşan hacimsel erozyon miktarları karşılaştırılmaktadır. Grafik incelendiğinde kütleli olarak en iyi erozyon dayanımı gösteren malzeme olan AA 6061 bu sefer en kötü hacimsel erozyon miktarına

sahip olmaktadır. Çünkü AA 6061 malzeme diğer malzemelere göre en düşük yoğunluğa sahip olduğundan dolayı hacimsel olarak en yüksek erozyon miktarına sahip malzeme olmaktadır. Bu malzeme de en yüksek hacimsel erozyon miktarı 30°'lik çarpma açısında 7.04 mm³ olarak ölçülmüştür. İkinci sırada en kötü erozyon davranışı sergileyen malzeme Ti-6Al-4V malzemesi olmaktadır. Bu malzemenin yoğunluğu da diğer çelik malzemelere göre daha düşük olduğundan hacimsel olarak erozyon miktarı yüksek olmaktadır. Bu malzemede maksimum hacimsel erozyon miktarı 6.36 mm³ değeri ile 20°'lik çarpma açısında meydana gelmiştir. DP 600 malzemesi önceki iki malzemeye göre daha iyi bir hacimsel erozyon dayanımına sahiptir. DP 600 çelik bir malzeme türü olduğundan yoğunluğu AA 6061 ve Ti-6Al-4V' a göre daha fazladır. Bu sebeple hacimsel erozyon miktarı bu iki malzemedan fazla olmaktadır. Bu malzemede ise maksimum erozyon miktarı 20°' lik çarpma açısında meydana gelmiştir. Bu açıdaki hacimsel erozyon miktarı 5.57 mm³ olarak ölçülmüştür.

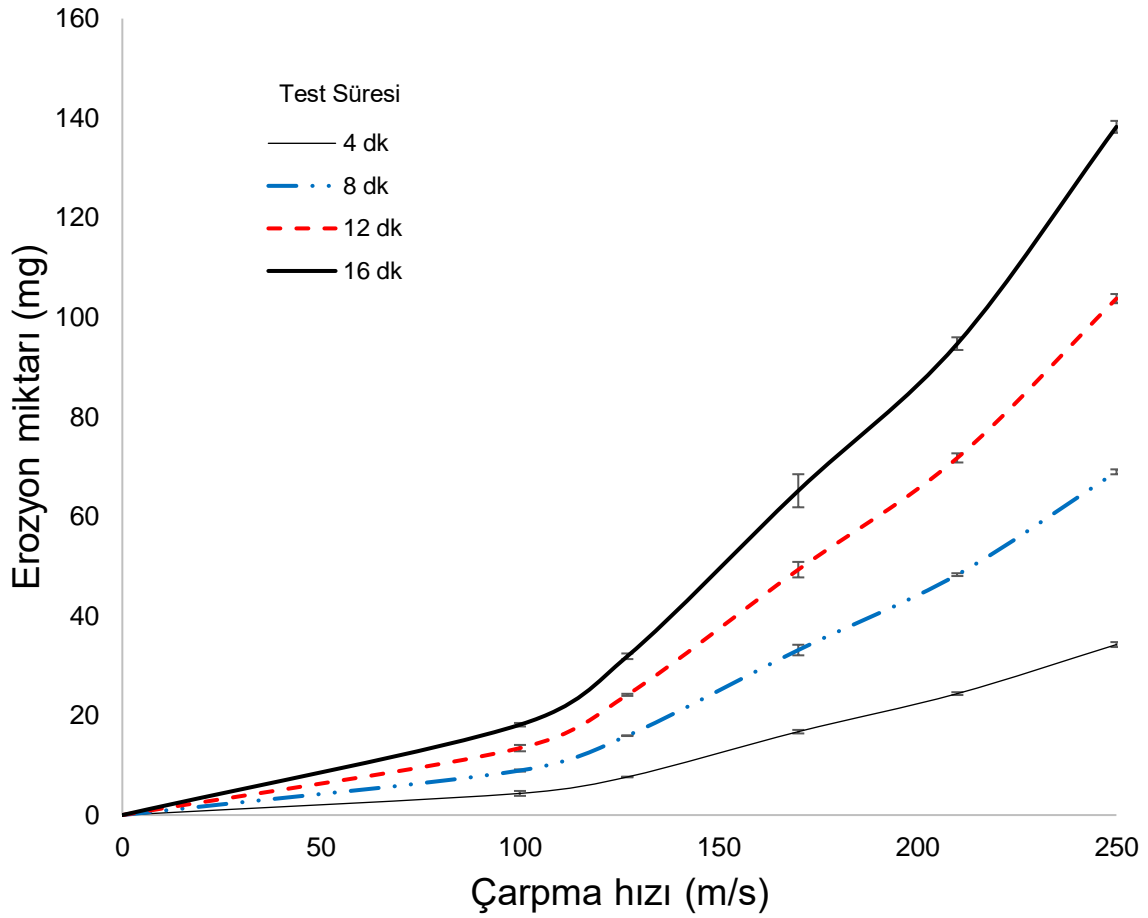
Geriye kalan üç çelik malzeme türünün (AISI 1020, SS 304, Hardox 450) erozyon davranışı diğerlerine göre çok iyi seviyelerdedirler. Bu malzemelerden hacimsel erozyon miktarları kötüden iyiye doğru sırayla AISI 1020, SS 304 ve Hardox 450 olmaktadır. Hacimsel erozyon miktarı en iyi olan malzeme kütleli erozyon miktarı en kötü olan Hardox 450 malzemesidir. Bu malzemedeki en yüksek hacimsel erozyon miktarı 3,45 mm³ olarak 30°' deki çarpma açısında olmaktadır. İkinci en iyi hacimsel erozyon miktarı sahip olan SS 304 malzemesidir. Bu malzemede en yüksek hacimsel erozyon miktarı 30°'lik çarpma açısında olmaktadır ve bu değer 4,19 mm³ olarak gerçekleşmektedir. Son olarak bu iki malzemedan biraz daha kötü bir hacimsel erozyon miktarı sergileyen AISI 1020 malzemesi gelmektedir. Bu malzemede yine 30°'lik çarpma açısı hacimsel erozyon miktarı en yüksek olduğu açı değeri olup, bu açı değerinden hacimsel erozyon miktarı 4,65 mm³ olmaktadır.



Şekil 3.21. Tüm malzemelerin 100 m/s parçacık hızı altında 16 dakika sonunda oluşan hacimsel erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimlerinin karşılaştırılması

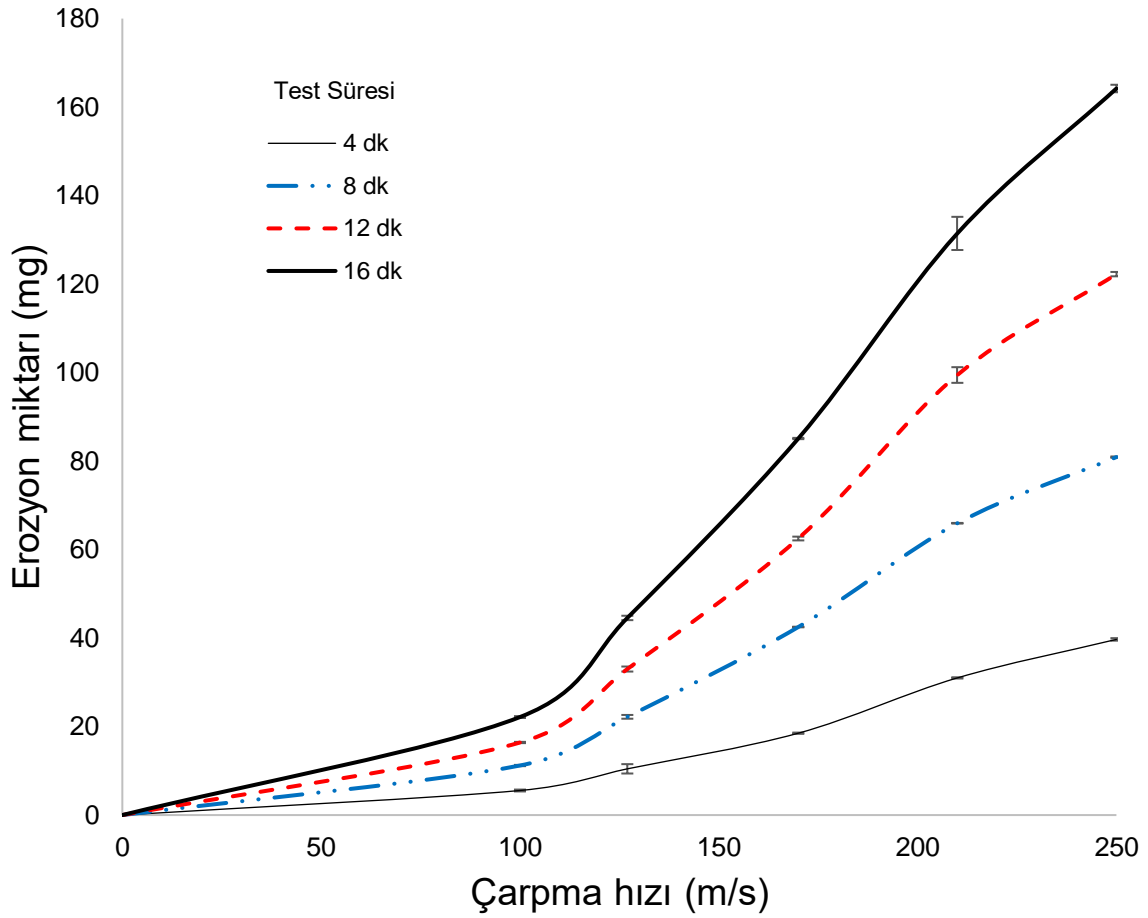
3.1.3. Erozyon Miktarının Çarpma Hızına Göre Değişimi

Şekil 3.22’de AISI 1020 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma hızına göre değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Grafikte her 4 dakika sonunda farklı çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) yapılan testlerde erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde 4.35 mg olarak ölçülmüştür. Hız değeri arttıkça erozyon miktarı da artmakta olup sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s hız değerlerinde, 7.65, 16.75, 24.40 ve 34.25 mg değerine ulaşmıştır. Test süresi arttıkça erozyon miktarı da doğrusal artmaktadır. Bu malzeme türünde en yüksek basınç değeri olan 250 m/s hızda yapılan testlerde 8, 12 ve 16. dakikalarda ki erozyon miktarları da sırasıyla 68.95, 103.75 ve 138.25 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarı her bir zaman değeri için çarpma hızına göre doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.



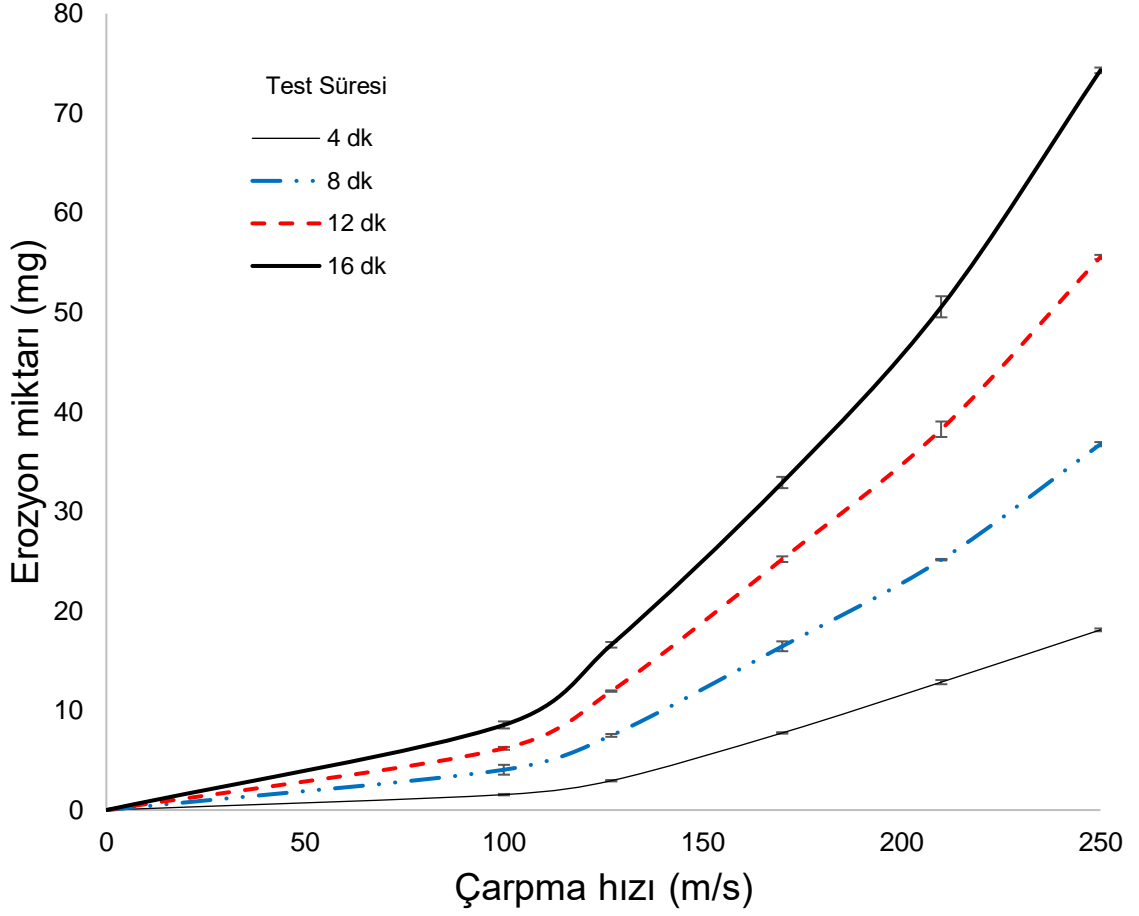
Şekil 3.22. AISI 1020 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.23’de SS 304 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma hızına göre değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Grafikte her 4 dakika sonunda farklı çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) yapılan testlerde erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde 5.55 mg olarak ölçülmüştür. Hız değeri arttıkça erozyon miktarı da artmakta olup sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s hız değerlerinde, 10.45, 18.50, 31.00 ve 39.70 mg değerine ulaşmıştır. Test süresi arttıkça erozyon miktarı da doğrusal artmaktadır. Bu malzeme türünde en yüksek basınç değeri olan 250 m/s hızda yapılan testlerde 8, 12 ve 16. dakikalarda ki erozyon miktarları da sırasıyla 80.90, 122.25 ve 164.20 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarı her bir zaman değeri için çarpma hızına göre doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.



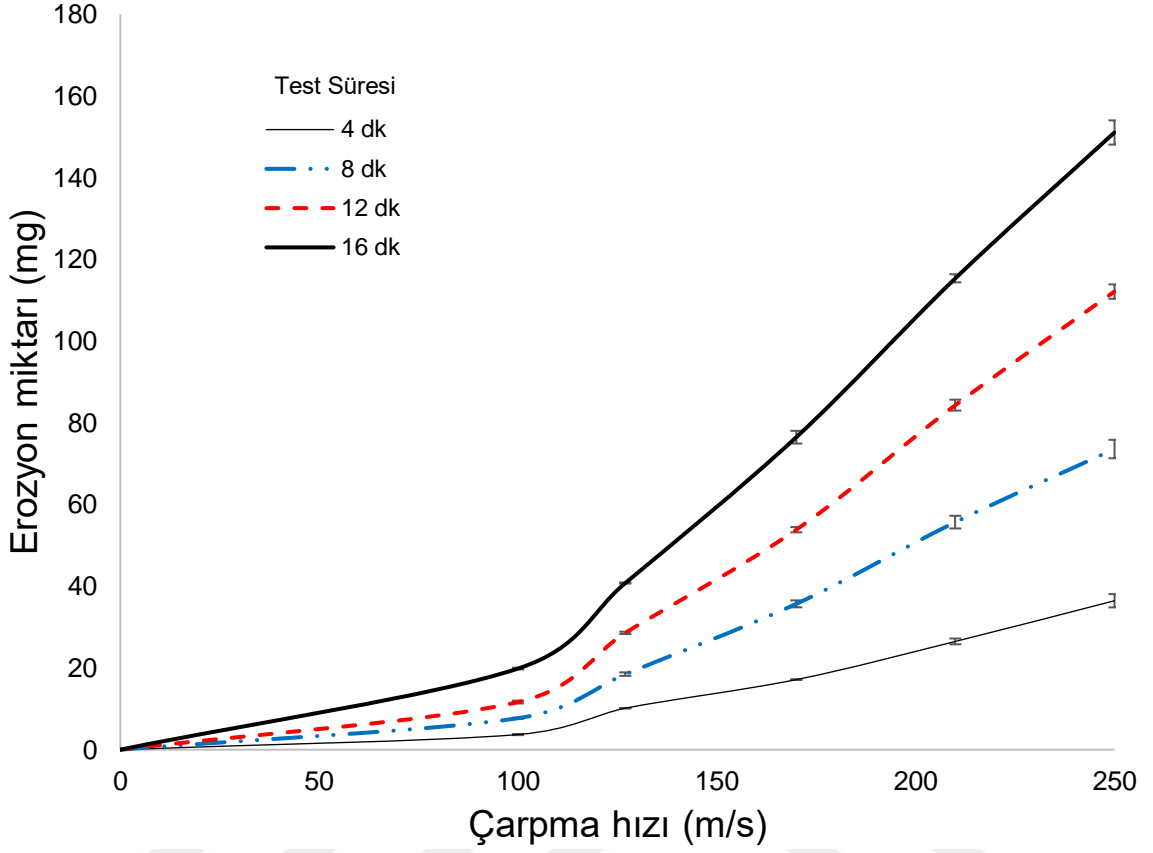
Şekil 3.23. SS 304 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.24'de AA 6061 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma hızına göre değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Grafikte her 4 dakika sonunda farklı çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) yapılan testlerde erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde 1.55 mg olarak ölçülmüştür. Hız değeri arttıkça erozyon miktarı da artmakta olup sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s hız değerlerinde, 2.95, 7.75, 12.85 ve 18.10 mg değerine ulaşmıştır. Test süresi arttıkça erozyon miktarı da doğrusal artmaktadır. Bu malzeme türünde en yüksek basınç değeri olan 250 m/s hızda yapılan testlerde 8, 12 ve 16. dakikalarda ki erozyon miktarları da sırasıyla 36.75, 55.55 ve 74.30 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarı her bir zaman değeri için çarpma hızına göre doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.



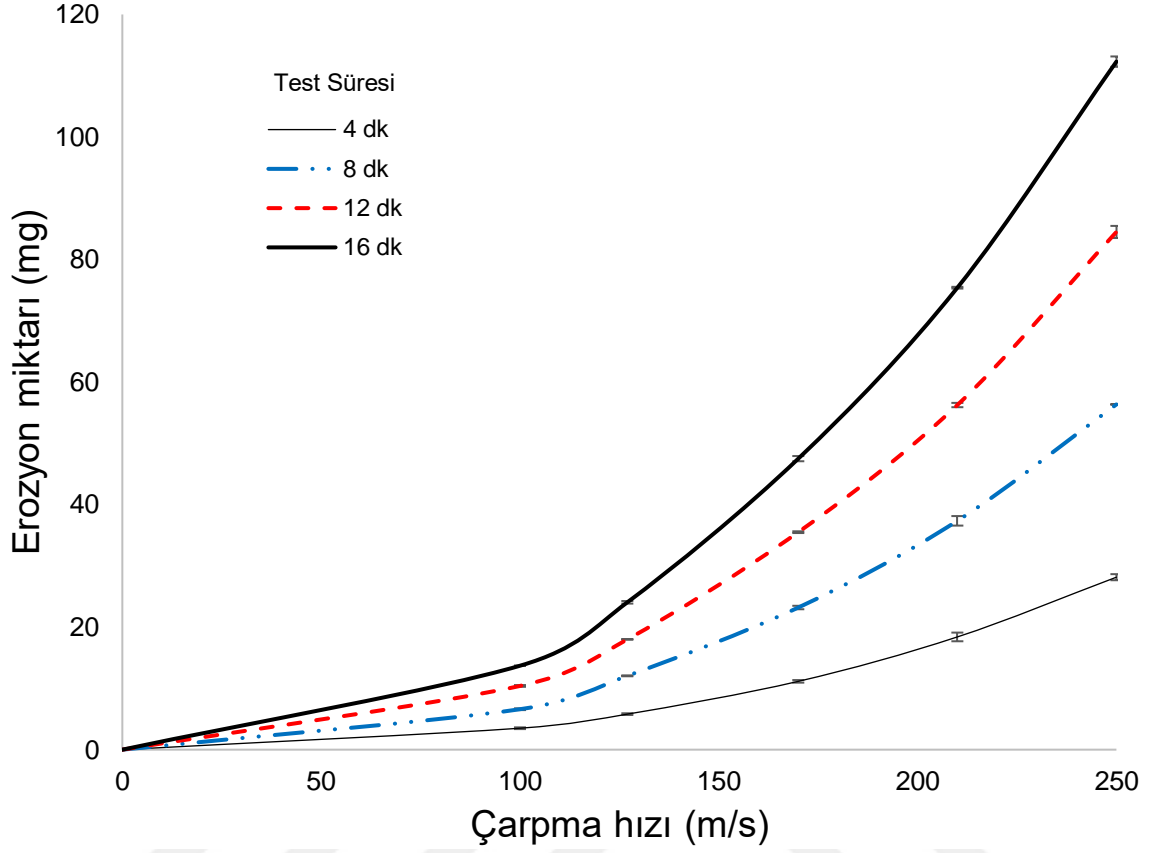
Şekil 3.24. AA 6061 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.25’de Hardox 450 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma hızına göre değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Grafikte her 4 dakika sonunda farklı çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) yapılan testlerde erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde 3.70 mg olarak ölçülmüştür. Hız değeri arttıkça erozyon miktarı da artmakta olup sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s hız değerlerinde, 10.15, 17.15, 26.50 ve 36.45 mg değerine ulaşmıştır. Test süresi arttıkça erozyon miktarı da doğrusal artmaktadır. Bu malzeme türünde en yüksek basınç değeri olan 250 m/s hızda yapılan testlerde 8, 12 ve 16. dakikalarda ki erozyon miktarları da sırasıyla 73.60, 112.15 ve 151.10 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarı her bir zaman değeri için çarpma hızına göre doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.



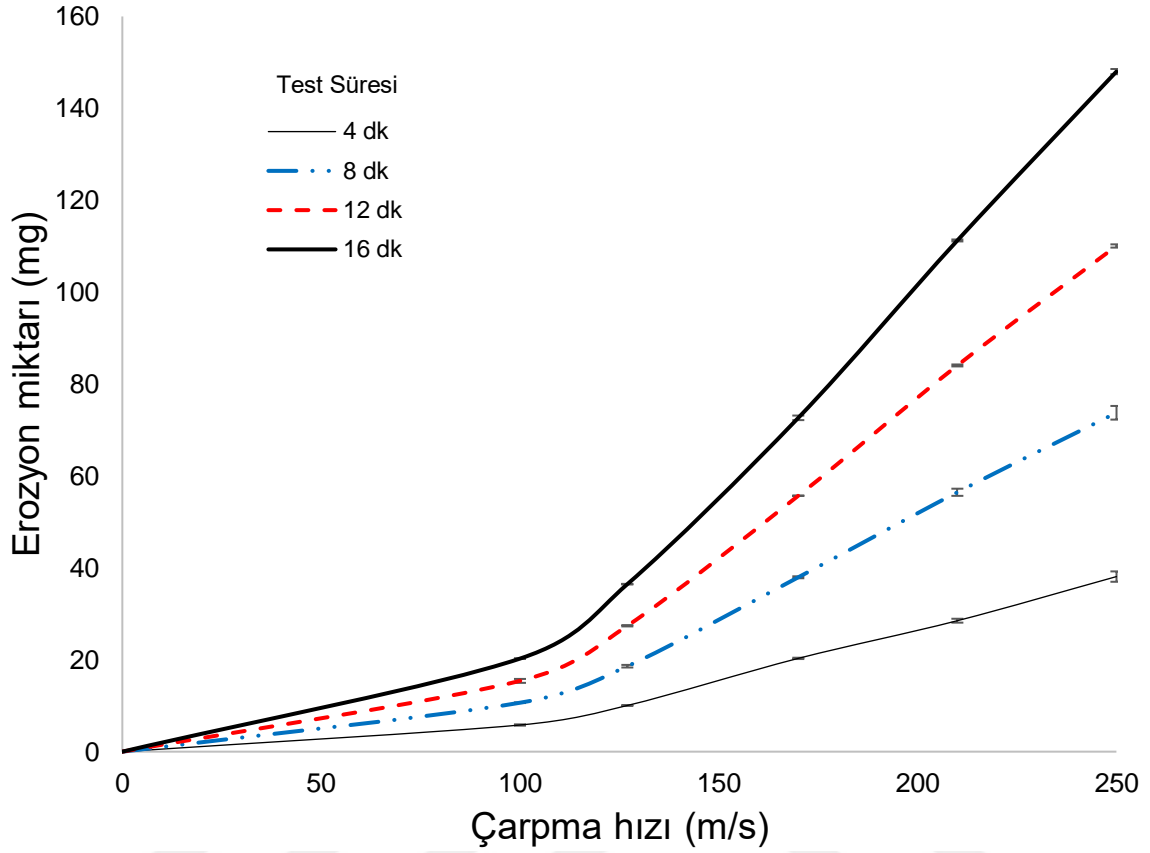
Şekil 3.25. Hardox 450 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.26'de Ti-6Al-4V malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma hızına göre değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Grafikte her 4 dakika sonunda farklı çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) yapılan testlerde erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde 3.50 mg olarak ölçülmüştür. Hız değeri arttıkça erozyon miktarı da artmakta olup sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s hız değerlerinde, 5.80, 11.15, 18.40 ve 28.15 mg değerine ulaşmıştır. Test süresi arttıkça erozyon miktarı da doğrusal artmaktadır. Bu malzeme türünde en yüksek basınç değeri olan 250 m/s hızda yapılan testlerde 8, 12 ve 16. dakikalarda ki erozyon miktarları da sırasıyla 56.35, 84.50 ve 112.30 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarı her bir zaman değeri için çarpma hızına göre doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.



Şekil 3.26. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi

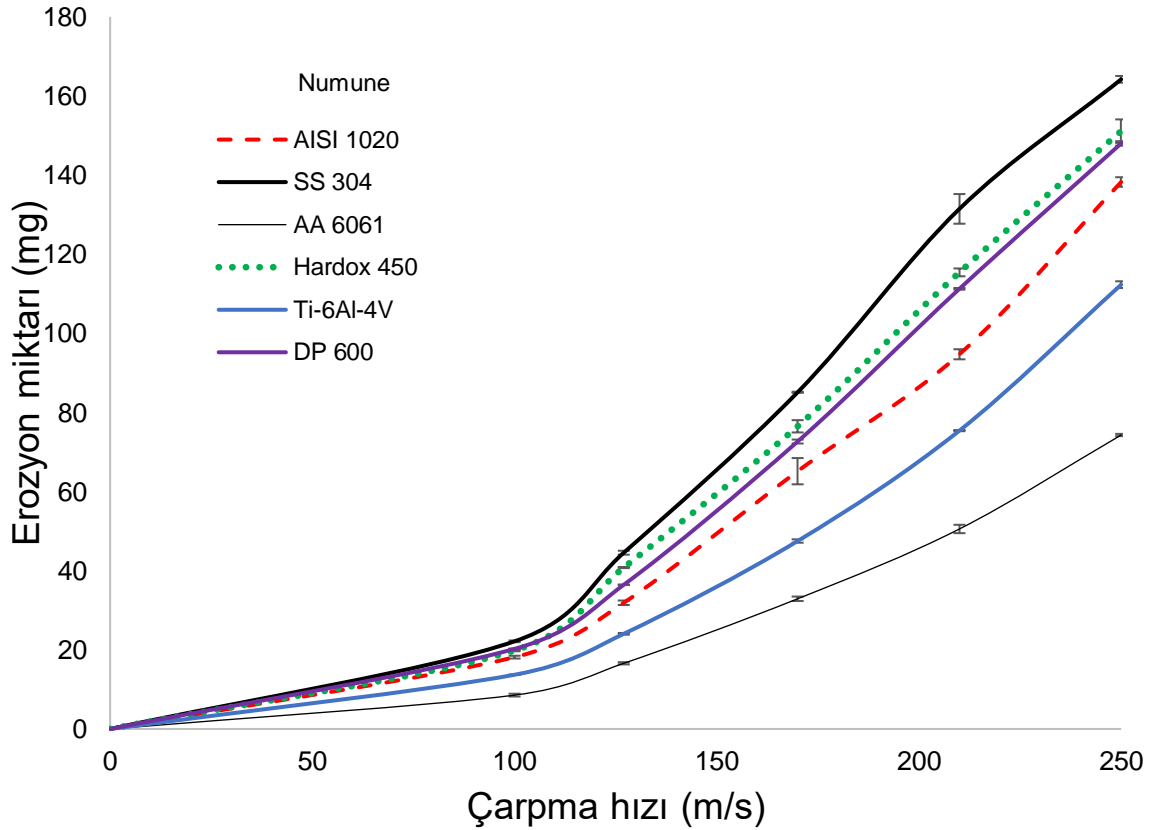
Şekil 3.27’de DP 600 malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma hızına göre değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Grafikte her 4 dakika sonunda farklı çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) yapılan testlerde erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde 5.80 mg olarak ölçülmüştür. Hız değeri arttıkça erozyon miktarı da artmakta olup sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s hız değerlerinde, 10.05, 20.30, 28.50 ve 38.10 mg değerine ulaşmıştır. Test süresi arttıkça erozyon miktarı da doğrusal artmaktadır. Bu malzeme türünde en yüksek basınç değeri olan 250 m/s hızda yapılan testlerde 8, 12 ve 16. dakikalarda ki erozyon miktarları da sırasıyla 73.75, 110.05 ve 148.00 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarı her bir zaman değeri için çarpma hızına göre doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.



Şekil 3.27. DP 600 malzemesinde 90° çarpma açısında altında oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi

Şekil 3.28’de tüm malzemelerde 16 dakika sonunda değişik hız değerlerinde (100, 127, 170, 210 ve 250 m/s) oluşan kütleli erozyon miktarları bir arada verilmiştir. Grafik incelendiğinde kütleli erozyon miktarı bakımından en kötü erozyon davranışı SS 304 malzemesinde görülmektedir. Bu malzemedeki 100 m/s hız değerinde, 22.15 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Hız değeri sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s seviyelerine arttırıldığında kütleli erozyon miktarları da 44.55, 85.10, 131.45 ve 164.20 mg değerine ulaşmaktadır. Hardox 450 malzemesindeki kütleli erozyon miktarı SS 304 çeliğine göre biraz daha iyi görülmüştür. Bu malzemedeki 100 m/s hız değerinde 19.85 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Hız değeri sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s seviyelerine arttırıldığında kütleli erozyon miktarları da 40.80, 76.50, 115.40 ve 151.10 mg değerine yükselmiştir. En kötü erozyon davranışı sergileyen üçüncü malzeme DP 600 çeliğidir. Bu malzemedeki 100 m/s hız değerinde 20.25 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Hız değeri sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s seviyelerine arttırıldığında kütleli erozyon miktarı da 36.45, 72.65, 111.25 ve

148.00 mg değerine yükselmektedir. AISI 1020 çeliğinin erozyon davranışı diğer üç malzemeden (SS 304, Hardox 450, DP 600) daha iyidir. Bu malzemede ise 100 m/s hız değerindeki erozyon miktarı 18.15 mg değerine düşmektedir. Hız değeri sırasıyla 100, 127, 170, 210 ve 250 m/s seviyelerine arttırıldığında kütleli erozyon miktarları da 31.90, 65.15, 94.70 ve 138.25 mg değerine yükselmektedir. Ti-6Al-4V ve AA 6061 malzemeleri ise en iyi kütleli erozyon performansı sergileyen malzemelerdir. Ti-6Al-4V malzemesi için 100 m/s hız değerindeki erozyon miktarı 13.70 mg değerine düşmüştür. Hız değeri sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s seviyelerine arttırıldığında ise kütleli erozyon miktarı 24.05, 47.50, 75.40 ve 112.30 mg değerine yükselmiştir. AA 6061 malzemesi kütleli olarak en düşük erozyon miktarına sahiptir. Bu malzemede 100 m/s hız değerinde yapılan testlerde 8.55 mg olarak en düşük erozyon miktarı değeri elde edilmiştir. Diğer hız değerlerinde (127, 170, 210 ve 250 m/s) ise sırasıyla 16.60, 32.90, 50.55 ve 74.30 mg erozyon miktarları elde edilmiştir. En yüksek erozyon miktarına sahip olan SS 304 malzemesindeki 164.20 mg'lık erozyon değerinin yarısı seviyelerdedir.



Şekil 3.28. 90° sabit çarpma açısında tüm malzemelerde 16. dakika sonunda oluşan kütleli erozyon miktarının parçacık çarpma hızına göre karşılaştırılması

Şekil 3.29'de tüm malzemelerde 16. dakika sonunda oluşan hacimsel erozyon miktarları karşılaştırılmaktadır.

Grafik incelendiğinde hacimsel erozyon miktarı en yüksek olan malzeme türümüz kütleli olarak en iyi erozyon dayanımı gösteren malzeme olan AA 6061 bu sefer en kötü hacimsel erozyon miktarına sahip olmaktadır. Bunun nedeni daha öncede belirtildiği gibi yoğunluğunun diğer malzemelere oranla çok düşük olmasıdır. Bu malzemede 850 mbar basınç değerinde 16. dakika sonunda 3.17 mm^3 erozyon miktarı ölçülmüştür. Hız değerleri sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s değerlerine çıkarıldığında hacimsel erozyon miktarları da sırasıyla 6.15, 12.19, 18.72 ve 27.52 mm^3 seviyelerine çıkmaktadır.

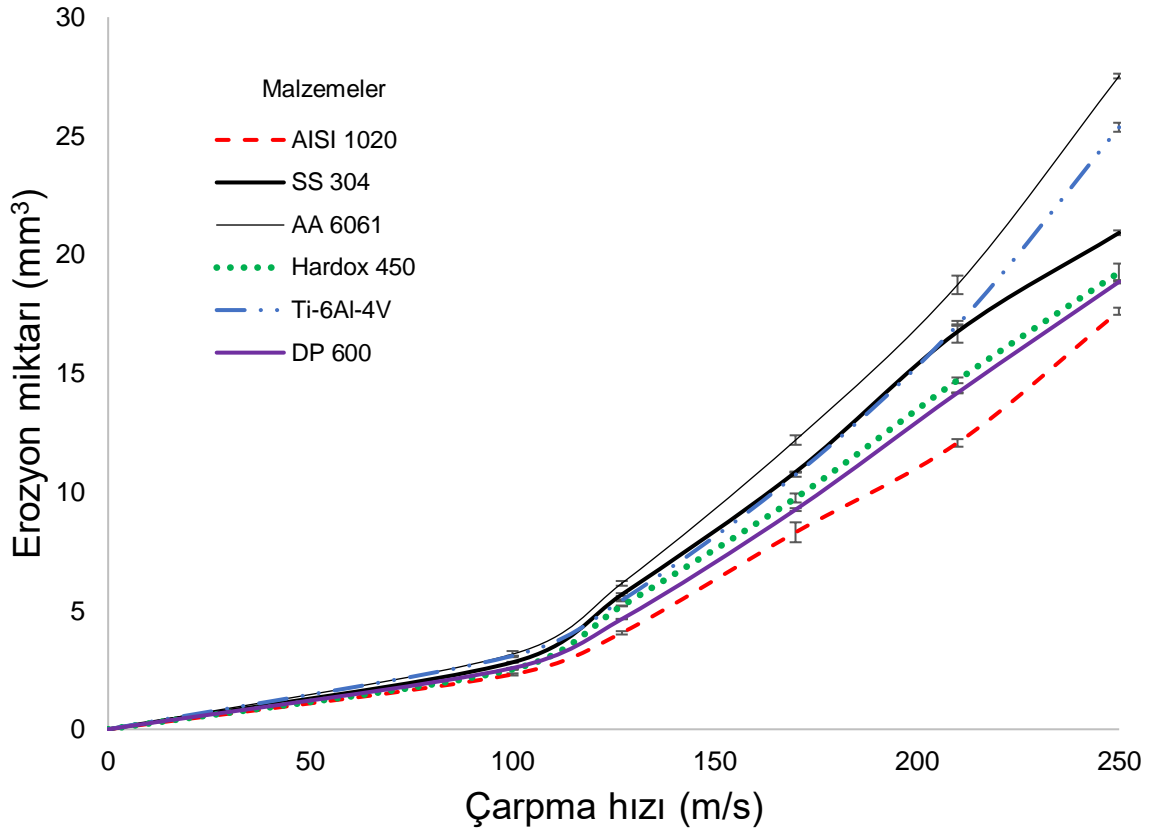
Ti-6Al-4V malzemesi hacimsel erozyon miktarı bakımından en kötü performansı sergileyen ikinci malzememizdir. Bu malzemede ise 100 m/s hız değerinde 16. dakika sonunda 3.10 mm^3 erozyon miktarı ölçülmüştür. Hız değerleri sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s seviyelerine çıkarıldığında hacimsel erozyon miktarları da sırasıyla 5.44, 10.75, 17.06 ve 25.41 mm^3 seviyelerine çıkmaktadır.

Üçüncü sırada SS 304 çeliğini ele aldığımızda bu malzemenin de hacimsel erozyon miktarı diğer iki malzeme oranla biraz daha iyi seviyelerdedir. Bu malzemede de 100 m/s hız değerinde 16. dakika sonundaki hacimsel erozyon miktarı 2.82 mm^3 olarak ölçülmüştür. Hız değerleri sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s seviyelerine çıkarıldığında hacimsel erozyon miktarları da sırasıyla 5.68, 10.84, 16.75 ve 20.92 mm^3 seviyelerine çıkmaktadır.

Hardox 450 malzemesinde ise 100 m/s hız değerinde, 16. dakika sonunda 2.53 mm^3 erozyon miktarı görülmüştür. Bu değer, hız değeri sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s seviyelerine çıkarıldığında 5.20, 9.75, 14.70 ve 19.25 mm^3 seviyelerine çıktığı gözlemlenmiştir.

Son iki malzememizde ilki olan DP 600 malzemesini incelediğimizde ise 100 m/s hız değerinde, 16. dakika sonundaki hacimsel erozyon miktarı 2.58 mm^3 olarak elde edilmiştir. Bu hız değerleri 127, 170, 210 ve 250 m/s seviyelerine arttığında hacimsel erozyon miktarı sırasıyla 4.64, 9.25, 14.17 ve 18.85 mm^3 değerlerine çıkmıştır.

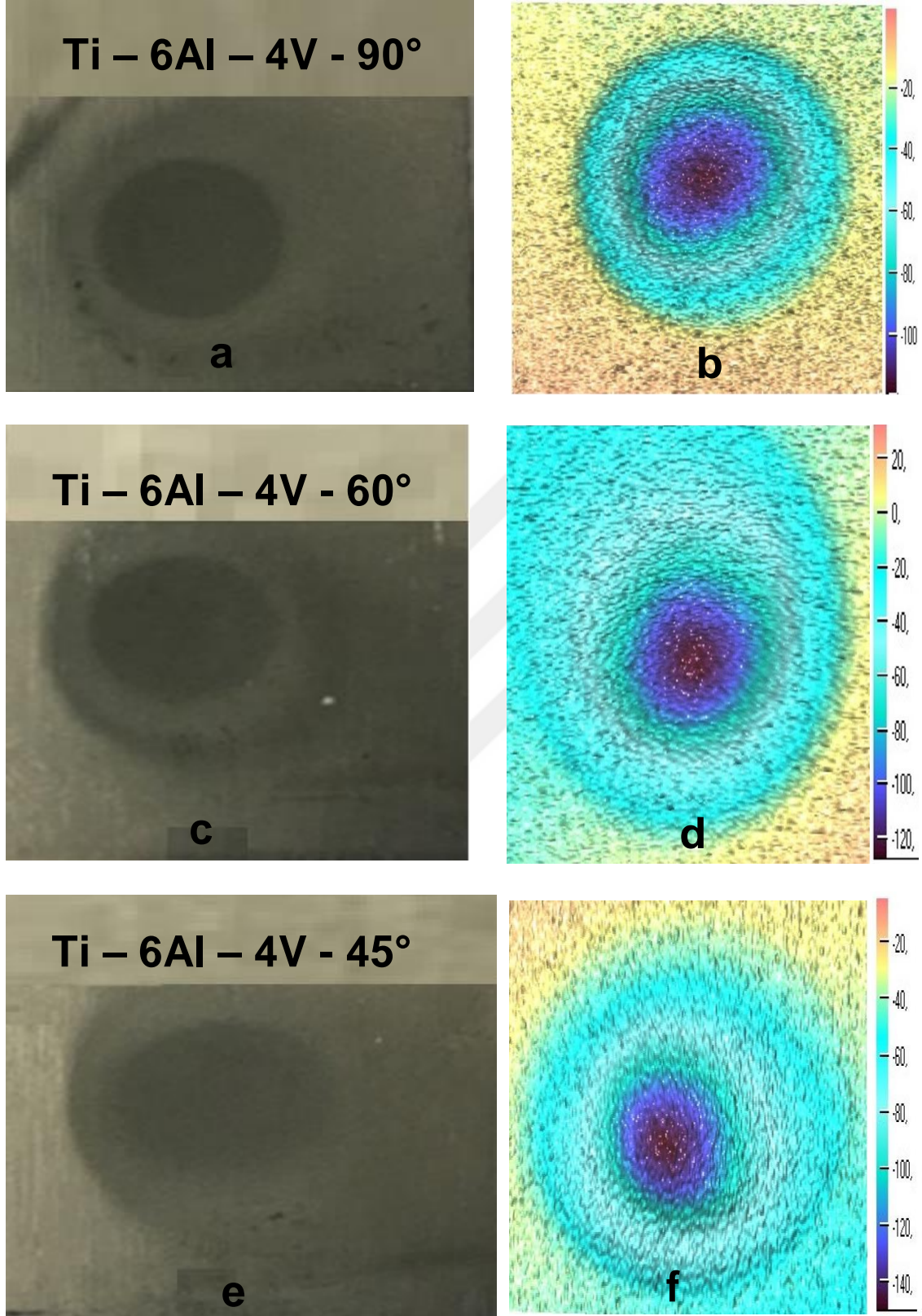
Son malzememiz olarak en iyi hacimsel olarak en iyi erozyon performansını sergileyen AISI 1020 ele aldığımızda 100 m/s hızda, 16.dakika sonundaki hacimsel erozyon miktarı 2.31 mm^3 olarak elde edilmiştir. 127, 170, 210 ve 250 m/s daki basınç değerlerinde ise bu miktar sırasıyla 4.06, 8.30, 12.06 ve 17.61 mm^3 seviyelerine çıkmaktadır.



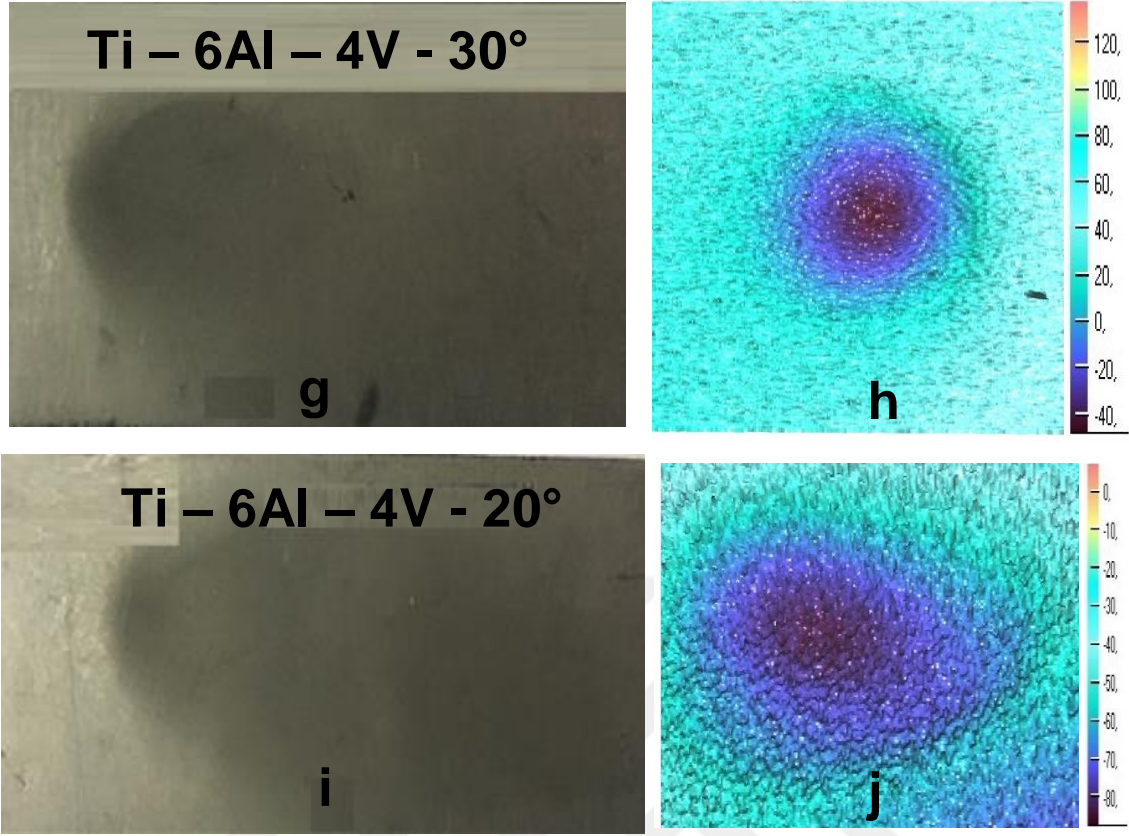
Şekil 3.29. 90° sabit çarpma açısında tüm malzemelerde 16. dakika sonunda oluşan hacimsel erozyon miktarının parçacık çarpma hızına göre karşılaştırılması

3.2. Krater Derinlikleri

Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de Ti6AlV numunesinin 90, 60, 45, 30 ve 20 ° çarpma açılarında yapılan testler sonrasındaki numune görüntüleri ve numunelerin yüzey tarama görüntüleri verilmiştir.

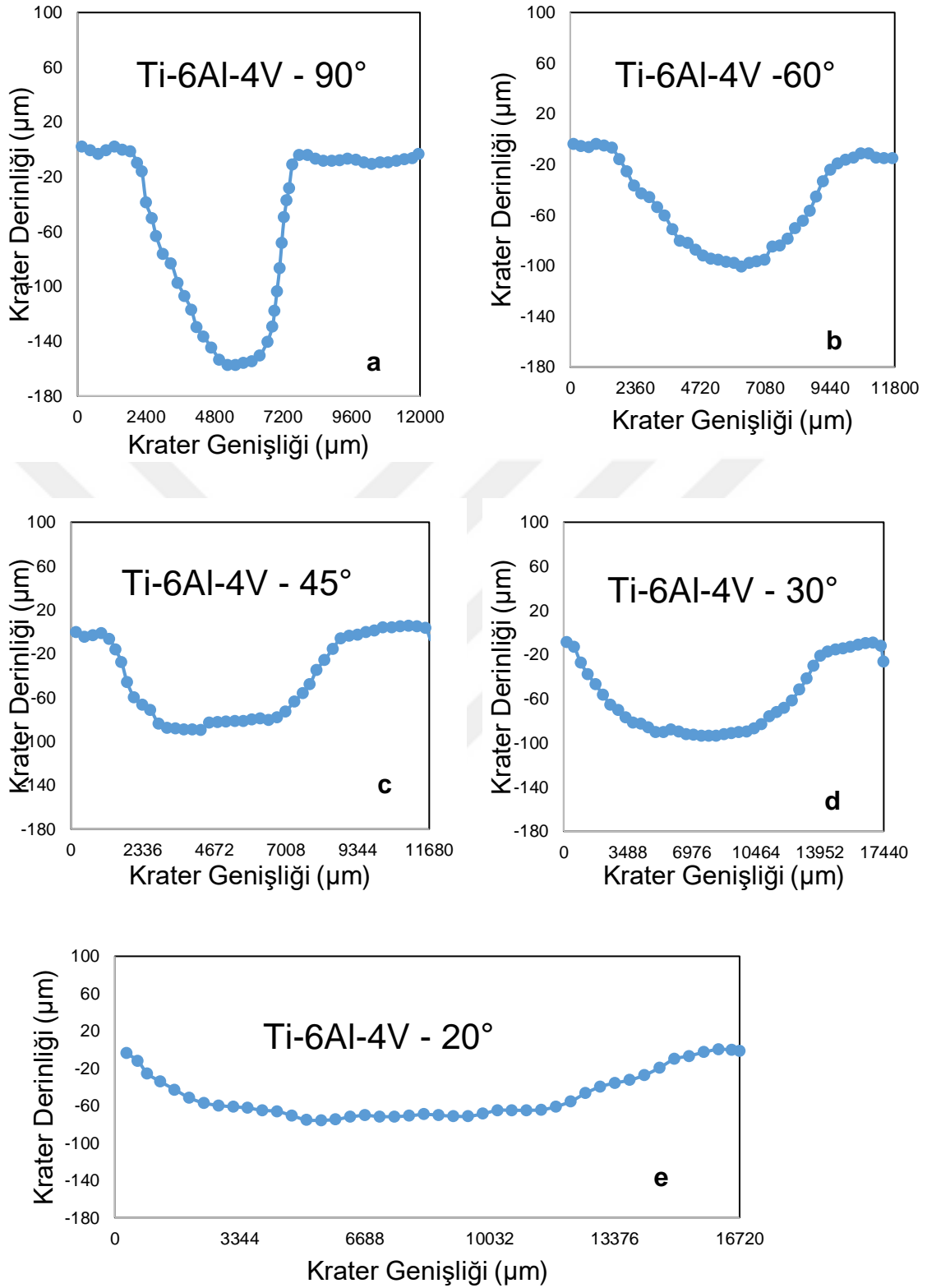


Şekil 3.30. Ti-6Al-4V malzemesinin test sonrası;
a) 90°, c) 60°, e) 45° çarpma açılarındaki numune resimleri,
b) 90°, d) 60°, f) 45° çarpma açılarındaki yüzey tarama görüntüleri



Şekil 3.31. Ti-6Al-4V malzemesinin test sonrası;
 g) 30°, i) 20° çarpma açılarındaki numune resimleri,
 h) 30°, j) 20° çarpma açılarındaki yüzey tarama görüntüleri

Şekiller incelendiğinde çarpma açısı 90° den 20° doğru azaltıldığında erozyon izini büyüdüğü görülmektedir. Düşük çarpma açılarında aşındırıcı parçacıklar numune yüzeyinde daha geniş alana etki ederler. Bu sebeple erozyon izi büyüklüğü artmaktadır. Dolayısıyla 20° deki numunedeki erozyon izi en geniş alana sahiptir.



Şekil 3.32. Ti-6Al-4V malzemesinin test sonrası;

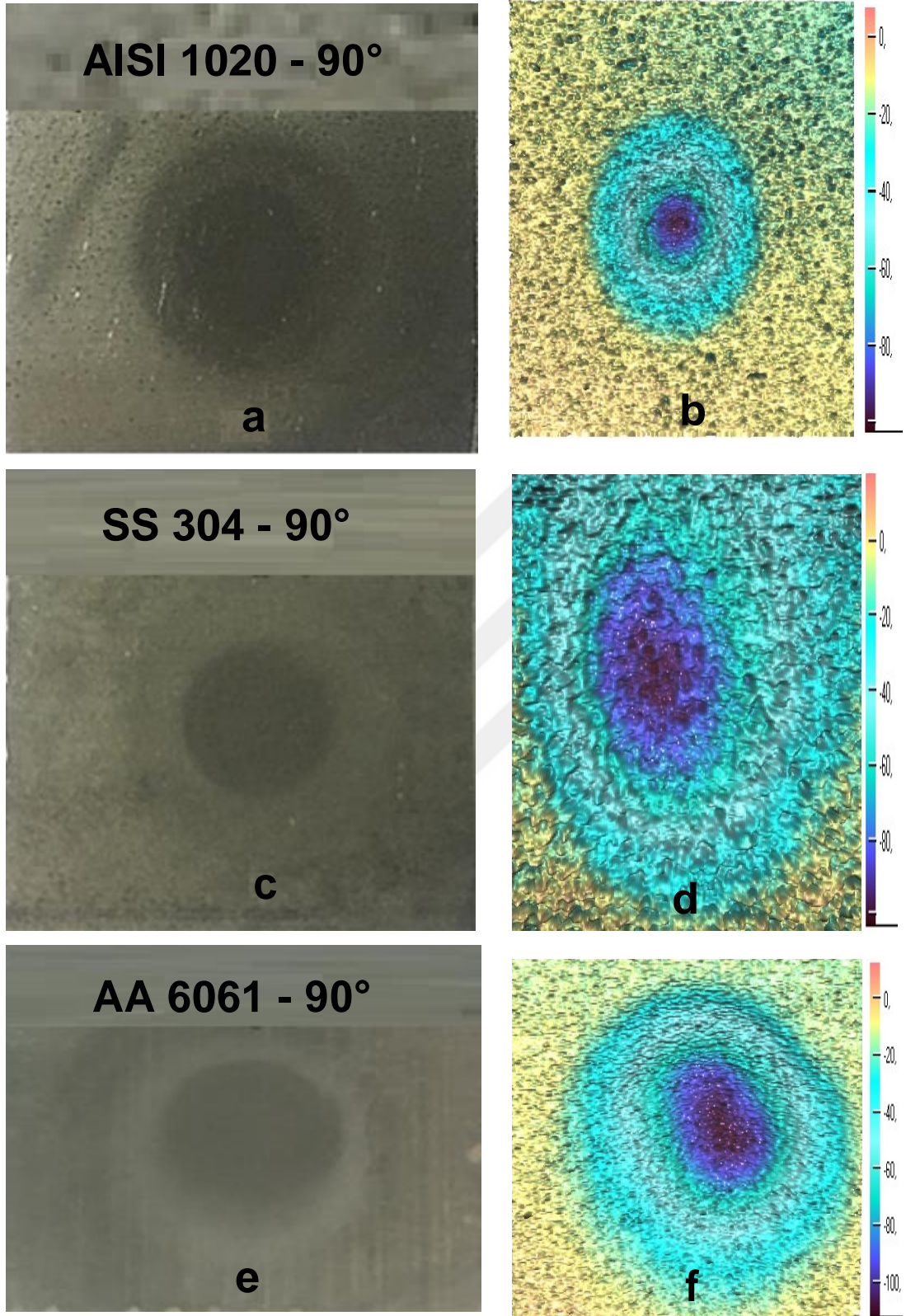
a) 90°, b) 60°, c) 45°, d) 30°, e) 20° açılarında numune yüzeylerinde oluşan yüzey krater derinlikleri

Şekil 3.32’de ise Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’deki numunelerin testler sonunda yüzeylerinde oluşan krater genişlikleri ve krater derinlikleri verilmiştir.

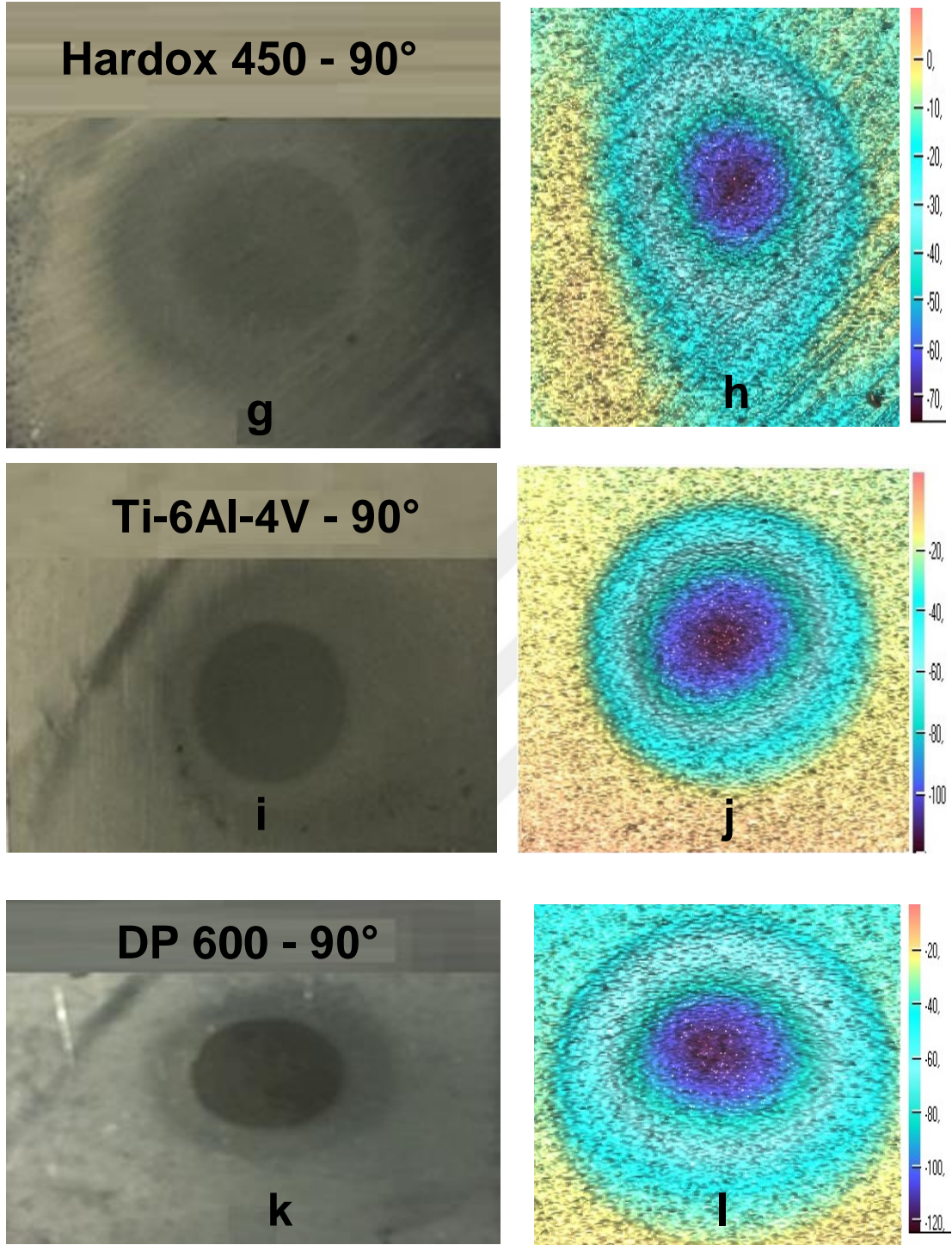
Şekiller incelendiğinde 90° lik çarpma açısındaki krater derinliğinin (Şekil 3.32a), en fazla olduğu görülmektedir. Çarpma açısı 20° ye doğru azaldığında krater derinliğinde azalma olmaktadır. Bunun sebebi aşındırıcı parçacıkların daha geniş bir alana etki etmesinden kaynaklanmaktadır. Bunun sonucunda aşındırıcı parçacıklar birim yüzeylere daha az etki ettiğinden krater derinliğinde azalma olmaktadır. Bu 20° lik çarpma açısında da (Şekil 3.32e) görülmektedir. Bu açı değerindeki krater derinliği en düşük seviyededir. Krater genişliklerini incelediğimizde ise en düşük krater genişliği 90° deki çarpma açısında (a) olmaktadır. Bu açı değerinde aşındırıcı parçacıkların hepsi dik açı ile numuneye çarptığından küçük bir alana etkimektedir. Bu sebeple krater genişliği en düşük değerdedir. Çarpma açısı küçüldüğünde ise aşındırıcı parçacıklar daha geniş alana etki etmekte, bu sebeple 20° de krater genişliği de artmaktadır.

Şekil 3.33 ve 3.34’ de ise bütün test numunelerin 90° çarpma açısında yapılan testler sonucu numunelerin resimleri ve yüzey tarama resimleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde numunelerin krater genişlikleri (a, c, e, g, i, k) birbirlerine yakın düzeydedir.

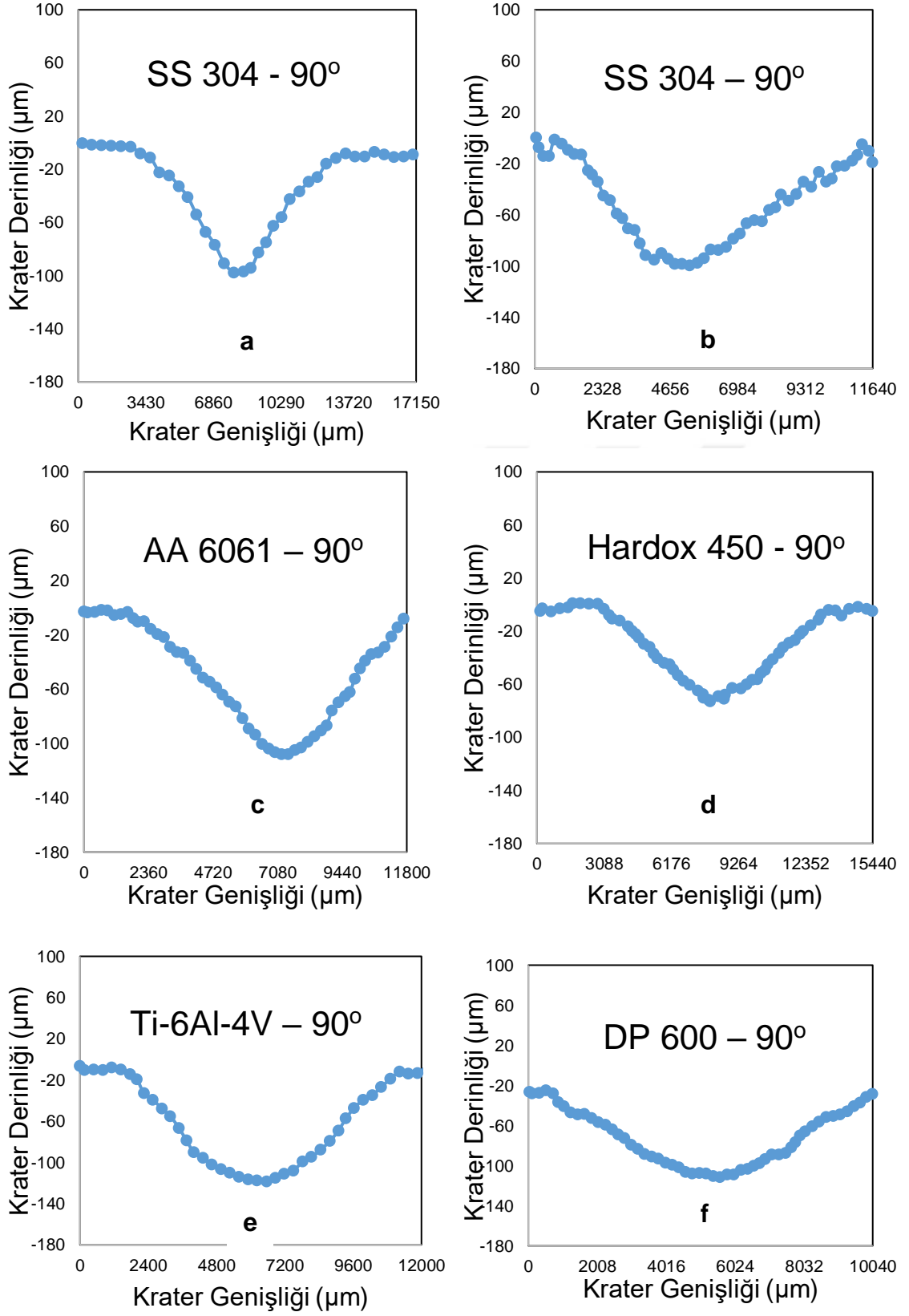
Şekil 3.35’ de ise bu numunelerde (AISI 1020, SS 304, AA 6061, Hardox 450, Ti-6Al-4V ve DP 600) 90° çarpma açısında yapılan testler sonucu numune yüzeylerinde oluşan krater derinlikleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde numunelerde krater derinliklerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. En düşük krater derinliği Hardox 450 (d) numunesinde olmuştur. En yüksek krater derinliği ise Ti-6Al-4V malzemesinde görülmektedir.



Şekil 3.33. 90° çarpma açısında yapılan erozyon testleri sonrası;
 a) AISI 1020, c) SS 304, e) AA 6061 malzemelerinin numune resimleri,
 b) AISI 1020, d) SS 304, f) AA 6061 malzemelerinin yüzey tarama görüntüleri



Şekil 3.34. 90° çarpma açısında yapılan erozyon testleri sonrası;
 g) Hardox 450, i) Ti-6Al-4V, k) DP 600 malzemelerinin numune resimleri,
 h) Hardox 450, j) Ti-6Al-4V, l) DP 600 malzemelerinin yüzey tarama
 görüntüleri

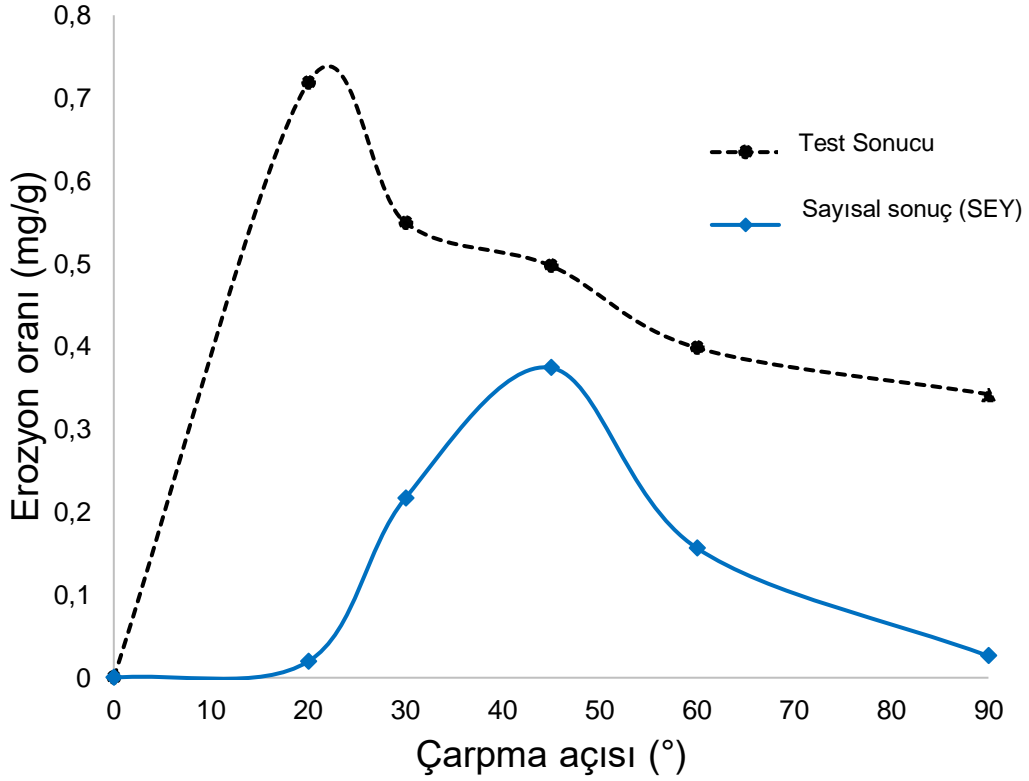


Şekil 3.35. 90° çarpma açısında yapılan erozyon testleri sonrası;

- a) AISI 1020, b) SS 304, c) AA 6061, d) Hardox 450, e) Ti-6Al-4V,
f) DP 600 malzemelerinde oluşan krater derinliklerinin karşılaştırılması

3.3. Sayısal Bulgular

Şekil 3.36' da test sonuçlarıyla katı cisimler mekaniği çalışmalarından elde edilen erozyon oranı miktarları bir arada verilmiştir. Grafik incelendiğinde sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların test verilerden uzak olduğu görülmektedir. Testlerde Ti-6Al-4V malzemesinde maksimum erozyon miktarı 20° lik çarpma açısında görülmesine rağmen sayısal çalışmalarda bu açı değeri 45° olarak bulunmaktadır. Ayrıca bu açı değerinde elde edilen erozyon oranı da test verilerden elde edilen erozyon miktarından daha az olarak elde edilmiştir.



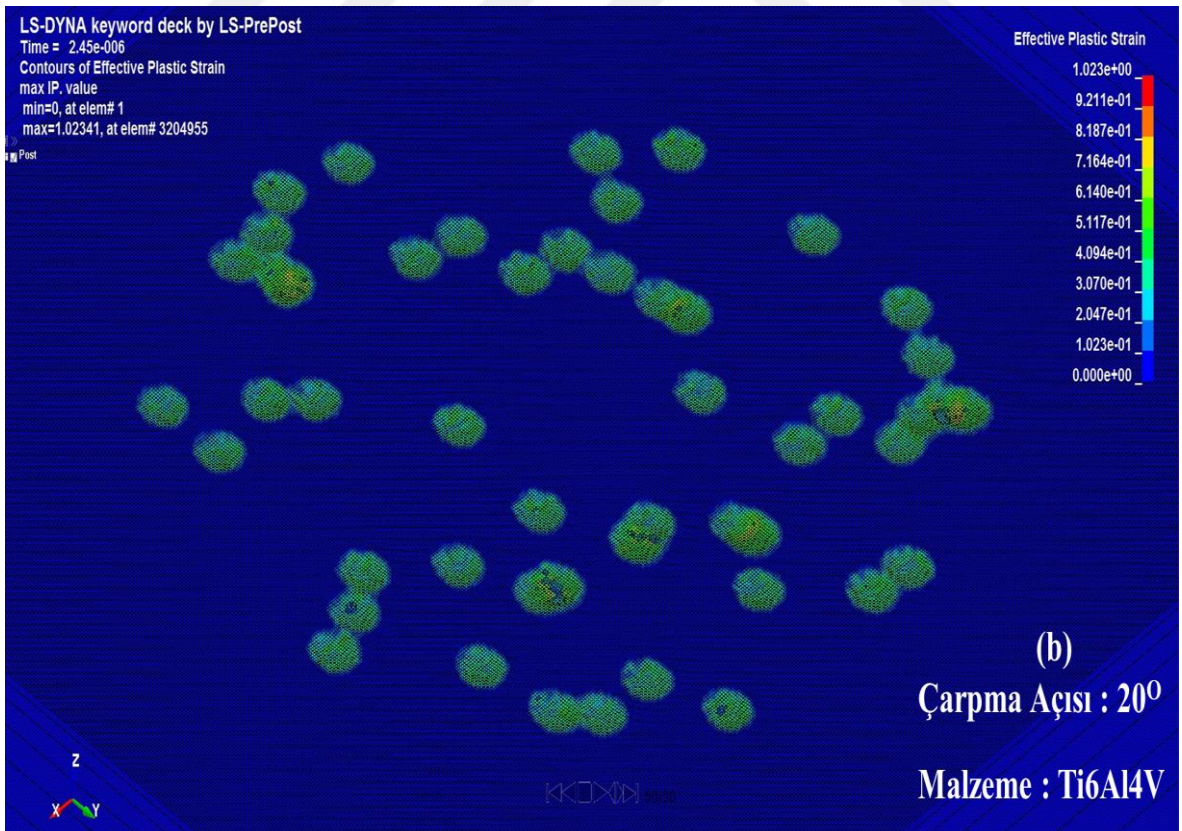
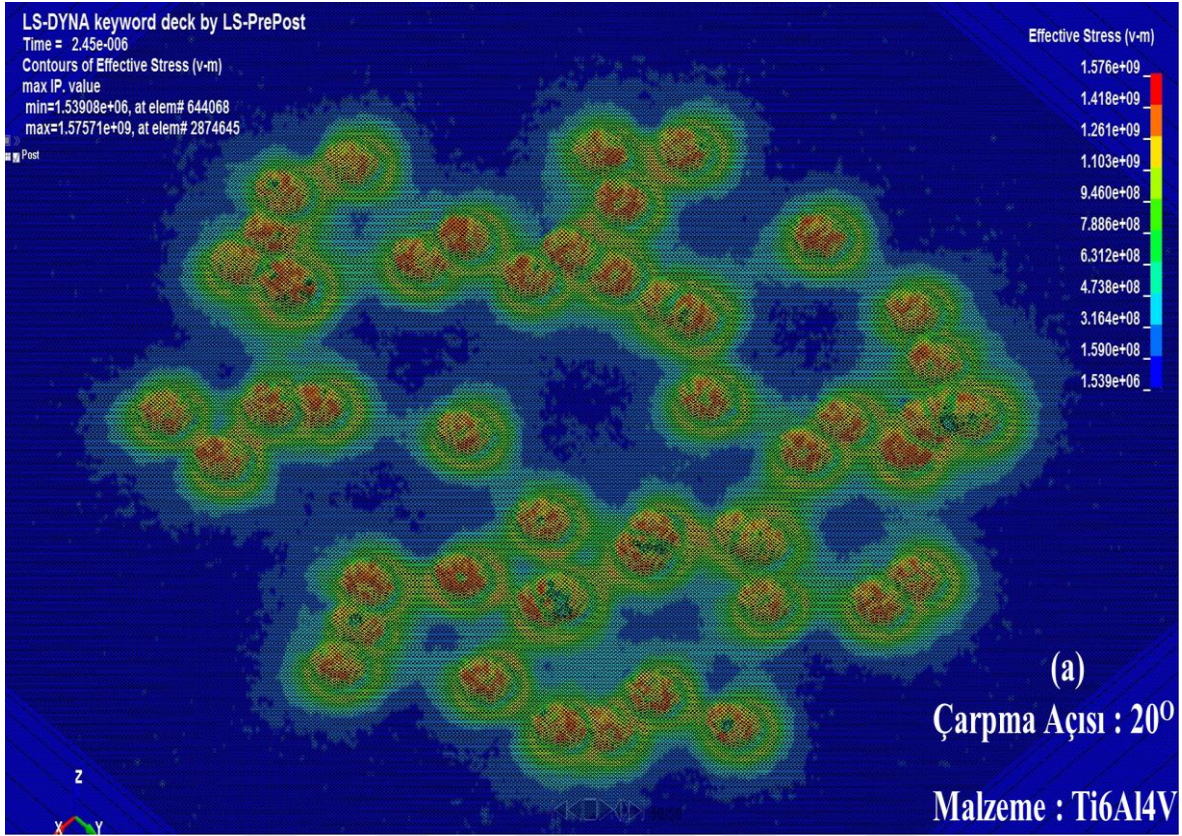
SEY : Sonlu elemanlar yöntemi

Şekil 3.36. Deneysel ve katı cisimler mekaniği yöntemiyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması

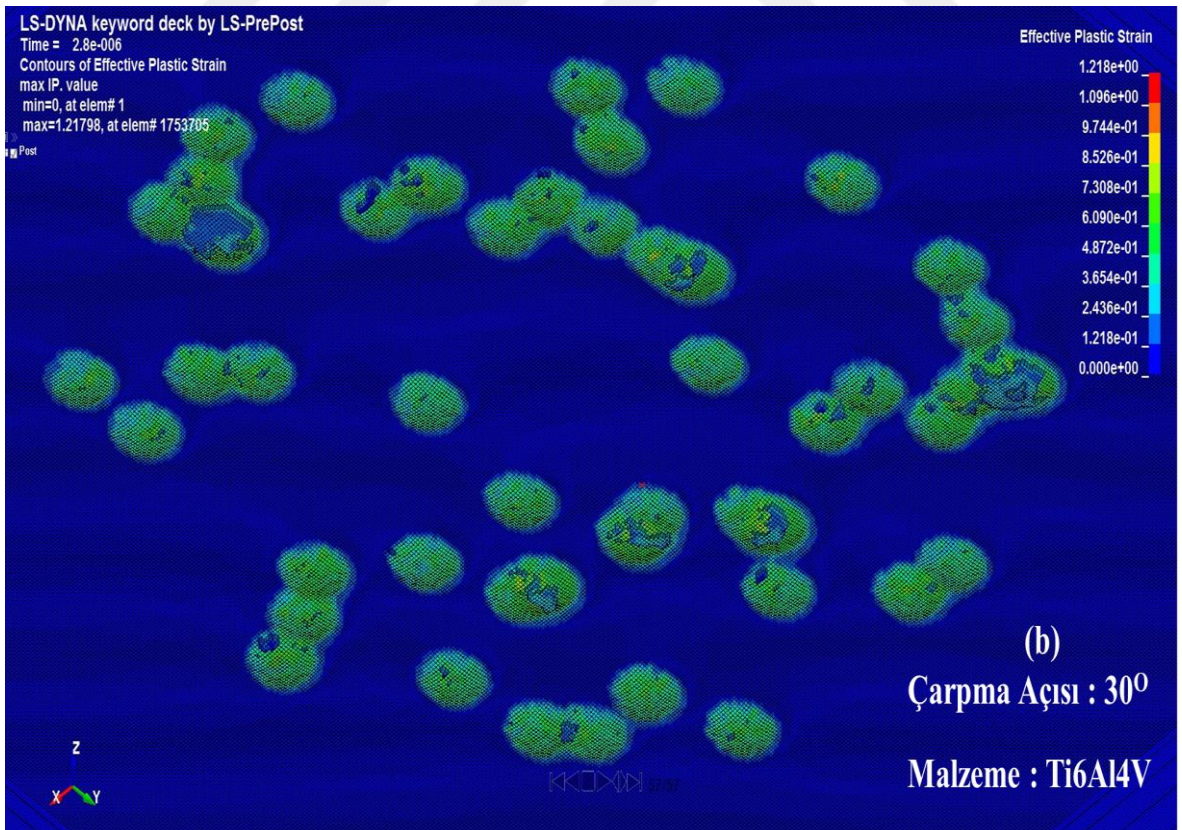
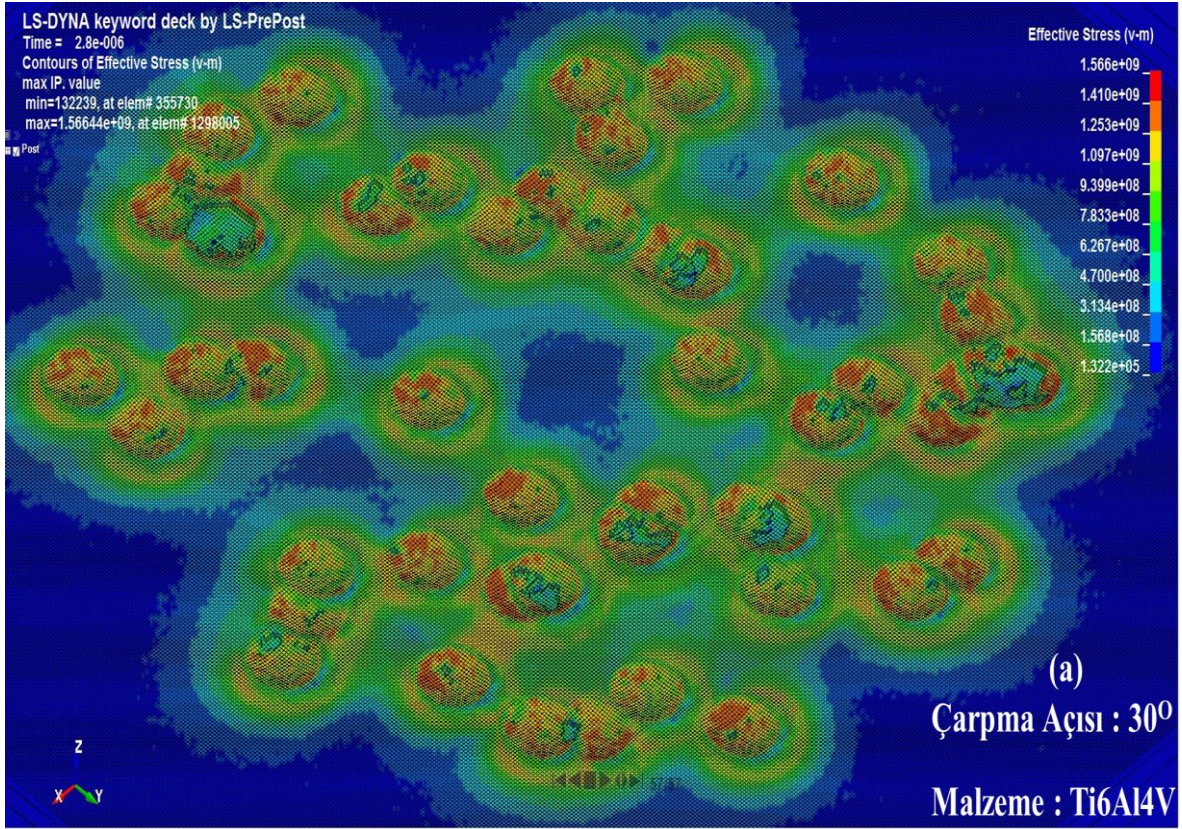
Şekil 3.37 – 3.41 arasında Ti-6Al-4V malzemesinde 20° – 90° çarpma açılarında oluşan von-Mises gerilme ve plastik şekil değişimi dağılımları gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde parçacıkların numune yüzeyine çarpma bölgeleri görülmektedir.

Numune yüzeyinde bazı yerlerde çarpmanın etkisiyle kraterler oluşmuştur. Johnson-Cook hasar parametrelerinin etkisiyle kraterlerin bazı yerlerinde elemanlar silinmiştir. Bu noktalar erozyona uğrayan elemanlar olarak alınmış ve bunların kütlesi, erozyon miktarını hesaplamakta kullanılmıştır. Kütleli erozyon miktarı ise kütleli erozyon miktarının çarpan parçacıkların kütlesine bölünerek kütleli erozyon oranı elde edilmiştir.

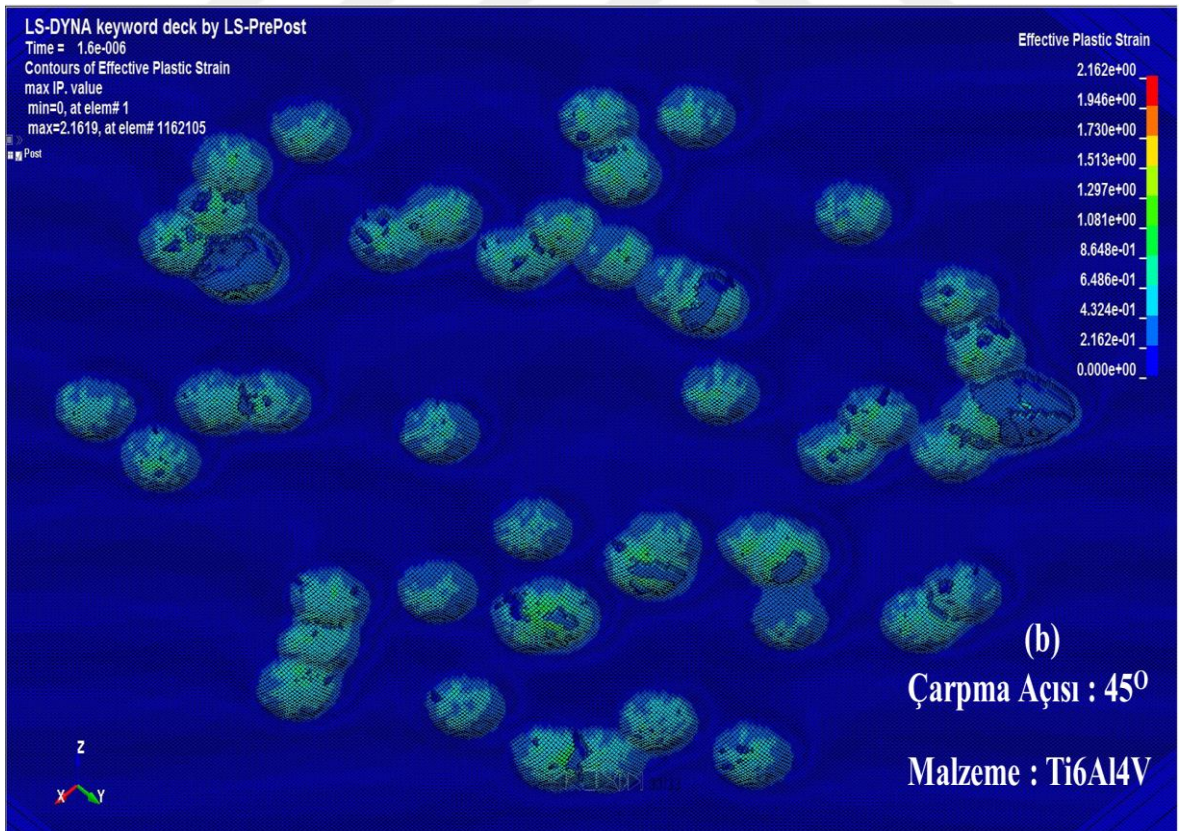
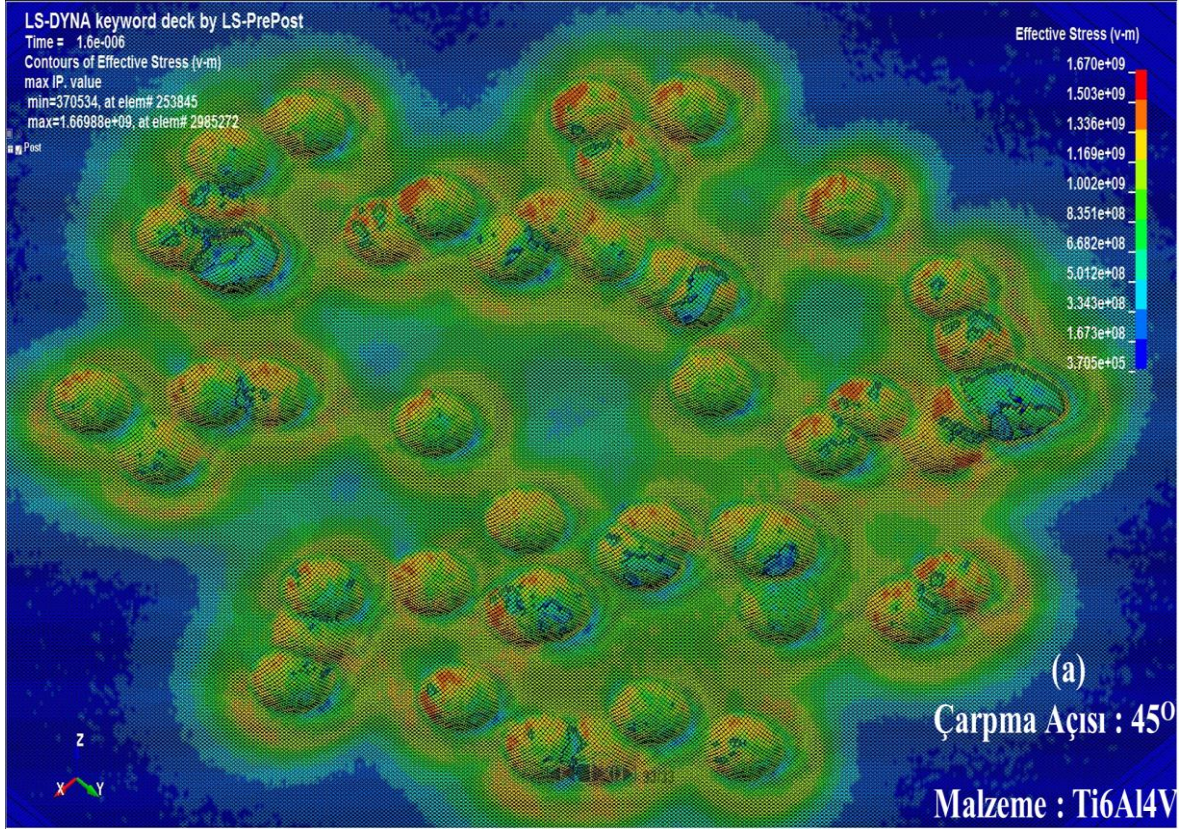




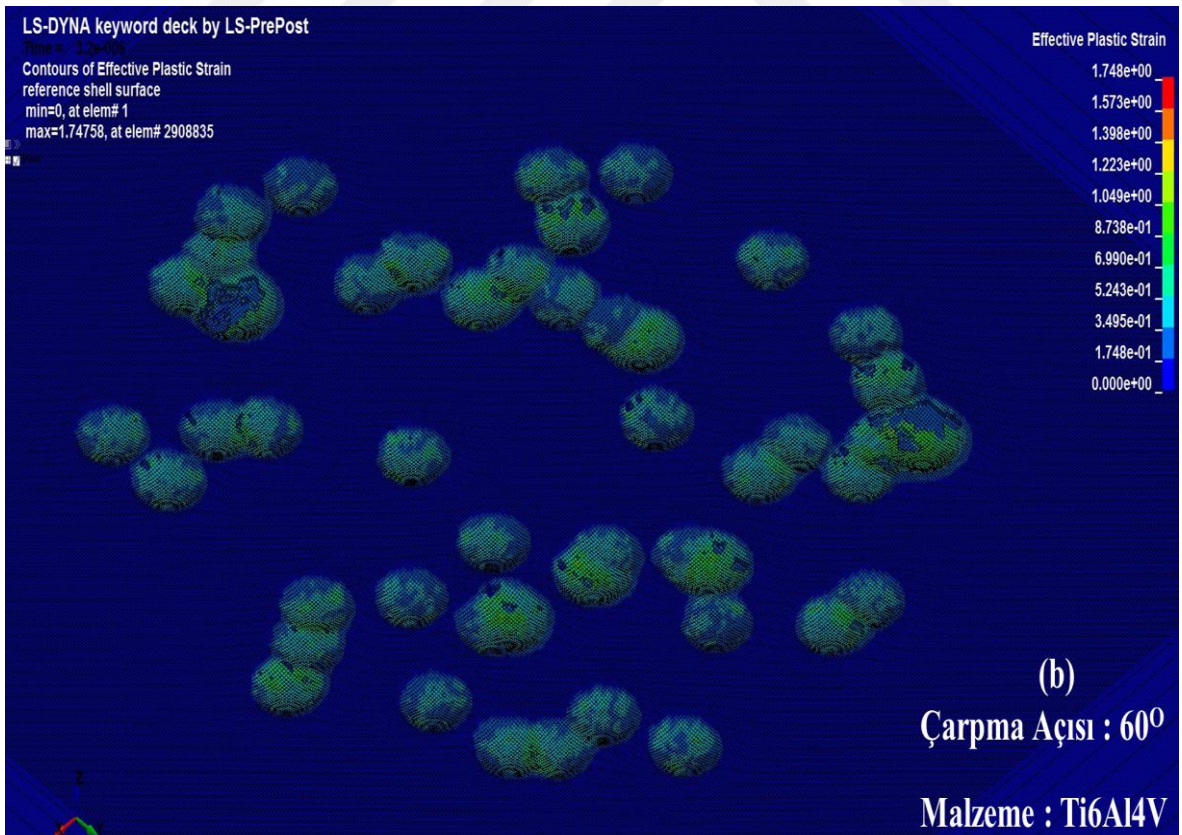
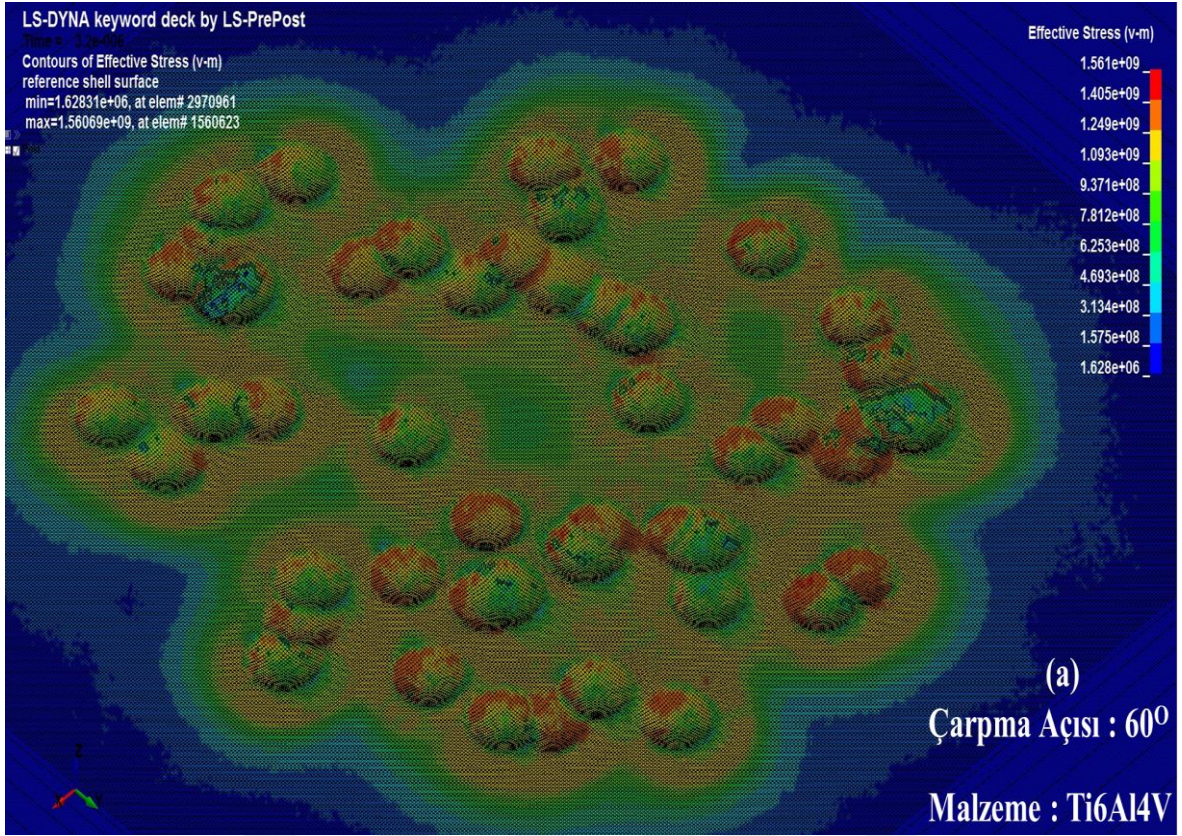
Şekil 3.37. Ti-6Al-4V malzemesinde 20° çarpma açısında oluşan
a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değiştirme dağılımı



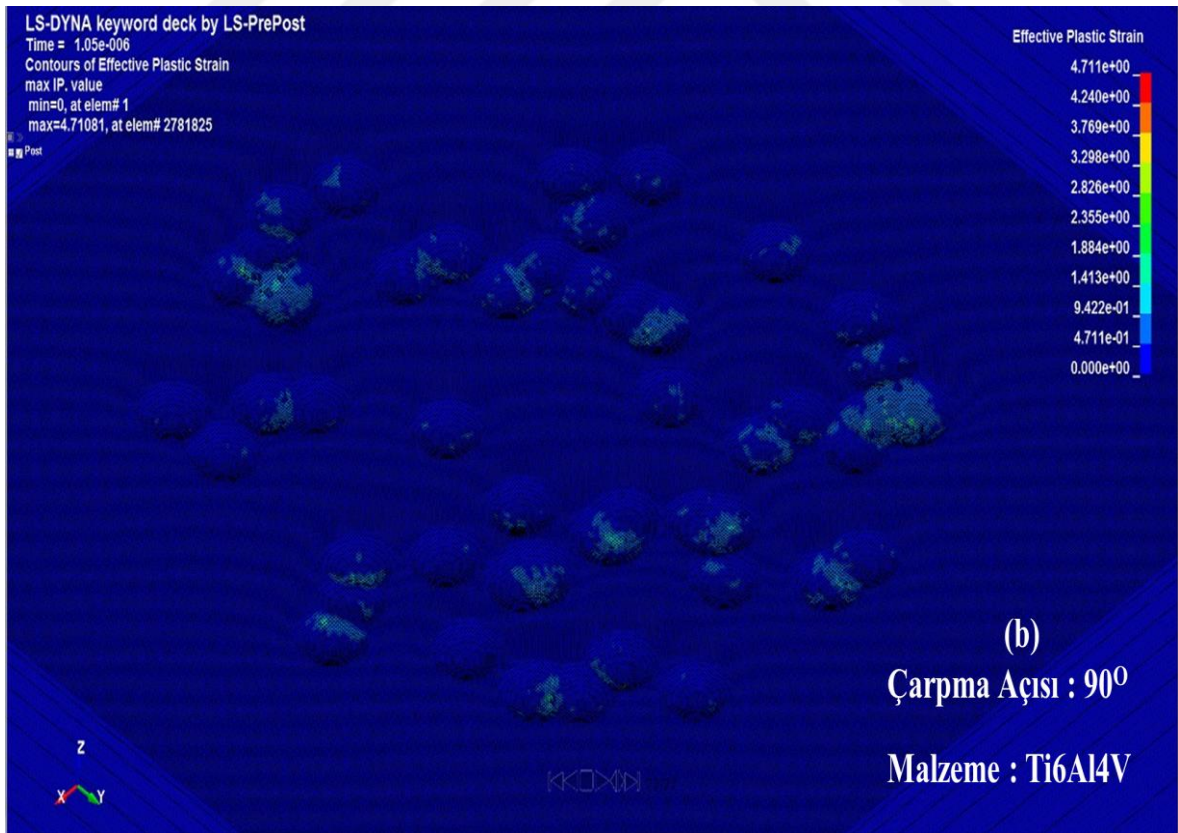
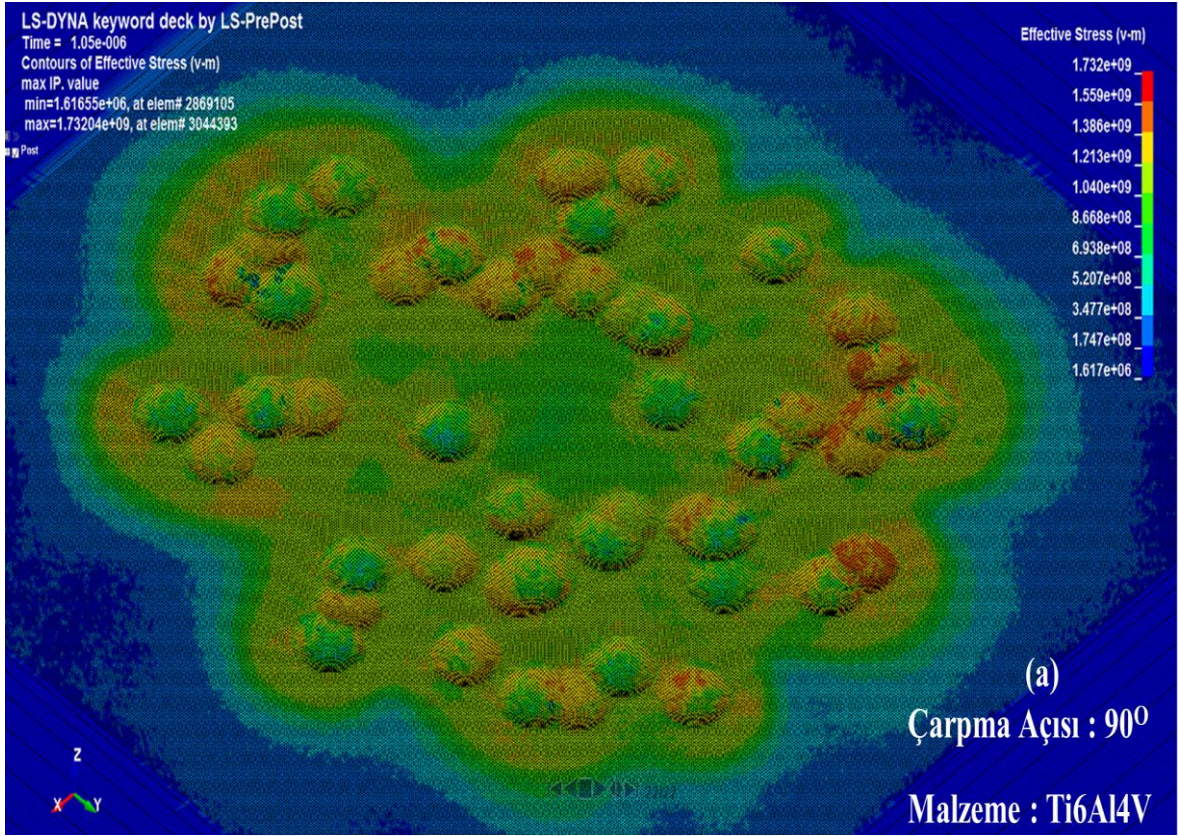
Şekil 3.38. Ti-6Al-4V malzemesinde 30° çarpma açısında oluşan
a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değişimi dağılımı



Şekil 3.39. Ti-6Al-4V malzemesinde 45° çarpma açısında oluşan
a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değişimi dağılımı

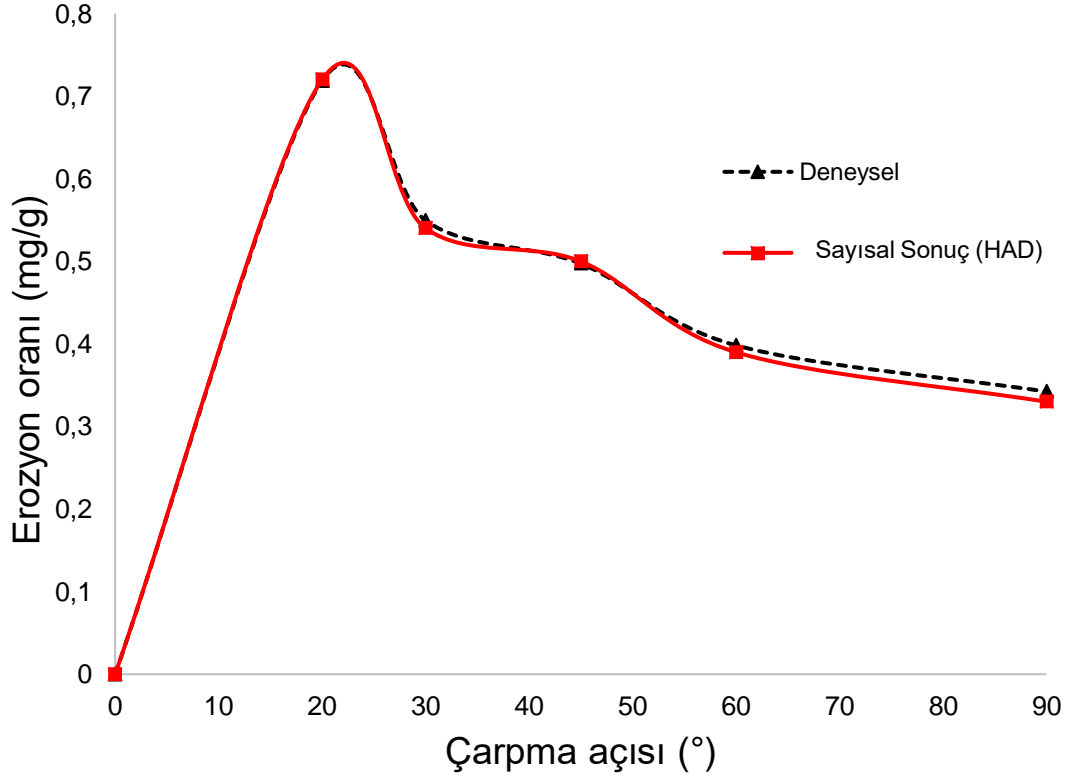


Şekil 3.40. Ti-6Al-4V malzemesinde 60° çarpma açısında oluşan
a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değişimi dağılımı



Şekil 3.41. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısında oluşan
a) von-Mises gerilme dağılımı, b) plastik şekil değişimi dağılımı

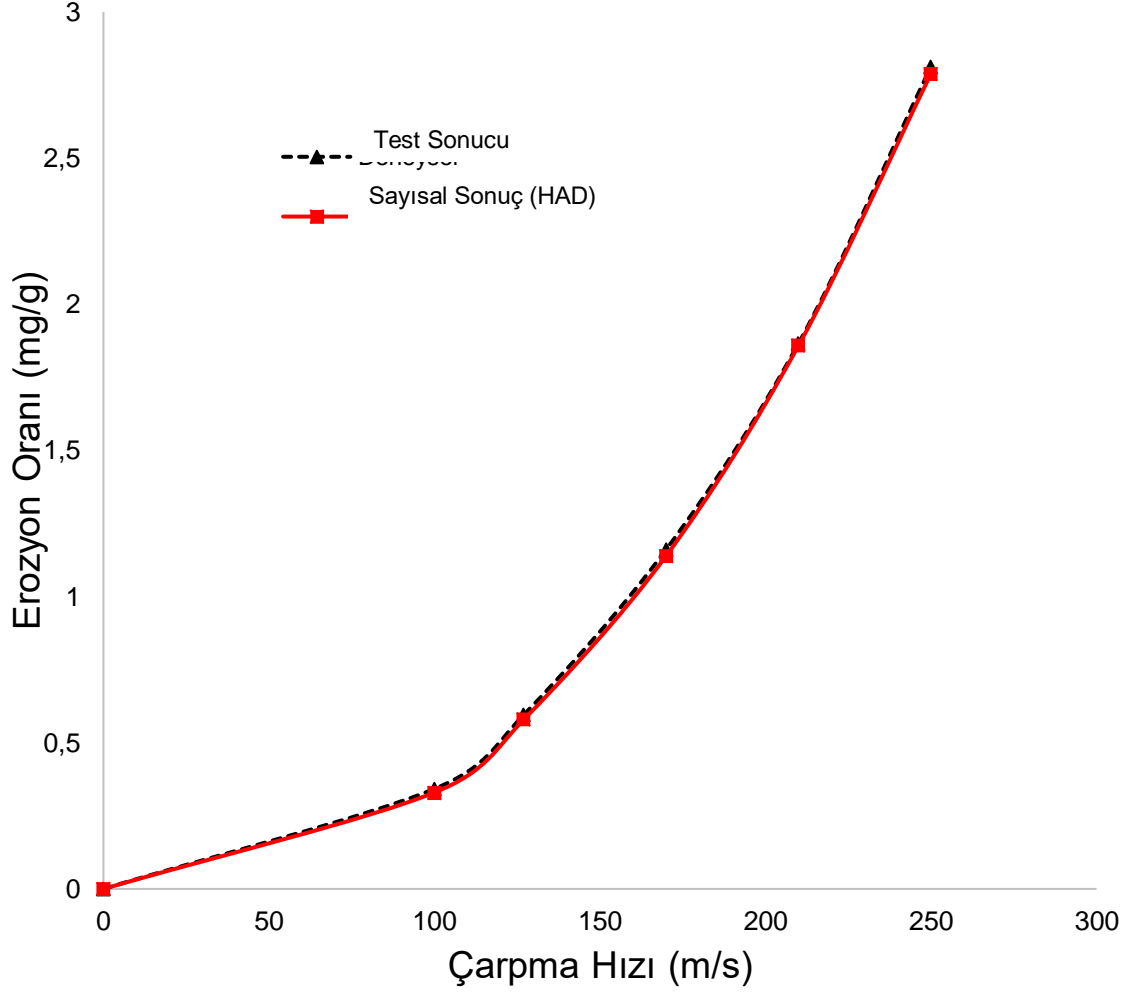
Katı cisimler mekaniği yaklaşımıyla yapılan çalışmalarda yeterli derecede sonuçlar elde edilememiştir. Bu sebeple ikinci olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sonucu elde erozyon oranı miktarlarının test sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 3.42' de verilmiştir



HAD : Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Şekil 3.42. Ti-6Al-4V malzemesi için erozyon miktarının çarpma açısına göre değişiminin test sonuçları ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

Şekilden görüldüğü erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar test verileriyle oldukça uyumludur. İkinci aşamada çarpma hızının etkisi incelemek üzere yapılan testlerin bu yöntemle modellenmesi için çalışmalar yapıldı. Bu çalışmada 90° deki modellerde çarpma hızları sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s' ye çıkarılarak modeller tekrar oluşturulmuştur. Bu modellerin çözdürülmesi sonucu elde edilen kütleli erozyon miktarlarının test verileriyle karşılaştırılması Şekil 3.43'de verilmiştir.



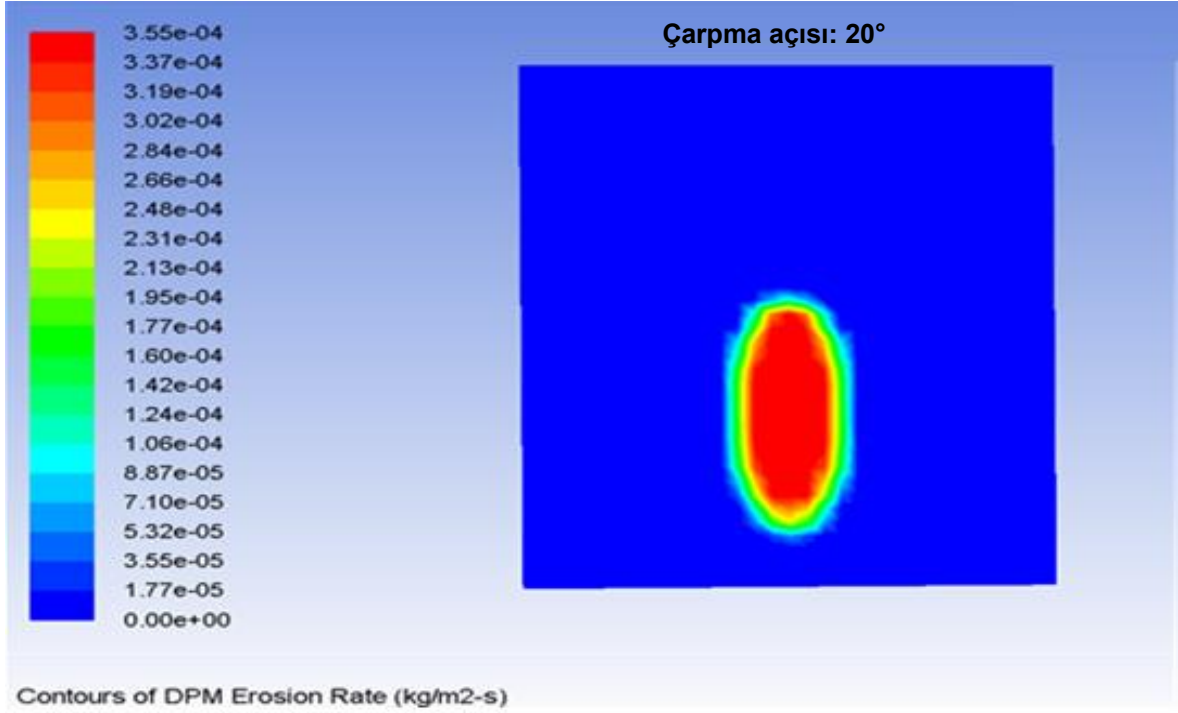
HAD : Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Şekil 3.43. Ti-6Al-4V malzemesi için erozyon miktarının çarpma hızına göre değişiminin test sonuçları ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

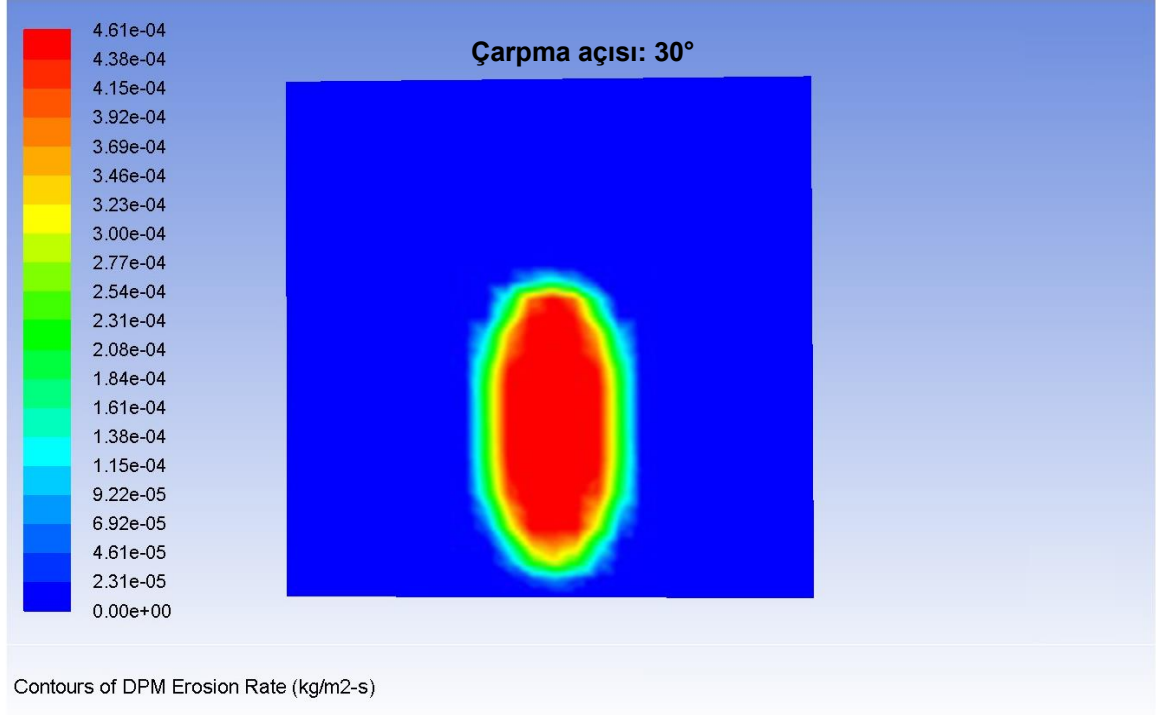
Şekil 3.43' de görüldüğü gibi yüksek hızlarda elde edilen kütleli erozyon miktarları da test verileriyle çok uyumludur. Bunun nedeni test sonuçlarına göre amprik erozyon denkleminin (Denklemler 2.3) sağlatılmasıdır.

Sayısal analizler sonucu Ti-6Al-4V malzeme yüzeylerinde meydana gelen erozyon dağılımlarının çarpma açısına göre değişimleri Şekil 3.44 – 48 arasında verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi düşük çarpma açılarında erozyonun meydana geldiği bölge elips şeklinde olmaktadır. Bu aşındırıcı parçacıkların numune yüzeyinde daha fazla alana etki etmesinden kaynaklanmaktadır. Çarpma açısının artmasıyla aşındırıcı parçacıklar numune yüzeyine daha dik olarak gelmekte ve numune yüzeyinde etki ettiği alan

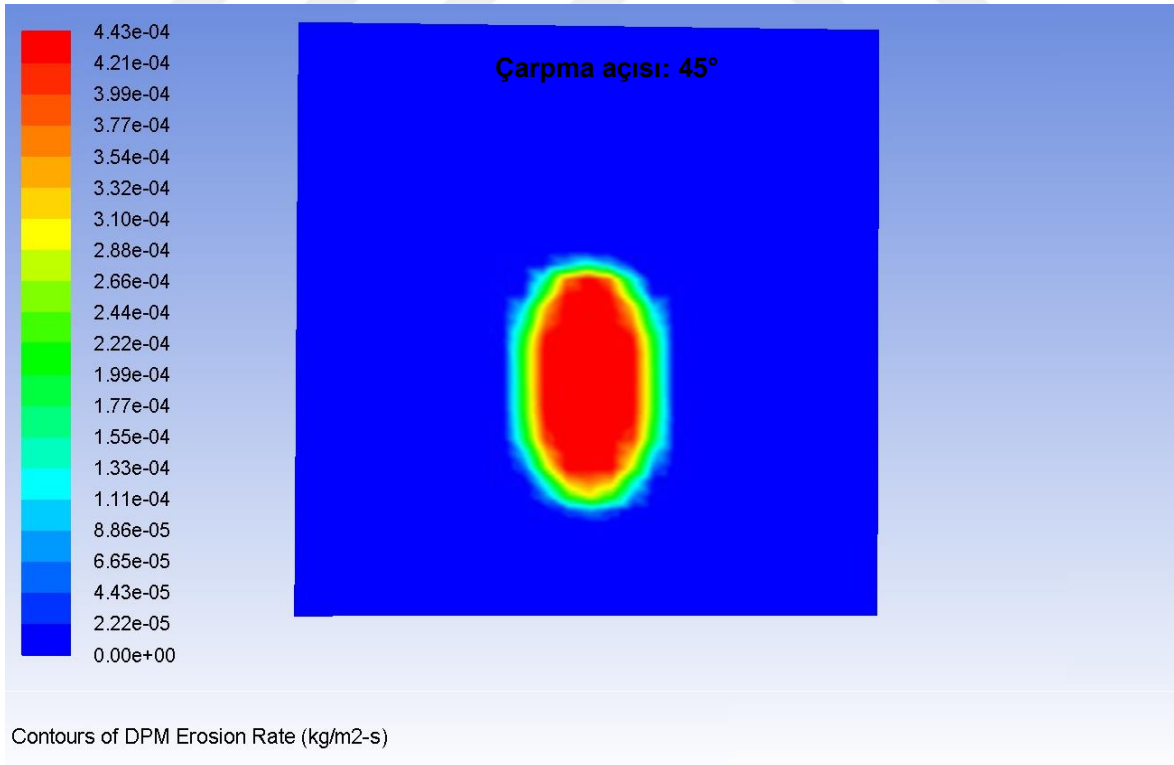
daralmaktadır. Bu sebeple malzeme yüzeyindeki erozyon bölgesi daha dairesel hale gelmektedir.



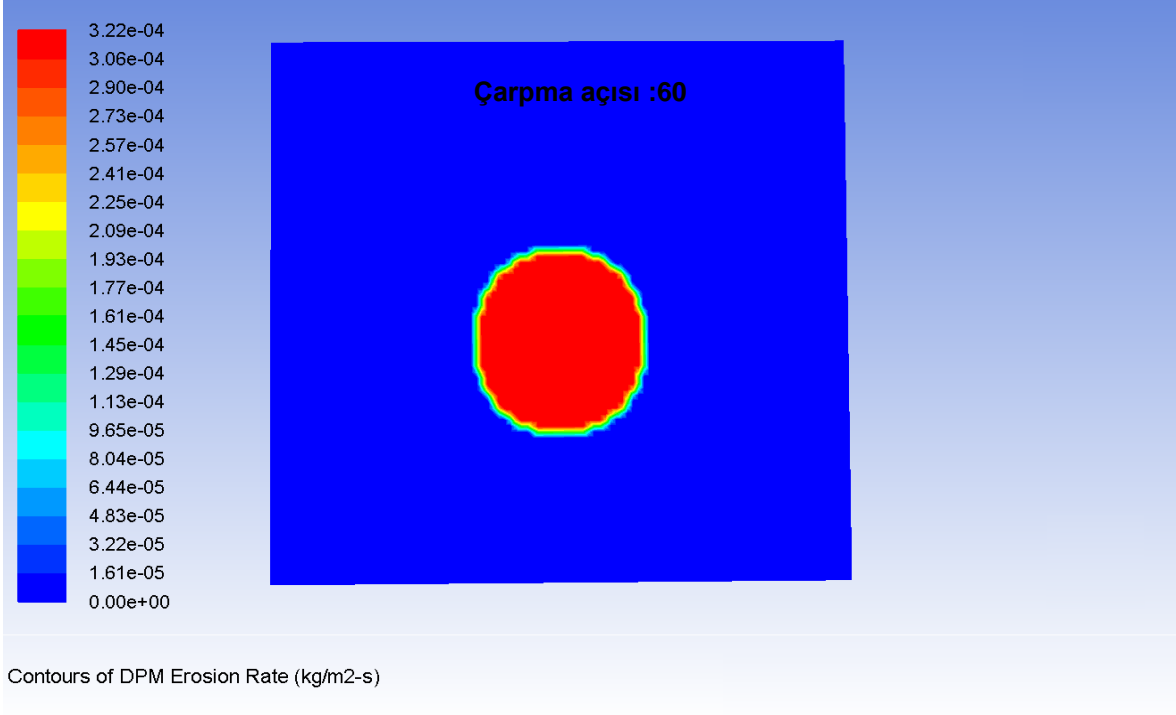
Şekil 3.44. Ti-6Al-4V malzemesinde 20° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyde oluşan erozyonun dağılımı



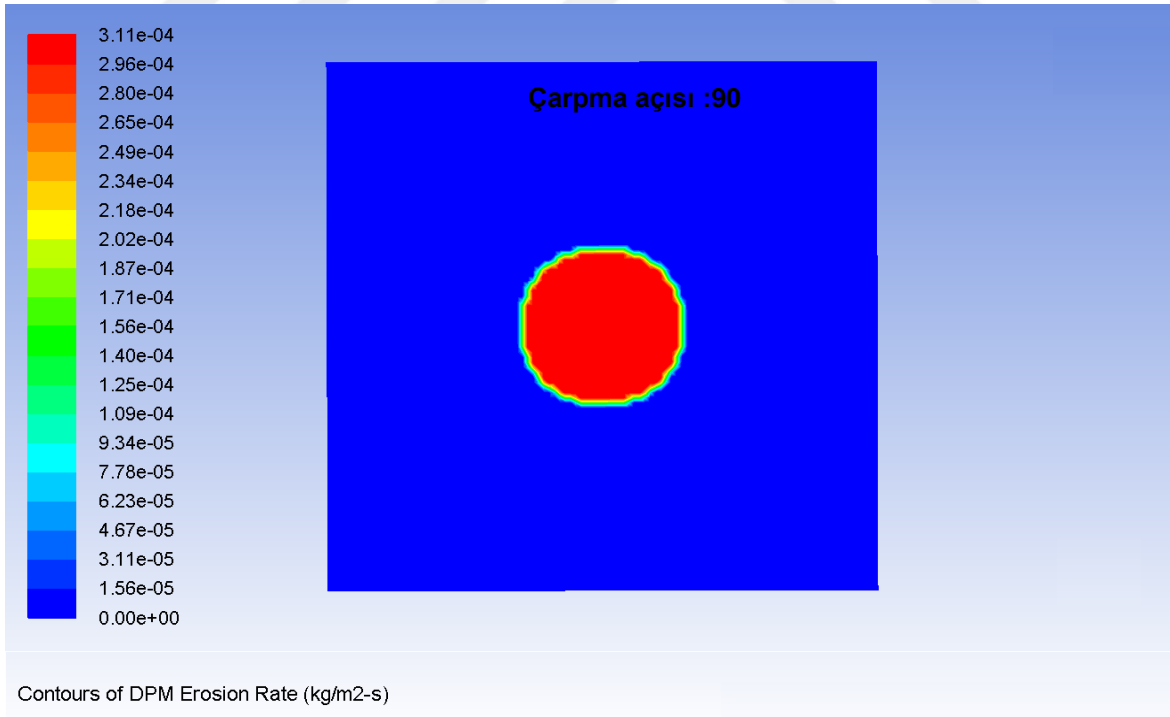
Şekil 3.45. Ti-6Al-4V malzemesinde 30° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı



Şekil 3.46. Ti-6Al-4V malzemesinde 45° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı

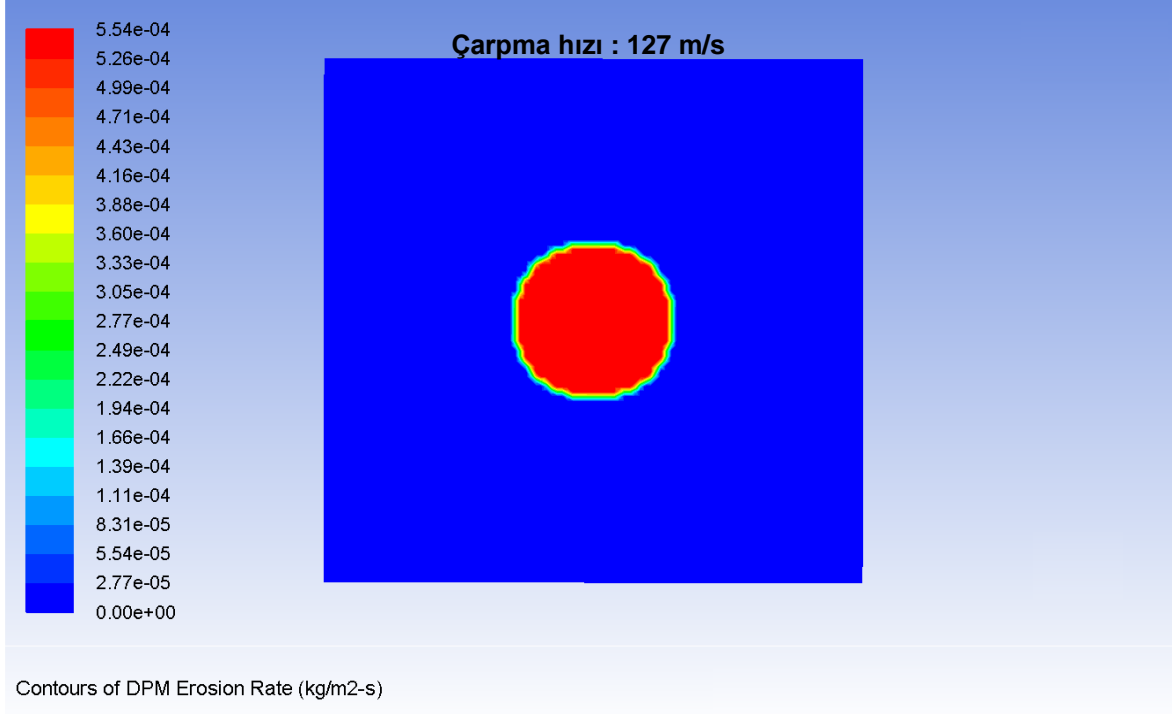


Şekil 3.47. Ti-6Al-4V malzemesinde 60° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı

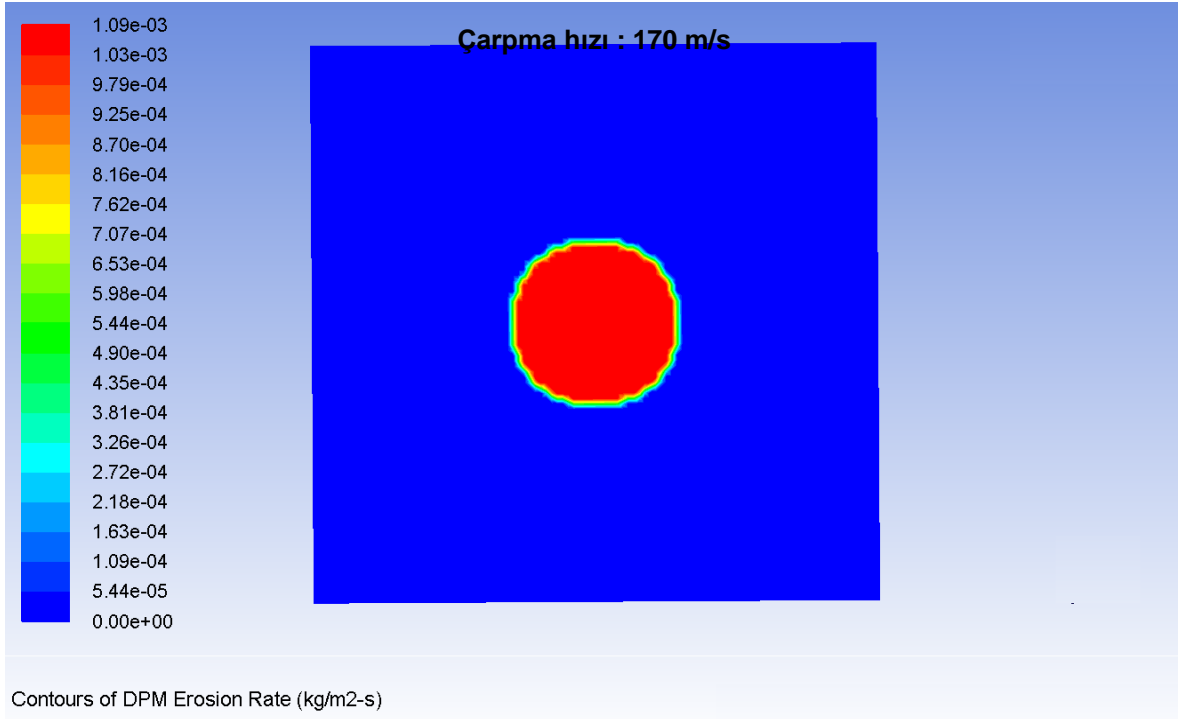


Şekil 3.48. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 100 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı

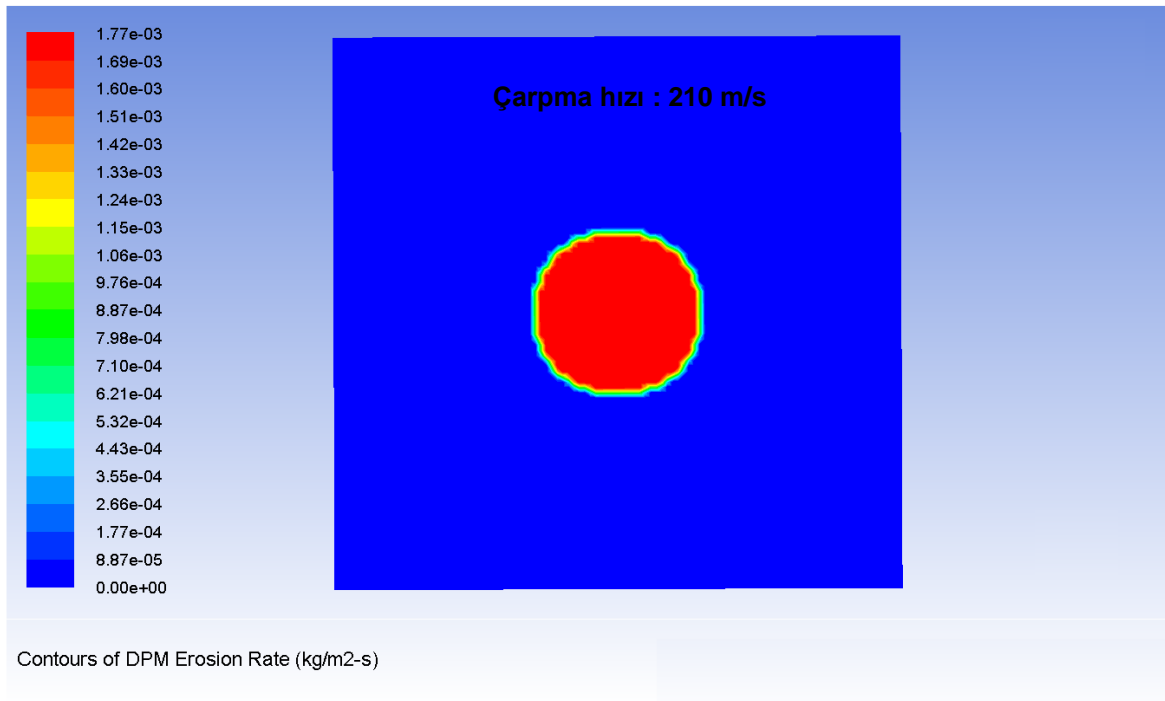
Sayısal analizler sonucu Ti-6Al-4V malzeme yüzeylerinde meydana gelen erozyon dağılımlarının çarpma hızına göre değişimleri ise Şekil 3.49 -52 arasında verilmiştir. Şekillerden de görülebileceği parçacık hızı yüksek olduğu için parçacıkların çarptığı bölgenin merkezinde erozyon hızı değerleri maksimum olarak elde edilmiştir. Çarpma hızının artışına bağlı olarak erozyon hızı değerleri de artmaktadır.



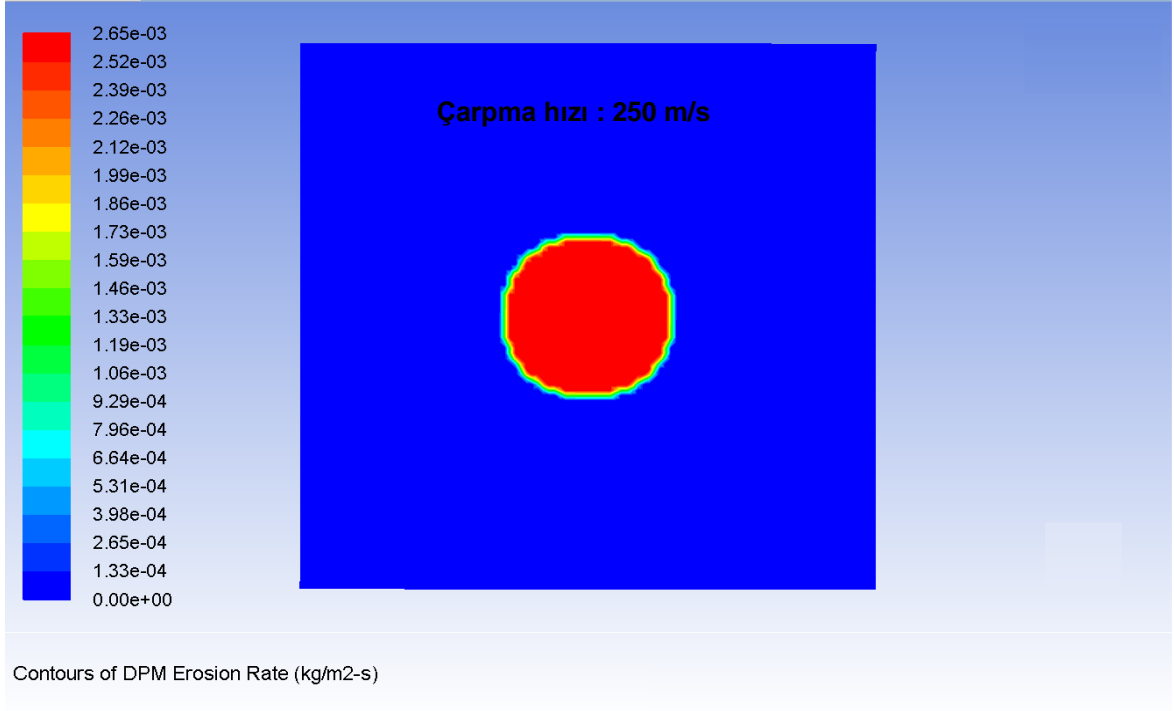
Şekil 3.49. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 127 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı



Şekil 3.50. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 170 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı



Şekil 3.51. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 210 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı



Şekil 3.52. Ti-6Al-4V malzemesinde 90° çarpma açısı ve 250 m/s parçacık çarpma hızında yüzeyinde oluşan erozyonun dağılımı

4. SONUÇLAR

Tez kapsamında mühendislikte yaygın olarak kullanılan AISI 1020, AA 6061, Ti-6Al-4V, SS 304, Hardox 450, DP 600 metalik malzemelerinin katı parçacık çarpması altındaki erozyon davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Metalik malzemelerde maksimum erozyon miktarı, çarpma açısı 20° - 30° arasında maksimum olmaktadır.
- Katı parçacık çarpma hızının artmasıyla erozyon miktarı artmıştır.
- Erozyon miktarı kaybı en az AA 6061 alüminyum alaşım malzemesinde görülmüşken, en yüksek DP 600 çelik malzemesinde görülmüştür.
- Hacimsel erozyon miktarı en az Hardox 450 çeliğinde ve en yüksek AA 6061 alüminyum alaşımında meydana gelmiştir.
- Katı cisimler mekaniği yöntemiyle testlerle uyumlu sonuçlar elde edilememişken hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak testlere uygun sonuçlar elde edilmiştir.
- Katı parçacık çarpma açısı 90° de maksimum krater derinliği elde edilmişken 20° de minimum krater derinliği edilmiştir.

5. ÖNERİLER

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar neticesinde aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

- Metalik olmayan malzemelerin erozyon performansı belirlenebilir.
- Çalışmada 50 mikron boyutunda Al_2O_3 katı parçacığı kullanılmıştır. Farklı boyut ve malzemeler için de erozyon çalışmaları genişletilebilir.
- Erozyon davranışının belirlenmesinde, sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen sayısal çalışmalar uygun sonuçlar elde edilememiştir. Malzemelerin erozyon davranışını belirlemek için yeni yaklaşım olan Discrete Element Method kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Ally, S., 2010. Abrasive Jet Micro-Machining Of Metals, Master Thesis, Ryerson University, Canada,
- Alman D.E., Tylczak J.H., Hawk J.A., ve Hebsur M.G., 1999. Solid particle erosion behavior of an Si₃N₄-MoSi₂ composite at room and elevated temperatures, Mater.Sci.Eng., , A261, 45-251.
- ASTM-F1864, 2010. Standard Test Method for Dust Erosion Resistance of Optical and Infrared Transparent Materials and Coatings, ASTM, USA.
- ASTM G76, 2013. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets, ASTM, USA.
- Avcu, E., 2013. Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu İle Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Azimian, M. ve Hans, H.J., 2013. CFD simulation and experimental analysis of erosion in a slurry tank test rig, EPJ Web of Conferences, 45, 01009.
- Bağcı, M., 2010. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Bayındır, M.K., 2009. Katı Parçacık Erozyon Aşınmasının Alüminyum Alaşımları Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Bellman Jr., R., ve Levy, A., 1981. Mechanism of Erosion of Ductile Metals, Proceedings of International Conference on Wear of Materials, ASME, 564-576.
- Bitter, J.G.A., 1963. A Study of Erosion Phenomenon, Wear, 6, 5- 21.
- Erosive wear in piping systems, 2007. DNVGL-RP-O501 Recommend Practice, Germany.
- El Tobgy M.S., Ng E., ve Elbestawi M.A., 2005. Finite element modeling of erosive wear, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45, 1337-1346.
- Eryürek İ. B, 1993. Hasar Analizi, İ.T.Ü. Makine Fakültesi Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı, İstanbul.
- Evans, A.G., Gulden, M.E., ve Rosenblatt, M., 1978. Impact Damage in Brittle Materials in the Elastic-Plastic Response Regime, Proc. R. Soc. (London) A, 361, 343-365.
- Finnie, I., 1958. The Mechanism of Erosion of Ductile Metals, Proc. 3rd U.S. National Congress of Applied Mechanics, 527-532.

- Finnie, I., 1960. Erosion of Surfaces by Solid Particles, Wear, 3, 87-103.
- Finnie, I., 1960. An Experimental Study of Erosion, Proceedings of Society for Experimental Stress Analysis, 17-2, 65-70.
- Finnie, I., McFadden, D.H., 1978. On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence, Wear, 48, 181-190.
- Griffin D., Daadbin A., ve Datta S., 2004. The development of a three-dimensional finite element model for solid particle erosion on an alumina scale/MA956 substrate, Wear, 256, 900-906.
- Hadavi V., Moreno C. E., ve Papini M., 2016. Numerical and experimental analysis of particle fracture during solid particle erosion, part I: Modeling and experimental verification, Wear.
- Harsha A. P., ve Bhaskar D. K., 2008. Solid Particle Erosion Behaviour Of Ferrous And Non-ferrous Materials And Correlation Of Erosion Data With Erosion Models, Materials And Design, 29, 1745-1754.
- Hayat, F., ve Demir, F., 2009. Ticari Dp 600 Çelik Sacı NDK Birleştirmelerinde Kaynak Süresinin Dalma Derinliği Ve Dayanıma Etkisi, 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempoymu, Karabük, Türkiye.
- Hockey, B.J., Wirderhorn, S.M., ve Johnson, H., 1978. Erosion of Brittle Materials by Solid Particle Impact, Fracture Mechanics of Ceramics, 3, 379-402
- Hutchings, I., Winter, R., ve Field, J., 1976. Solid Particle Erosion of Metals: The Removal of Surface Material by Spherical Projectiles, Proceeding of the Royal Society of London, Series A, 348, 379-392.
- Hutchings, I.M, 1981. A Model for the Erosion of Metals by Spherical Particles at Normal Incidence, Wear, 70, 269-281.
- Hutchings, I.M. ve Levy, A.V., 1986. Thermal Effects in the Erosion of Ductile Metals, Proceedings of Conference on Corrosion-Erosion-Wear of Materials at Elevated Temperatures, Levy, A.V., Ed., NACE/EPRI/LBL/DOE-FE, Berkeley, 121-133.
- Hutchings, I.M., 1996. Tribology; Friction and Wear of Engineering Materials, St. Edmundsbury Press, London,.
- Johnson, G. ve Cook, W., 1983. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rate and high temperatures, In: Proceedings of the seventh international symposium on Ballistics, Hague, Netherlands.
- Kim, J. H., Joo, H. G. ve Lee, K. Y., 2015. Simulation of solid particle erosion in WCNi coated wall using CFD. Journal of Materials Processing Technology, 224:240-245.
- Küçükömeroğlu, T., 2003. Mühendislikte Hasar Sunum Notları, Trabzon.

- Lesuer D R., 2000. Experiment investigations of material models for Ti-6Al- 4V titanium and 2024-T3 Aluminum, Technical report.
- Levy, A. ve Man, Y.F., 1986. Elevated Temperature Erosion-Corrosion of 9Cr- 1Mo Steel, Wear, 111, 135-159.
- Levy, A.V., 1995. Solid Particle Erosion and Erosion-Corrosion of Materials, ASM International, 11-25.
- Li D. Y., Khaled E., Anderson M. J., ve Chiovelli S., 1999. A microscale dynamical model for wear simulation, Wear, 225-229, 380-386.
- Li W.Y., Yin S., ve Wang X.F., 2010. Numerical investigations of the effect of oblique impact on particle deformation in cold spraying by the SPH method, Applied Surface Science, 256, 3725-3734.
- Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., ve Zhang Y.W., 2014. A numerical study on the effect of particle shape on the erosion of ductile materials, Wear, 313, 135-142.
- Mehrotra, P.K., Sargent, G.A., ve Conrad, H., 1980. A model for the MultiParticle Erosion of Brittle Solids by Spherical Particles, Corrosion-Erosion Behavior of Materials, TMS-AIME, 127-145.
- MIL-STD-3033, 2012. Particle / Sand Erosion Testing Of Rotor Blade Protective Materials, ASTM, USA.
- Morrison, C.T., Scattergood, R.O., ve Routbort, J.L., 1986. Erosion of 304 stainless steel, Wear, 111, 1-13.
- Najafifard, F., 2014. Predicting Near Wall Particle Behavior With Application To Erosion Simulation, Phd Thesis, The University of Tulsa, USA.
- Nsoesie, S., 2013. Experimental Investigation and Analytical Modeling of Solid-Particle Erosion Behavior of Stellite Alloys, Master Thesis, Carleton University, Canada.
- Nguyen, Q.B., Nguyenb, V.B., Lima, C.Y.H., Trinhc, Q.T., Sankaranarayananana, S., Zhangd, Y.W. ve Guptaa, M., 2014. Effect of impact angle and testing time on erosion of stainless steel at higher velocities. Wear, 321: 87-93.
- Oka, Y.I., Olmogi, H., Hosokawa, T., ve Matsumura M., 1997. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact, Wear, 203-204, 573-579.
- Özbek, İ., 2016. Malzeme Seçimi ve Prensipileri Sunum Notları.
- Rao, P.V. ve Buckley, D.H., 1983. Time Effect of Erosion by Solid Particle Impingement on Ductile Materials, Proceedings of Sixth International Conference on Erosion by Liquid and solid Impact, 38.

- Ruff A.W. ve Ives L.K., 1975. Measurement Of Solid Particle Velocity In Erosive Wear, Wear, 35, 195-199.
- Sapate, S.G., ve Rama Rao, A.V., 2002. Effect of material hardness on erosive wear behavior of some weld-deposited alloys. Materials and Manufacturing Processes, 17(2), 187-198.
- Sheldon, G.L. ve Finnie, I., 1966. The Mechanism of Material Removal in the Erosive Cutting of the Brittle Materials, Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry, 88, 393-400.
- Sheldon, G.L. ve Kanhere, A., 1972. An Investigation of Impingement Erosion Using Single Particles, Wear, 21, 195-209.
- Shimizu, K. ve Noguchi, T., 1994. Erosion Characteristics of Ductile Iron with Various Matrix Structures, Wear, 176, 255-260.
- Shimizu K., Noguchi T., Seitoh H., Okada M., ve Matsubara Y., 2001. FEM analysis of erosive wear, Wear, 250, 779-784.
- Shin, B. G., 2010. Prediction of Sand Particle Trajectories and Sand Erosion Damage On Helicopter Rotor Blades, Phd Thesis, The Pennsylvania State University, ABD.
- Sundararajen,G., ve Roy,M., 1997. Review of Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, Tribology International, 30,339-359.
- Takaffoli M., ve Papini M., 2009, Finite element analysis of single impacts of angular particles on ductile targets, Wear, 267, 144–151.
- Tilly, G., 1973. Two Stage Mechanism of Ductile Erosion, Wear, 23, 87-96.
- URL-1, <http://docplayer.biz.tr/27264390-Kirilma-hasar-analizi-prof-dr-akgun-alsaran.html> 8 Şubat 2017.
- URL-2, <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ha/lecture1.pdf>. 8 Şubat 2017
- URL-3, <http://ascelikdemir.com/urunler/karbon-celikleri>. 4 Mayıs 2018.
- URL-4, <https://bircelik.com/tr/kategori/304-1-4301->. 4 Mayıs 2018.
- URL-5, <http://www.seykoc.com.tr/icerik/6061?dil=tr>. 4 Mayıs 2018.
- URL-6, <http://akyaymetal.com.tr/index.php/urunlerimiz-3/titanyum-alamimlari/titanyum-gr5>. 4 Mayıs 2018.
- URL-7, <http://www.muhandisalemi.com/hardox-celikleri-ve-hardox-400-celiginin-ozellikleri>. 4 Mayıs 2018.

- Wade, S. ve Wantenabe, N., 1987. Solid Particle Erosion of Brittle Materials (Part3) –The interaction with Material Properties of Target and that of Impingement Particle on Erosive Wear Mechanisms, Yogyo-Kyokai-Shi, 95-6, 573-578.
- Wang Y.F., ve Yang Z.G., 2008. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials, Wear, 265, 871–878.
- Wang Y.F., ve Yang Z. G., 2009. A coupled finite element and meshfree analysis of erosive wear, Tribology International, 42, 373–377.
- Wiederhorn, S.M., ve Lawn, B.R., 1979. Strength Degradation of Glass Impacted with Sharp Particles, Journal of American Ceramics Society, 62.
- Woggon, N. R., 2011. Particle Erosion of a Turbine with Rebound Analysis, Master Thesis, University of Cincinnati, Division of Research and Advanced Studies, USA.
- Woytowitz P. J., ve Richman R. H., 1999. Modeling of damage from multiple impacts by spherical particles, Wear, 233-235, 120-133.
- Yerramareddy S., ve Bahadur S., 1990. Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V, Wear, 142, 253-263.
- Yıldıran, Y., 2013. 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Zambelli, G. ve Levy, A.V., 1981. Particulate Erosion of NiO Scale, Wear, 68, 305-331.
- Zhou J., ve Bahadur S., 1995. Erosion-corrosion of Ti-6Al-4V in elevated temperature air environment, Wear, 186, 332-339.

7. EKLER

EK-1. Alümina Oksit Tozlarının Boyut Ölçüm Değerleri



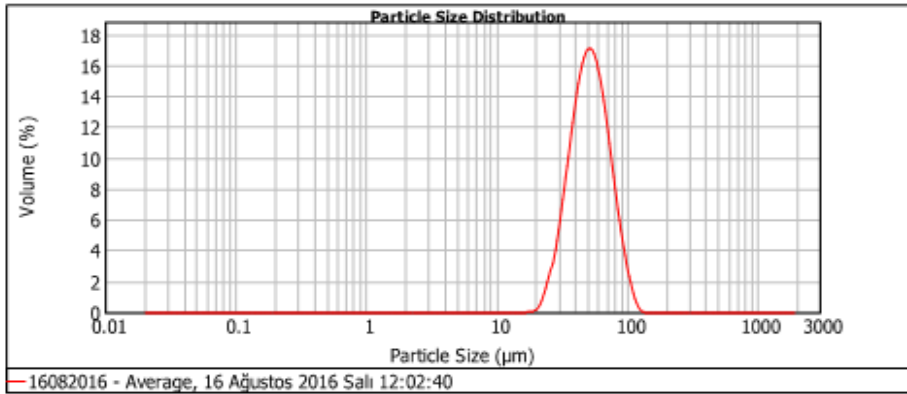
Result Analysis Report

Sample Name: 16082016 - Average
SOP Name:
Measured: 16 Ağustos 2016 Salı 12:02:40
Sample Source & type:
Measured by: casper
Analysed: 16 Ağustos 2016 Salı 12:02:41
Sample bulk lot ref:
Result Source: Averaged

Particle Name: Alumina
Accessory Name: Hydro 2000MU (A)
Analysis model: General purpose
Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.780
Absorption: 0.1
Size range: 0.020 to 2000.000 um
Obscuration: 1.03 %
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.330
Weighted Residual: 2.765 %
Result Emulation: Off

Concentration: 0.0070 %Vol
Span : 0.909
Uniformity: 0.284
Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.0316 m²/g
Surface Weighted Mean D[3,2]: 48.695 um
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 54.501 um

d(0.1): 33.160 um **d(0.5):** 51.572 um **d(0.9):** 80.043 um



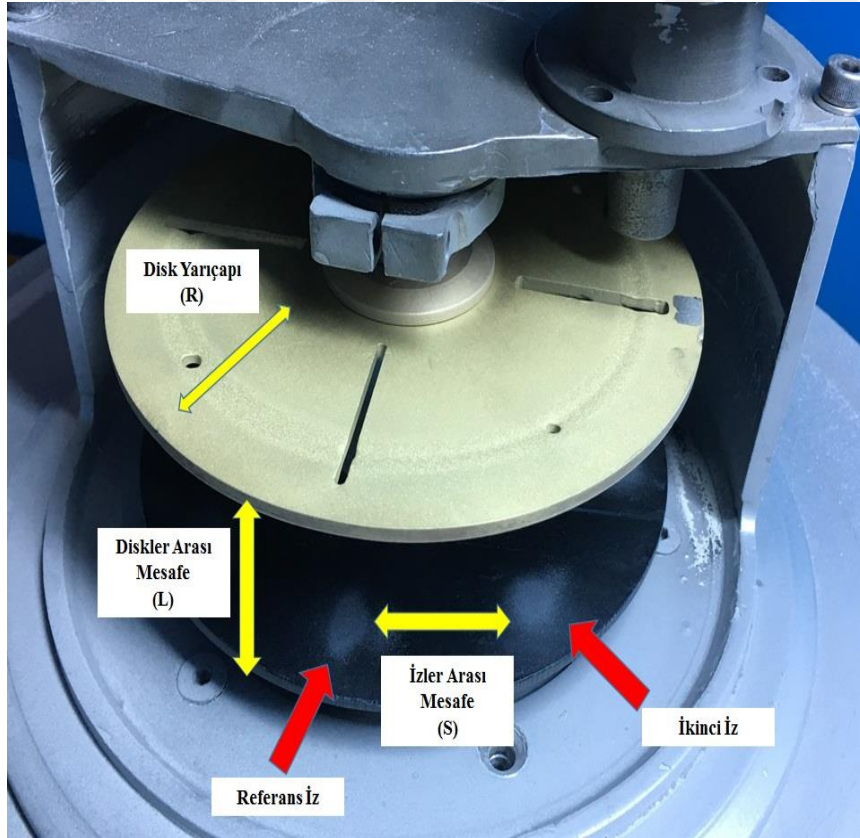
Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.100	0.00	1.006	0.00	11.402	0.00	100.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.933	0.00	138.038	0.00	1445.640	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.00	159.486	0.00	1655.927	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.00	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	0.04	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	1.59	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	3.74	275.423	0.00	2894.032	0.00
0.025	0.00	0.275	0.00	2.894	0.00	30.200	6.90	315.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.319	0.00	3.311	0.00	34.674	10.47	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.00	39.811	13.59	419.866	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.00	45.709	15.30	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.00	52.481	15.30	540.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.00	60.298	15.05	605.657	0.00	6606.034	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.00	69.183	12.93	724.436	0.00	7685.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.596	0.00	79.433	9.63	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.00	91.201	6.07	954.960	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.00	104.713	3.16	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	1.10	1258.925	0.00		

Operator notes:

EK-2. Çift Disk Hız Ölçüm Yöntemi

Çift Disk Yöntemi hız ölçümü, araştırmacı Ruff ve Ives tarafından 1975 yılında bulunmuş bir yöntemdir (Ruff ve Ives.,1975). Bu yöntem için özel olarak tasarlanmış bir hız ölçüm düzeneği (Şekil Ek 2.1.) kullanılmaktadır.

Çift disk hız ölçüm düzeneğinin çalışma prensibi ve hız ölçümü şu şekildedir. İlk olarak diskler sabit durumda iken hızı ölçülmesi istenen toz üst diskten belirli bir mesafede bulunan lüleden püskürtülür ve alt disk üzerinde “referans izi” oluşturur. Daha sonra diskler tahrik motoru yardımıyla istenilen belirli bir devirde döndürülür ve bu esnada toz tekrar lüleden püskürtülür. Üst diskte bulunan yarıklardan geçen toz, alttaki disk üzerinde iz yapıncaya kadar diskler döndürülmeye devam ettirilir. Alt diskte ikinci iz belirince diskler durdurulur ve iki iz arasındaki yatay mesafe (S) ölçülür. Deney sonunda disklerin yarıçapı (R), iki disk arasındaki mesafe (L) ölçülür (Şekil Ek 2.1.). Bu değerler, Denklem (2.4) te yerine koyularak tozların hızları ölçülmektedir.



Şekil Ek 2 1. Çift disk düzeneğinde hız ölçümü

Ek 2' nin devamı

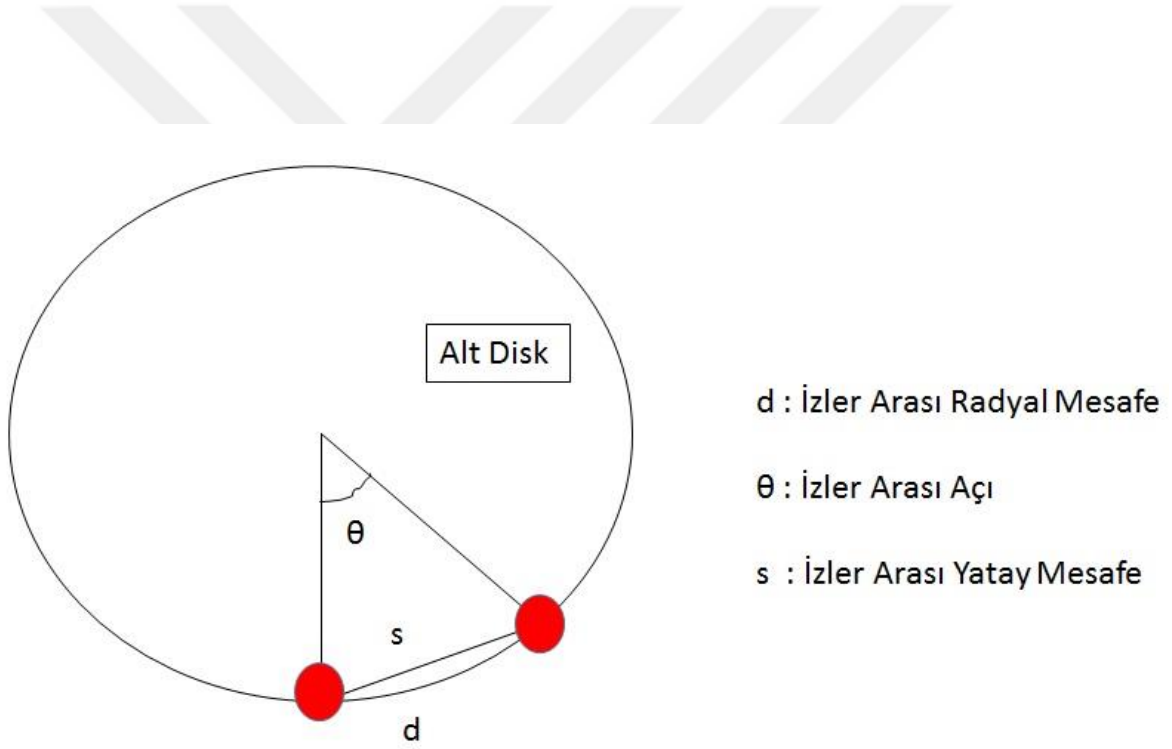
V_p hızıyla püskürtülen toz üst diskten alttaki diske geçme süresi (t);

$$t = \frac{L}{V_p} \quad (2.1)$$

V_p : Tozun Hızı (m /s)

L : Diskler Arası Mesafe (m)

t : Zaman (Dk)



Şekil Ek 2 2. Referans İz İle İkinci İz Arası Mesafenin Şematik Gösterimi

Disk dönerken ikinci iz, radyal olarak d mesafesi ilerlerken, yatay (S) mesafesi arasında fark ihmal edilebilir seviye olduğundan dolayı, yaklaşık olarak $d=S$ olarak alınabilir. Buna göre; alt diskte bulunan referans toz ile hızı ölçülmek istenen tozlar arasındaki yatay mesafe (S);

Ek 2' nin devamı

$$S = V_d \cdot t \quad (2.2)$$

S : Diskler Arası Yatay Mesafe (m)

V_d : Disklerin Hızı (m/s)

Denklem (2.2) den, zaman (t) çekilerek, Denklem (2.1) de yerine yazılırsa;

$$V_p = \frac{L V_d}{S} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3) deki disklerin hızı (V_d), açısal hız (ω) ve devir sayısı (n) cinsinden yazılırsa;

$$V_p = \frac{2 \pi n R L}{60 S}$$

ÖZGEÇMİŞ

Ali İhsan BUDUR, 1984 yılında İstanbul'da doğdu. Ortaöğrenimini İstanbul Plevne Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesinde 2002 yılında tamamlamıştır. Aynı yıl kazandığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünden 2007 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun olmuştur. Sırasıyla, Beydağı Mühendislik Ltd. Şti. firmasında proje mühendisi ve Giresun Ticaret ve Sanayi Odası'dan Sanayi Sicil Memuru olarak çalışmıştır. 2012 yılında mezun olduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Mekanik Anabilimdalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2015 -2017 yılları arasındaTürk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. (TAI) ile K.T.Ü. Makine Mühendisliği arasında yürütülen “Düşük Enerjili Çarpışma Altında Aşınma Kalkanında Meydana Gelen Hasarın Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” isimli projede bursiyer olarak görev yapmıştır. 2017 yılından beri Karadeniz Teknik Üniversitesi Arsin Meslek Yüksek Okulu'da Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.