

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





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
Mohammad Hussain DANESH Tarafından Hazırlanan**

**BAZI CAM VE PLASTİK ESASLI ŞEFFAF MALZEMELERİN KATI PARÇACIK
EROZYON PERFORMANSLARIN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 03 / 01 / 2020 gün ve 1835 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Üye : Doç. Dr. Hakan ADATEPE

Üye : Doç. Dr. Ömer Necati CORA



Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Katı parçacık erozyonu uzay ve havacılık, savunma, otomotiv, inşaat sektörü, denizcilik ve gemi sanayi gibi birçok endüstriyel alanda karşılaşılan önemli problemlerden biridir. Katı parçacık erozyon kaynaklı hasarlar malzemenin veya mekanizmaların kullanım koşullarını ve ömürlerini olumsuz etkilemektedir. Aşındırıcı parçacık ve aşınan malzemenin özellikleri erozyon türü aşınmada en etkin parametrelerdendir. Bu tez çalışmasında uzay ve havacılık, otomotiv ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan cam ve plastik esaslı (Polikarbonat, Pleksiglas ve Lamine camlar) bazı şeffaf malzemelerin katı parçacık erozyon performansları deneysel olarak incelenmiştir.

Tez çalışmam boyunca her türlü katkı ve desteklerini esirgemeyen, bilgi birikimleri ve tecrübeleriyle çalışmalarımı yönlendiren çok değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Ömer Necati CORA'ya ve KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarındaki olanakları kullanmamı sağlayan Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye şükranlarımı sunarım.

İlaveten tez çalışmamda benden yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Doğan ACAR ve değerli arkadaşım Hamza ÇOLAK'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yardım ve desteklerini hiç esirgemeyen anneme, babama, kardeşlerime ve karşılaştığım her türlü zorluk karşısında dimdik ayakta kalmamı sağlayan, beni cesaretlendiren ve her türlü şartta yanımda olan sevgili eşim Sümeyye DİLAVEROĞLU DANESH'e en içten sevgilerimi sunarım.

Mohammad Hussain Danesh
Trabzon 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bazı Cam ve Plastik Esaslı Şeffaf Malzemelerin Katı Parçacık Erozyon Performanslarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ömer Necati CORA'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarıda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak verdiğimi ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 27/01/2020

Mohammad Hussain DANESH

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Hasar Mekanizmaları.....	2
1.3. Aşınma ve Aşınma Türleri	4
1.3.1. Aşınma.....	4
1.3.2. Erozyon Aşınma Türleri	13
1.3.3. Katı Parçacık Erozyonuna Etki Eden Faktörler.....	15
1.3.4. Katı Parçacık Erozyon Aşınma Mekanizmaları	31
1.3.5. Sünek Malzemelerde Katı Parçacık Erozyonu	32
1.3.6. Gevrek Malzemelerde Katı Parçacık Erozyonu	36
1.3.7. Aşındırıcı Parçacıkların Kuvvet Analizi ve Yüze Etkisi	38
1.4. Tezin Konusu ve Amacı	39
2. TEZ KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	40
2.1. Deneysel Çalışmalar.....	40
2.1.1. Aşındırıcı Parçacıkların Özellikleri ve Hız Ölçümü.....	40

2.1.2. Katı Parçacık Erozyon Test Sistemi ve Deney Prosedürü.....	42
2.2. Numune Özellikleri	47
2.2.1. Polikarbonat (Polycarbonate solid sheet) Malzemesi ve Özellikleri.....	48
2.2.2. Pleksiglas (Polymethylmethacrylate) Malzemesi ve Özellikleri.....	51
2.2.3. Siyah ve Renksiz Lamine Cam Malzemesi ve Özellikleri	52
3. BULGULAR VE İRDELEMELER	56
3.1. Deneysel Bulgular	56
3.2. Hız Kalibrasyon Eğrisinin Eldesi	56
3.3. Erozyon Miktarının Zamana Göre Değişimi	60
3.3.1. Pleksiglas (Polymethylmethacrylate) Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi	60
3.3.2. Polikarbonat (Canopy) Malzemenin Erozyonunun Zaman Göre Değişimi	63
3.3.3. Renksiz Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi	66
3.3.4. Siyah Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi	69
3.3.5. Tüm Malzemelerin Erozyonunun Zamana Göre Değişiminin Karşılaştırılması	72
3.4. Erozyon Miktarının Çarpma Açısına Göre Değişimi	77
3.4.1. Pleksiglas (Polymethylmethacrylate) Malzemenin Erozyonunun Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Değişimi	77
3.4.2. Polikarbonat Malzemenin Erozyonu Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Değişimi	78
3.4.3. Renksiz Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Değişimi	80
3.4.4. Siyah Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Değişimi	81
3.4.5. Tüm Malzemelerin Kütsel Erozyonunun Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Değişimi	82
3.4.6. Tüm Malzemelerin Hacimsel Erozyonunun Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Değişimi	85
3.5. Erozyon Miktarının Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Değişimleri	87

3.5.1. Pleksiglas Malzemenin Erozyonunun Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Değişimleri.....	87
3.5.2. Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Değişimi	88
3.5.3. Renksiz Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Değişimi	90
3.5.4. Siyah Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Değişimi	91
3.5.5. Tüm Malzemelerin Erozyonu Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Değişimi... ..	92
3.5.6. Tüm Malzemelerin Hacimsel Erozyonu Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Değişimi	94
3.6. Aşındırıcı Parçacık Boyutunun Polikarbonat Malzemesinin Katı Parçacık Erozyonuna Etkilerinin İncelenmesi.....	99
3.6.1. Silika (SiC-220 grit) Aşındırıcı Parçacık için Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi.....	99
3.6.2. Silika (SiC-60 grit) Aşındırıcı Parçacık İçin Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi.....	100
3.6.3. Tüm Aşındırıcı Parçacık İçin Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Karşılaştırılması	102
4. SONUÇLAR.....	104
5. ÖNERİLER	105
6. KAYNAKLAR.....	106
7. EKLER	112
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BAZI CAM VE PLASTİK ESASLI ŞEFFAF MALZEMELERİN KATI
PARÇACIK EROZYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Mohammad Hussain DANESH

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ömer Necati CORA
2020, 112 Sayfa, 8 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında, otomotiv, havacılık uzay endüstrisi ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan tek tabakalı polikarbonat, pleksiglas ve lamine camlar gibi şeffaf malzemelerin katı parçacık erozyon performansları deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, katı parçacık erozyon testleri 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, sabit parçacık çarpma hızıyla (150 m/s) ve farklı çarpma açılarında (20°, 30°, 45°, 60° ve 90°) erozyon testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, sabit bir aşındırıcı parçacık çarpma açısında (90°) ve farklı parçacık çarpma hızlarında (75, 150 ve 190 m/s) erozyon davranışları incelenmiştir. Yapılan testlerin sonucunda, lamine camlarda ara katman malzemesi olan polivinil butiral yapıştırıcı, camların erozyon aşınmasını önemli ölçüde engellediği tespit edilmiştir. Cam, incelenen malzemeler arasındaki en gevrek malzeme olmasına rağmen nominal 52 µm boyutlu alümina (Al₂O₃) aşındırıcı parçacıklar karşısında yarı-sünek malzeme davranışı sergilemiştir. Hava araçlarında kanopi malzemesi olarak da kullanılan polikarbonat, test edilen malzemeler içinde en yüksek erozyon dayanımı performansını sergilemiş ve en yüksek erozyon miktarı, düşük çarpma açılarında meydana gelmiştir. Pleksiglas numuneler ise sünek davranış sergilemiş ve en yüksek erozyon miktarı düşük çarpma açılarında meydana gelmiştir. İlk iki aşama sonunda en iyi performansı sergileyen polikarbonat, 3. aşama kapsamında farklı boyutlu silika (SiC) kum testlere tabi tutulmuş ve parçacık boyutunun büyümesiyle birlikte erozyon miktarının da arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı parçacık erozyon, Polikarbonat, Lamine cam, Pleksiglas, Polivinil butiral (PVB)

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION ON THE SOLID PARTICLE EROSION PERFORMANCE OF SOME
GLASS AND POLYMERIC TRANSPARENT MATERIALS

Mohammad Hussain DANESH

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Ömer Necati CORA
2020, 112 Pages, 8 Pages Appendix

In this thesis, the solid particle erosion behavior of transparent materials such as monolayered polycarbonate solid sheet, plexiglass and laminated glasses which are widely used in automotive, aerospace and construction industries have been investigated experimentally.. The experimental studies have been carried out in three steps. In the first step, the experiments carried out at a constant erodent impact velocity of 150 m/s and at different impingement angles of 20°, 30°, 45°, 60° and 90°. In the second phase, the erosion losses of the same transparent materials were determined at a constant impingement angle of 90° under different impact velocities of 75, 150 and 195 m/s. As a result of these, it was observed that polyvinyl butyral which is used as an intermediate layer material in laminated glass, significantly prevented the progression of erosion wear. Glass is the most brittle among the tested materials, but exhibited as semi-ductile characteristics against alumina (Al_2O_3) abrasive particles of nominal 52 μm size which were used in the experiments. Polycarbonate solid sheet which is also used as canopy material in air vehicled have showed the highest erosion resistance performance among the tested materials. The highest amount of erosion losses of polycarbonate materials occurred at low impingement angles. Plexiglass materials exhibited ductile behavior and the highest amount of erosion occurred at low impact angles. At the final step, polycarbonate material was subjected to erosion tests with relatively bigger sized silica (SiC) sand and it was found that erosion loss increased with increasing abrasive particle size.

Key Words: Solid particle erosion, Polycarbonate solid sheet, Laminated glass, Plexiglass, Polyvinyl butyral (PVB)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Adhezif aşınma; a) metal-metal etkileşimi sonucu yüzeyler arası malzeme transferi, b) metallerin izafi hareketine bağlı pürüzlülüklerin tepelerinin ortadan kaldırılması, c) pürüz teması ile gerçekleşen bağ oluşumu (Bağcı, 2010)	6
Şekil 2. Abrazif aşınma mekanizması (Buckley, 1981)	8
Şekil 3. Korozyon aşınma mekanizması.....	9
Şekil 4. Kırılmanın oluşma mekanizmaları; a) malzemenin zayıf bölgesinde ilk kırılmanın oluşması, b) sürtünme ve adhezif aşınmadan dolayı kırılmanın ilerlemesi, c) ikinci kırılmanın başlaması, d) ikinci kırılma ve malzemede hasar meydana gelmesi (Batchelor ve Stachowiak, 1993)	10
Şekil 5. Katı parçacık erozyon aşınma mekanizması	11
Şekil 6. Erozyon aşınmasının türlerin örnekleri; a) kavitasyon, b) abrazif jet mikro işleme, c) boru dirsek aşınması, d) katı parçacık erozyonu.....	12
Şekil 7. Erozyon aşınma türleri	13
Şekil 8. Katı parçacık erozyonuna etki eden faktörler (Hutchings, 2000)	15
Şekil 9. Aşındırıcı parçacık çarpma açısının şematik gösterimi.....	16
Şekil 10. Sünek ve gevrek malzemelerin erozyon aşınma davranışlarının gösterimi (Finnie, 1995).....	17
Şekil 11. Cam gevrek malzeme davranışından sünek malzeme davranışına değişim gösterimi (Finnie, 1966).....	18
Şekil 12. Ti-6Al-4V alaşımı ve TiN malzemesi ile kaplanmış durumlarında farklı çarpma açılarındaki erozyon miktarları(Pieters ve Liu, 2001)	19
Şekil 13. Farklı ısıl işlem görmüş çeliklerin aşındırıcı parçacık hızına göre erozyon davranışları (Kosa, 2016).....	21
Şekil 14. Ti-6Al-4V alaşım malzemesi için erozyon oranının aşındırıcı parçacık hızı ile göre ilişkisi (Yerramareddy ve Bahadur, 1990).....	23
Şekil 15. Farklı araştırmalardan elde edilen bakır malzemesinin erozyon oranları (Bayındır, 2009).....	24

Şekil 16. Aşındırıcı parçacık boyutunun erozyon oranına etkisi, a) farklı aşındırıcı parçacık boyutlarının ve çarpma açısının erozyon oranına etkisi, b) parçacık çarpma açısı ile aşındırıcı parçacık boyutunun erozyon oranına etkisi (Merrison vd., 1986).....	26
Şekil 17. SS 304 paslanmaz çeliğin erozyon miktarının parçacık boyutuna göre değişimi (Sundarajan ve Roy, 1997).....	27
Şekil 18. Aşındırıcı parçacık şekil parametreleri (Bahadur ve Badruddin, 1990).....	28
Şekil 19. Aşındırıcı parçacık şekli ve boyutunun erozyon oranına etkisi (Oka vd., 2005) .	29
Şekil 20. Erozyon aşınmasında karşılaşılan muhtemel mekanizmalar (Balcı, 2009).....	31
Şekil 21. Metallerde katı parçacık erozyonu ile malzeme kaybı mekanizmaları, a) kesme, b) deformasyon (O'Flynn vd., 2001).....	33
Şekil 22. Sünek ve kırılğan malzemelerde kütle kaybının aşındırıcı parçacıkların toplam kütlesiyle ilişkisi (Barkoula ve Karger-Kocsis, 2002).....	34
Şekil 23. Gevrek malzeme katı parçacık erozyon mekanizması: a) konik ve orta çatlağın oluşumu, b) orta çatlağın kapanması ve yatay çatlakların oluşumu,c) aşındırıcı tarafından oluşturulmuş gevrek kraterin gösterimi (Parsi vd., 2014)	36
Şekil 24. Yüzeyle temasta olan bir aşındırıcı parçacığa etki eden kuvvetler (Hutchings, 1987)	38
Şekil 25. Çift disk hız ölçüm düzeneği.....	41
Şekil 26. KTÜ katı parçacık erozyon test düzeneği görüntüsü	42
Şekil 27. KTÜ katı parçacık erozyon test sistemi kabin içi görüntüsü	43
Şekil 28. Erozyon testlerinde kullanılan lüle teknik resmi (1/8" lüle çapı).....	44
Şekil 29. a) Polikarbonat numunenin boyutları, b) Test numunelerinin görüntüsü	48
Şekil 30. Polikarbonat (PC) malzemesinin diğer plastik malzemelere göre darbe dayanımının karşılaştırması (URL-2, 2019)	49
Şekil 31. Polikarbonat levha malzemenin görüntüsü	50
Şekil 32. Farklı kalınlıklardaki pleksiglas levha malzeme	52
Şekil 33 Camın ana bileşenleri (Kaçar, 2008).....	53
Şekil 34. Lamine cam üretim hattı (URL-6, 2019).....	54
Şekil 35. Lamine cam malzeme üretim montaj yapısı (URL-6, 2019).....	55

Şekil 36. Alümina oksit (Al_2O_3 -240 grit) aşındırıcı parçacığının hız-basınç kalibrasyon grafiği	57
Şekil 37. Silika (SiC-220 grit) aşındırıcı parçacığın hız-basınç kalibrasyon grafiği.....	58
Şekil 38. Silika (SiC-60 grit) aşındırıcı parçacığın hız-basınç kalibrasyon grafiği.....	59
Şekil 39. Pleksiglas malzemesinde sabit çarpma açısı (90°) değerinde değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi	61
Şekil 40. Pleksiglas malzemesinde 2100 mbar basınç (150 m/s) değerinde değişik çarpma açılarındaki oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi 62	
Şekil 41. Polikarbonat malzemesinde sabit çarpma açısında (90°) değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	64
Şekil 42. Polikarbonat malzemesinde 2100 mbar basınç (150 m/s) değerinde değişik çarpma açılarındaki oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi 65	
Şekil 43. Renksiz lamine cam için sabit çarpma açısında (90°) değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi	67
Şekil 44. Renksiz lamine cam malzemesinde 2100 mbar basınçta (150 m/s) değişik çarpma açılarındaki meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi	68
Şekil 45. Siyah renkli lamine cam için sabit çarpma açısında (90°) değişik çarpma hızlarında oluşan erozyon miktarlarının zamana göre değişimi	70
Şekil 46. Siyah renkli lamine cam numunede 2100 mbar basınç (150 m/s) değerinde değişik çarpma açılarındaki oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi.....	71
Şekil 47. 90° sabit çarpma açısında tüm malzemelerde 2100 mbar (150 m/s) sabit test basınçta oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimin karşılaştırılması	73
Şekil 48. 30° sabit çarpma açısında tüm için 2100 mbar (150 m/s) sabit test basınçta oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişiminin karşılaştırılması	74
Şekil 49. Test edilen tüm numunelerin sabit aşındırıcı parçacık hızı 150 m/s ve farklı çarpma açısının görüntüleri; a) pleksiglas, b) polikarbonat, c) renksiz lamine cam, d) siyah lamine cam.....	76
Şekil 50. Pleksiglas malzemesinde 2100 mbar (150 m/s) test basıncına meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	78
Şekil 51. Polikarbonat malzemesinde 2100 mbar (150 m/s) test basıncında elde edilen kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	79

Şekil 52. Renksiz lamine cam malzemesinde 2100 mbar (150 m/s) basınçta oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	80
Şekil 53. Siyah lamine cam malzemesinde 2100 mbar (150 m/s) basınçta oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi.....	82
Şekil 54. Tüm malzemelerin 150 m/s (2100 mbar) hızında 16 dakika sonunda meydana gelen kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimlerinin karşılaştırılması	84
Şekil 55. Tüm malzemelerin 150 m/s (2100 mbar) hızında 16. dakika sonunda meydana gelen hacimsel erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimlerinin karşılaştırılması	86
Şekil 56. Pleksiglas malzemesinde 90°'lik sabit çarpma açısında meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının test basıncına göre değişimi	88
Şekil 57. Polikarbonat malzemesinde 90°'lik sabit çarpma açısında meydana gelen kütleli erozyon değerlerinin test basıncına göre değişimi.....	89
Şekil 58. Renksiz lamine cam malzemesinde 90°'lik sabit çarpma açısında meydana gelen kütleli erozyon değerlerinin test basıncına göre değişimi.....	90
Şekil 59. Siyah lamine cam malzemesinde 90°'lik çarpma açısında meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının test basıncına göre değişimi	92
Şekil 60. Tüm malzemelerin 90°'lik çarpma açısında 16 dakika sonunda oluşan kütleli erozyon değerlerinin test basıncına göre karşılaştırılması.....	93
Şekil 61. Tüm malzemelerde 90°'lik sabit çarpma açısında oluşan hacimsel erozyon miktarının basınca (çarpma hızına) göre karşılaştırılması	95
Şekil 62. Renksiz lamine cam malzemelerde sabit aşındırıcı parçacık hızının (v=150 m/s) farklı çarpma açılarındaki (90°, 60°, 45°, 30°, 20°) etkilerini gösteren kesit fotoğrafları	97
Şekil 63. Siyah lamine cam malzemelerde sabit aşındırıcı parçacık hızının (V=150 m/s) farklı çarpma açılarındaki (90°, 60°, 45°, 30°, 20°) etkilerini gösteren fotoğraflar	98
Şekil 64. Silika (SiC-220 grit) kum sabit çarpma açısı (90°) için polikarbonat malzemesinde çeşitli çarpma hızlarında meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimleri	100
Şekil 65. Silika (SiC-60 grit) kum sabit çarpma açısı (90°) için polikarbonat malzemesinde farklı çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi	101

Şekil 66. Farklı aşındırıcı parçacıkların sabit çarpma açısında (90°) ve çarpma hızında (150 m/s) etkisi altında polikarbonat malzemede oluşturduğu erozyon miktarının zamana göre değişimi..... 103



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Mühendislik dallarında ortaya çıkabilecek hasar sebepleri ve görülme sıklıkları (URL-1, 2019).....	3
Tablo 2. Mühendislik çalışma ortamında karşılaşılan hasar mekanizmaları ve görülme sıklıkları (URL-1, 2019).....	3
Tablo 3. Katı parçacık erozyonuna maruz kalan sistemler ve parçalar (Sundarajan ve Roy, 1997).....	13
Tablo 4. Erozyon miktarının aşındırıcı parçacık çarpma hızına göre test şartları.....	45
Tablo 5. Erozyon miktarının aşındırıcı parçacık çarpma açısına göre test şartları.....	46
Tablo 6. Polikarbonat malzemesi aşındırıcı parçacık çarpma hızına göre test şartları.....	46
Tablo 7. Polikarbonat malzemesi aşındırıcı parçacık çarpma hızına göre test şartları.....	47
Tablo 8. Erozyon test numunelerinin türleri ve kalınlıkları	47
Tablo 9. Polikarbonat malzemenin özellikleri (URL-4, 2019).....	49
Tablo 10. Pleksiglas malzemenin özellikleri (URL-5, 2019).....	51
Tablo 11. Lamine camın fiziksel ve mekanik özellikleri (URL-6, 2019)	55
Tablo 12. Alümina (Al ₂ O ₃ -240 grit) aşındırıcı parçacığına ait -basınç-hız değerleri	57
Tablo 13. Silika (SiC- 220 grit) aşındırıcı parçacığına ait basınç-hız değerleri.....	58
Tablo 14. Silika (SiC-60 grit) aşındırıcı parçacığına ait basınç-hız değerleri.....	59
Tablo 15. Pleksiglas numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri.....	61
Tablo 16. Pleksiglas numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri.....	63
Tablo 17. Polikarbonat numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri	64
Tablo 18. Polikarbonat numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri...	65
Tablo 19. Renksiz lamine cam sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri	67
Tablo 20. Renksiz lamine cam numunenin sabit hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri ...	69
Tablo 21. Siyah lamine cam sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri	70

Tablo 22. Siyah lamine cam sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri	72
Tablo 23. Tüm malzemelerin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri.....	73
Tablo 24. Tüm malzemelerin 30° çarpma açısındaki erozyon değerleri.....	75
Tablo 25. Pleksiglas numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri.....	78
Tablo 26. Polikarbonat numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri...	79
Tablo 27. Renksiz lamine cam numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri.....	81
Tablo 28. Siyah lamine cam numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri.....	82
Tablo 29. Tüm malzemelerin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri.....	84
Tablo 30. Tüm Malzemelerin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) hacimsel erozyon değerleri.....	86
Tablo 31. Pleksiglas numunenin sabit açısındaki (90°) erozyon değerleri.....	88
Tablo 32. Polikarbonat numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri.....	89
Tablo 33. Renksiz lamine cam numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri.....	91
Tablo 34. Siyah lamine cam numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri	92
Tablo 35. Tüm malzemelerin sabit çarpma açısındaki (90°) kütleli erozyon değerleri ...	94
Tablo 36. Tüm malzemelerin sabit çarpma açısındaki (90°) hacimsel erozyon değerleri ..	95
Tablo 37. Silik (SiC-220 grit) sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri.....	100
Tablo 38. Silika (SiC- 60 grit) sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri	101
Tablo 39. Tüm aşındırıcı parçacık çarpma açısı (90°) ve hızındaki (150 m/s) erozyon değerlerinin karşılaştırılması.....	103

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Sürekli olarak değişen ortam koşulları malzemelerde geniş çaplı hasarlara neden olmaktadır. Deniz kıyısında kayaların şeklini değiştiren dalgaların oluşturduğu kıyı erozyonu, çöllerdeki rüzgâr nedeniyle meydana gelen kayaların erozyonu bu hasarlara örnek olarak verilebilir. Aşınma etkisini gündelik hayatımızda; ayakkabıların zamanla yıpranması, bina camlarının kirlenmesi, kullandığımız mobilya ve eşyaların eskimesi, kesici aletlerin körelmesi gibi birçok örnekte bulunmaktayız. Mühendislik malzemeleri çalışma ortamında zararlı dış etkileri maruz kalmaktadır. Aşınma, bu zararlı dış etkilerden biri olup makina elemanlarının yüzeylerinde istenmeyen hasarlara yol açmaktadır. Tozlu çalışma ortamında katı parçacıkların bulunması, ağır çalışma şartlarında katı parçacıklar yüksek hızlarda ve farklı açılarda tekrarlı malzeme yüzeyine çarpma neticesinde erozif aşınma meydana gelmesine ve malzemelerin hasara uğramasına sebep olmaktadır. Aşınma türlerinden biri olan katı parçacık erozyonu, katı parçacıkların belli bir hızla bir yüzeye çarpması durumunda yüzeyin üst tabakasında malzeme kaybı meydana gelmektedir. Malzemelerin üst yüzeyi tabakaların zamanla bağlı olarak aşınmasının devam etmesi halinde, kullanım yerine bağlı çok ciddi mekanik hasarlar neden olup makina elemanının ömründe azalma meydana gelmektedir. Katı parçacık erozyonu farklı alanlarda örnek; Uzay ve havacılık uygulamalarında, jet motorlarında, helikopter rotor kanatlarında, otomotiv ön ve yan camlarında, hidroelektrik santrallerin türbinlerde ve kömür dönüştürme santrallerinde bu aşınma tipi sık sık karşımıza çıkmaktadır. Makina elemanlarının hurdaya ayrılmasındaki en büyük neden aşınmadır. Aşınma sonucunda ortaya çıkan malzeme kayıpları, hasar gören makina elemanının yenisiyle değişmesi zorunluluğu, bakım-onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve enerji gibi sebepler firmalara iş yükü çıkarmaktadır. Bilim insanları ve araştırmacılar aşınma etkisini azaltmak için çeşitli laboratuvar ortamlarında çalışmalarına devam etmektedirler. Günümüzde mühendisler makina parçalarının tasarımlarında oluşabilecek hasarların etkilerini dikkate alarak hesaplamalar yapmaktadırlar.

1.2. Hasar Mekanizmaları

Farklı türden makine elemanları, çalışma koşullarının da etkisiyle zamanla kendilerinden beklenen performansı sergileyemez ve kullanılamaz hale gelir.. Bu durum, hasar olarak tanımlanmaktadır. Hasar, bir makina elemanın tasarımında, imalat işlemleri sırasında, montaj sırasında ve uygun olmayan çalışma şartları süresince meydana gelebilmektedir (Öndürücü ve Kanbir, 2017).

Mühendislik yapılarında oluşan hasarların belirlenmesi ve bu hasarların giderilmesi büyük önem arz etmektedir. Bazı mühendislik dallarında karşılaşılan hasarların muhtemel sebepleri ve görülmek sıklıkları Tablo 1’de verilmiştir (URL-1, 2019). Bu tabloya göre mühendislikte en fazla hasar, yanlış malzeme seçiminden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı, mühendislerin makina elemanı tasarımı yaparken malzeme seçiminde oldukça dikkatli davranmaları gerekir. Bu hasarların bir veya birkaçının birleşimi sonucu, makina elemanı ve malzemelerin yapısında ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir. İmalat işlemlerinde, bir milin kaba olarak işlenmesi, gerilme yığılmasına sebebiyet veren keskin köşelerin oluşması, millerdeki çizikli oyuk yüzeyler vb. yorulma çatlaklarına sebebiyet verir (Ay ve Sakin, 1998). Örneğin, civata ve somun bağlantılarındaki verimsiz bir yağlama, dişlerde aşınmaya ve bağlantının gevşemesine yol açabilir.(Ay ve Sakin, 1995).

Hasar sebeplerini bulmak amacıyla yapılan bilimsel incelemeler ve araştırmalar hasar analizi olarak nitelendirilir. Çeşitli mühendislik çalışmalarında karşılaşılan hasar mekanizmaları ve bunların rastlanılma sıklıkları Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde, mühendislikte en çok karşımıza çıkabilecek hasarın korozyon hasarı olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Mühendislik dallarında ortaya çıkabilecek hasar sebepleri ve görülme sıklıkları (URL-1, 2019)

Hasar sebepleri	% Sıklık
Yanlış malzeme seçimi	38
Üretim	15
Hatalı ısıl işlem	15
Tasarım hatası	11
Beklenmeyen çalışma şartları	8
Uygun olmayan çalışma şartları	6
Kalite kontrol eksikliği	5
Malzeme karışması	2

Tablo 2. Mühendislik çalışma ortamında karşılaşılan hasar mekanizmaları ve görülme sıklıkları (URL-1, 2019)

Hasar Mekanizması	% Sıklık
Korozyon	29
Yorulma	25
Gevrek kırılma	16
Aşırı yükleme	11
Yüksek sıcaklık korozyonu	7
Gerilmeli korozyon	6
Sürünme	3
Aşınma veya yenme (erozyon)	3

1.3. Aşınma ve Aşınma Türleri

1.3.1. Aşınma

Aşınma, tribolojinin bir alt konusu olup mekanizmalarda kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması nedeniyle oluşan hasar tipidir. Temas yüzeyinde oluşan mekanik etkileşimler, yüzeylerden parçacıkların kopmasına neden olmaktadır. Birbirine temas eden katı cisimlerin yüzeylerinden ince ve küçük parçacıkların ayrılması malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma, yüzey etkileşimi ile gerçekleşmekte ve mekanik, fiziksel, elektriksel, ısıl sebeplerle veya korozyon sonucu meydana gelebilmektedir. Aşınmanın meydana gelmesi için gerek ve yeterli şartlar aşağıdaki gibidir;

- Mekanizmalarda sürtünmenin olması (izafi hareket),
- Ani hareket ve darbe olması,
- Mekanik bir etkenin bulunması,
- Malzeme yüzeyinde istenmediği halde değişiklik oluşturması (Ludema, 1996),

Yüzey etkileşimi doğadaki birçok olayın gerçekleşmesinde de etkindir. Örneğin, yağmur ve sel nedeniyle olan toprak erozyonu, çöllerde kuvvetli esen kum rüzgârları nedeniyle kayaların aşınması, deniz kıyılarında bulunan kayalara çarpan dalgalar sonucu meydana gelen kıyı erozyonu bunlardan yalnızca birkaçıdır. Bunlara ilaveten, araba tekerlerinin zamanla aşınması, ayakkabı tabanlarının aşınması gibi gündelik yaşamın her alanında aşınmanın bir örneği karşımıza çıkabilmektedir.

Aşınma, mekanik sistemlerin performanslarını azaltmasına ve hatta hasara uğratmasına rağmen tasarımlarda çoğu zaman ihmal edilmektedir. Aşınma olayı, mühendislik uygulamalarında makina elemanlarının şekillerinde, yüzey kalitelerinde ve boyutlarında değişikliğe sebebiyet verip ve bazen de makina parçalarının değiştirilmesi durumunu ortaya çıkarır. Öte yandan, yüzey parlatma ve taşlama gibi bazı mühendislik yüzey işlemlerinde ise aşınma gereklidir.

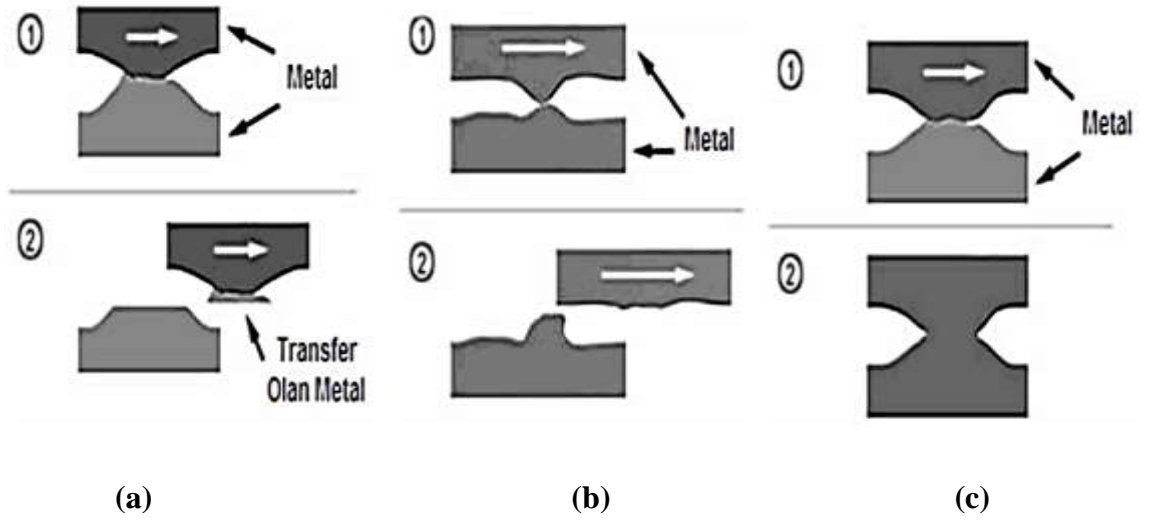
Günümüzde araştırmacılar tarafından aşınma için farklı tanımlar yapılmaktadır. Özet olarak aşınma; birbiri ile yüzey teması halinde olan katı cisimlerin kayma veya yuvarlanma hareketine maruz kaldıklarında oluşan malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır (Dodiya ve Parmar, 2016). Aşınma, malzeme ve büyük miktarda enerji kayıpları ile

sonuçlanabilmektedir (Stachowiak ve Batchelor, 2005). İki katı cisim yüzey teması halindeyken, aşınmanın meydana gelmemesi imkânsız olup mekanizma yeterli miktarda yağlanmış olsa dahi atomik boyutta aşınma oluşmaktadır (Buckley, 1981).

Aşınma, yüzey etkileşiminde bulunan parçaların malzemesine, çevreden kaynaklanan etkilere ve mekanizmaların çalışma şartlarına göre değişim göstermektedir (Fischer ve Bobzin, 2009). Aşınma sürecinde malzeme kaybı, zamanın veya kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak nitelendirilip, farklı çalışma koşulları (kayma hızı, yük, sıcaklık ve çevre) yüzey kalitesi (sertlik, tokluk, mikro yapı ve geometri) ve ara yüzey elementleri gibi değişkenlerden etkilenir (Basu ve Gosh, 2017). Aşınma nadiren yıkıcıdır; ancak sistemin çalışma verimliliğini azaltır, mekanizmanın güç kayıplarını, yağ tüketimini ve parçaların değişme sıklığını artırır. Aşınma, bir malzeme özelliği olmayıp, mühendislik bileşenlerinin bir özelliğidir. Yüzey teması olan iki cismin üzerine etkiyen yük, hız veya ortam koşullarında herhangi bir değişiklik olursa parçaların biri veya her ikisinin aşınma oranlarında çarpıcı bir değişiklik meydana gelebilmektedir (Eyre,1978). Aşınma, farklı mühendislik dallarında ve endüstride büyük sorunlara yol açmakta olup ekonomik olarak da çok büyük kayıplara neden olmaktadır (Monga vd., 2018). Mekanizmada aşınmanın oluşabilmesi için sadece yüzey temasında olan iki cismin bulunması gerekli değildir, sıvı-katı yüzey teması veya katı-hava yüzey teması olduğunda da aşınma meydana gelebilmektedir (Wright, 1969). Katı cisimlerin yüzey temasında iken izafi hareketleri neticesinde cisimlerin birinden veya ikisinden parçacıkların ayrılması ve diğer cismin yüzeyine geçmesi de aşınma olarak tanımlanmaktadır (Stachowiak, 2006). Aşınmayı oluşturan mekanizmaları daha detaylı incelemek amacıyla beş ayrı başlığa ayrılması uygundur. Bunlar, adhezif aşınma, abrazif aşınma, korozyon aşınma, yorulma aşınması ve erozyon aşınmasıdır.

1.3.1.1. Adhezif Aşınma (Adhesive wear)

Adhezif veya adhezyon aşınması en yaygın aşınma türüdür. Birbiriyle yüzey temasında olan katı cisimlerde çoğu kez adhezyon (yüze yapışma) oluşmaktadır. Malzemeler arasında aşırı yüksek yerel gerilmeler neticesinde malzemelerde plastik deformasyon, yapışma oluşumu, mikro kaynak sonucu birleşen parçaların kopması ve kopan parçaların bir yüzeyden diğerine taşınması adhezif aşınmasının karakteristiklerindedir (Zum, 1987). Bu tür aşınmanın görüldüğü yüzeyler çok kolayca tahrip edilebilir hatta çok yüksek sürtünme katsayısının oluşmasına neden olup mekanizmayı kilitleyebilmektedir. Metaller genelde adhezif aşınmaya maruz kalırlar. Makina sistemlerinde yağlamamanın yetersiz kaldığı durumlarda adhezif aşınma meydana gelir (Stachowiak vd., 2005). En önemli aşınma türlerinden biri olan adhezif aşınma, birbirine göre hareket eden makina elemanların kayma yüzeyleri arasındaki birleşme bölgelerinde (junction) meydana gelmektedir (Dodiya vd., 2016). Çok iyi parlatılmış yüzeyler bile atomik boyutta bazı noktalarda temas oluşur. Çok yüklemeler altında bile bu noktalarda çok büyük gerilmeler ve mikro kaynaklar meydana gelir. Kayma hareketi esnasında bu noktaların kesilmesi neticesinde aşınma olayı gerçekleşmektedir (Şekil 1) (Bağcı, 2010).



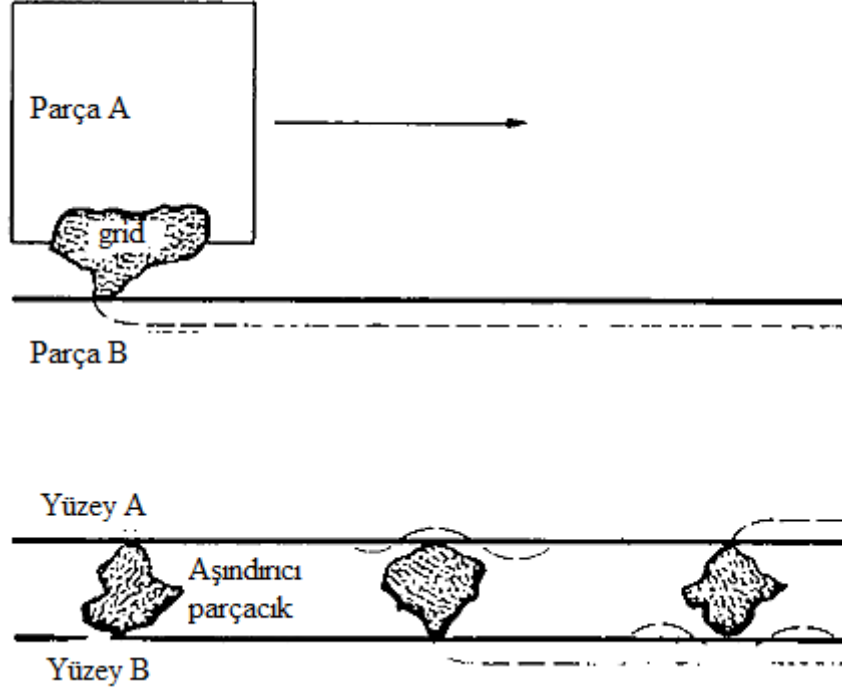
Şekil 1. Adhezif aşınma; a) metal-metal etkileşimi sonucu yüzeyler arası malzeme transferi, b) metallerin izafi hareketine bağlı pürüzlülüklerin tepelerinin ortadan kaldırılması, c) pürüz teması ile gerçekleşen bağ oluşumu (Bağcı, 2010)

adhezif aşınmadan kaynaklanan hasarları önlemek için makina eleman tasarımında dikkat edilmesi gereken bazı hususlar aşağıda sıralanmıştır;

- Temas yüzeylerindeki pürüzlülük ne kadar azaltılırsa aşınmayı önlemek o kadar mümkün olabilir. Dolayısıyla, parçaların yüzey pürüzlülükleri düşürülmeye çalışılmalıdır, lâkin bu da maliyeti artırabilir.
- Temas çiftlerinde kullanılan malzemeler birbiriyle uyumlu, benzer veya kolay alışım yapabilen malzemeler arasından tercih edilmelidir.
- Birbiri içerisinde çözünmeyen iki metal bir arada kullanılırsa mikro kaynak oluşumu engellenmiş olacak ve aşınma gecikecektir. Ancak, pratikte bu türden malzemelerin kullanımı oldukça sınırlıdır.
- Metal-metal yüzeylerinde fosfat kaplama gibi kimyasal filmler aşınmayı az da olsa engellemektedir.
- Mekanizmada iyi bir yağlama yöntemi kullanılmalıdır. Bu şekilde sürtünme katsayısı azaltılır ve ortamda bulunan ısının uzaklaştırılması sağlanır. Böylece mikro kaynak bölgelerinin oluşması önlenir.

1.3.1.2. Abrazif Aşınma

Mekanizmada eş zamanlı çalışan parçaların birinden kopan sert ve keskin parçacıklar veya ortamdan çalışma düzlemine giren küçük boyuttaki toz ve talaşlar nedeniyle oluşan aşınma türü abrazif aşınma olarak adlandırılmaktadır. Yüzeyler arasında bulunan bu parçacıklar, zamanla zımpara tozu gibi kazıyıcı bir etki yaparak eğeleme ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu aşınma türü, birçok alanda özellikle tarım ve endüstride çok yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır (Hossaeini ve Radziszewski, 2011). Endüstride makina elemanları hasarlarının %50'si abrazif aşınmadan kaynaklanmaktadır (Elleuch vd., 2006). Şekil 2'de gösterildiği gibi sert ve keskin parçacık yumuşak parçanın yüzeyine gömülüp diğer parçanın yüzeyinde çizik ve/veya oluk açmaktadır.



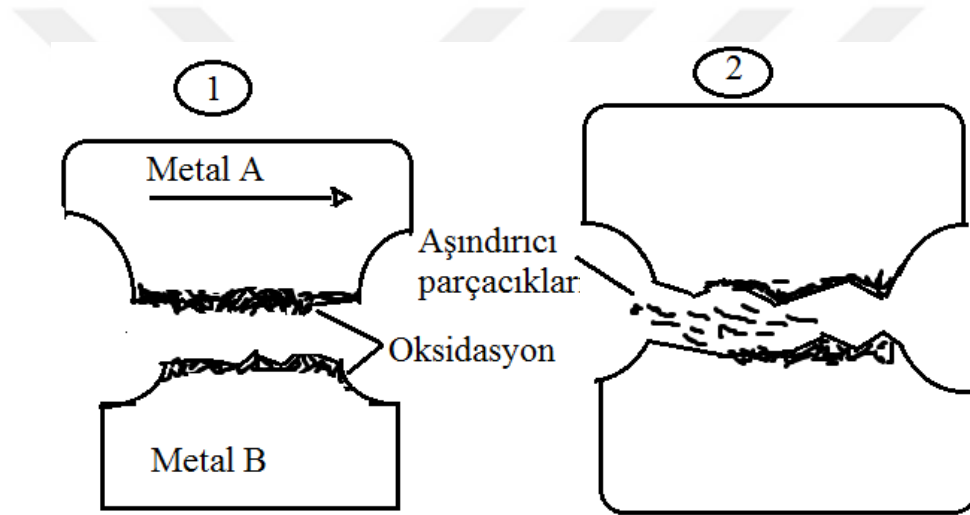
Şekil 2. Abrazif aşınma mekanizması (Buckley, 1981)

Abrazif aşınma hasarını en aza indirmek için yapılması gerekenler aşağıda verilmiştir:

- Mekanizmalarda eş çalışan yüzeylerin arasına dışarıdan zararlı parçacıkların girmemesi için yüksek performanslı sızdırmazlık elemanları kullanılmalıdır. Sistemdeki hava, su ve yağlar filtre edilerek zararlı parçacıklar mekanizmadan uzaklaştırılmalıdır.
- Abrazif aşınmanın engellenmesinde en etkili yol, yüzey ısıtma işlemleridir (Buckley, 1981). Eş çalışan yüzeylerde aşınmanın oluşmaması için yüzeylere ısıtma işlemi uygulanmalıdır. Ancak yüzey sertleştirme işlemi, gevrek kırılma riskini artmaktadır.
- Sistemde abrazif aşınmaya maruz kalabilecek parçaların kolayca değiştirilmesi için uygun tasarımlar yapılmalıdır.
- Abrazif aşınmaya maruz kalan sistemler çalışırken talaştan ve diğer zararlı parçacıklardan sık sık temizlenmelidir.

1.3.1.3. Korozyon Aşınması

Mekanik bileşenlerde sıkça karşılaşılan bir diğer aşınma şekli korozyon aşınmasıdır. Makina parçalarının çevresinde bulunan oksijen ve diğer atmosferik gazlar ile kimyasal etkileşime girerek ince ve sert bir oksit tabakası oluşturur. Bunun bir sonucu olarak da korozyon aşınması meydana gelmektedir. Bu oksit tabakası değişken yük altında kırılır ve yerinden ayrılarak aşındırıcı parçacıklara dönüşür. Temiz kalan temas yüzeyleri tekrar çevresinde bulunan atmosferik gazlar (oksijen ve diğer gazlar) ile kimyasal etkileşime girer ve yeniden oksit tabakası oluşur, bu oksit filmi yük altında tekrar kırılır ve süreç bu şekilde tekrarlı olarak devam eder.

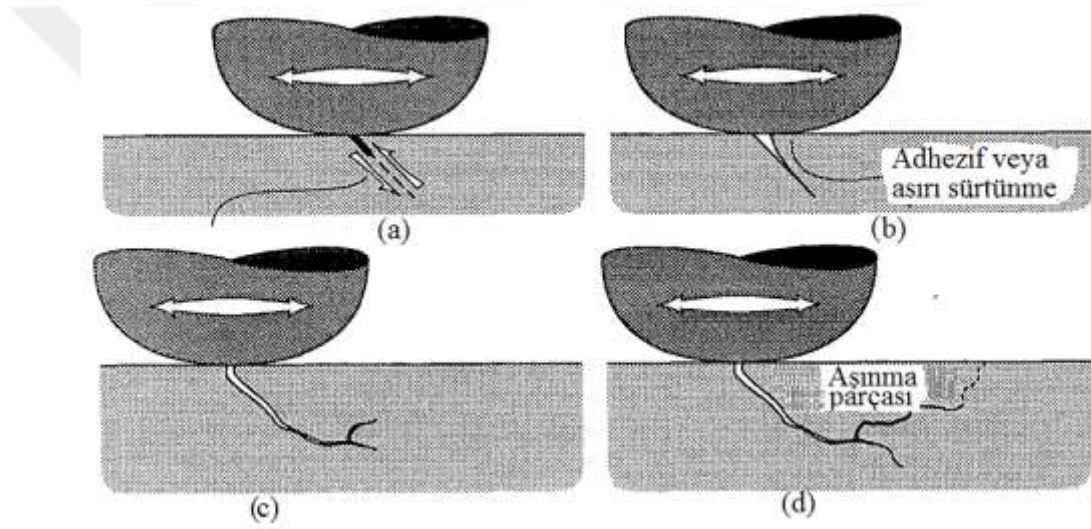


Şekil 3. Korozyon aşınma mekanizması

Metallerin çevresi ile etkileşimini korumak amacıyla bazen kontrolü korozyon aşınması istenebilir. Buna örnek, metallarda oluşan oksit tabakasının, oksidasyonun yayılmasını yavaşlatmasıdır. Korozyon aşınmasında en önemli faktör, oksit tabakasıdır. Oksit tabakası çok ince olursa metallerin yüzeyinde yağlama görevi yaparak sürtünme katsayısını ve dolayısıyla adhezif aşınma miktarını azaltabilir (Buckley, 1981). Oksitten korunmak için yüzeyler fosfat veya sülfid ile kaplanmalı, ilaveten oksidasyonu önleyen özel yağlayıcılar kullanılmalıdır. Ayrıca birbiriyle reaksiyona girmeyecek alaşım elemanları seçilmelidir (Bağcı, 2010).

1.3.1.4. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, değişken yüklemeler sonucunda eş çalışan malzemelerin temas yüzeyinde çok küçük çukurların oluşması ile meydana gelir. Malzemenin zayıf olan bölgesinde maksimum kayma gerilmesinin oluşması, malzemede plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu olay özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi makina elemanlarında, yani yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeyinde ortaya çıkmaktadır. Bu elemanlarda temas yüzeyleri küçük olduğundan yüzeylerde Hertz basınçları meydana gelir.

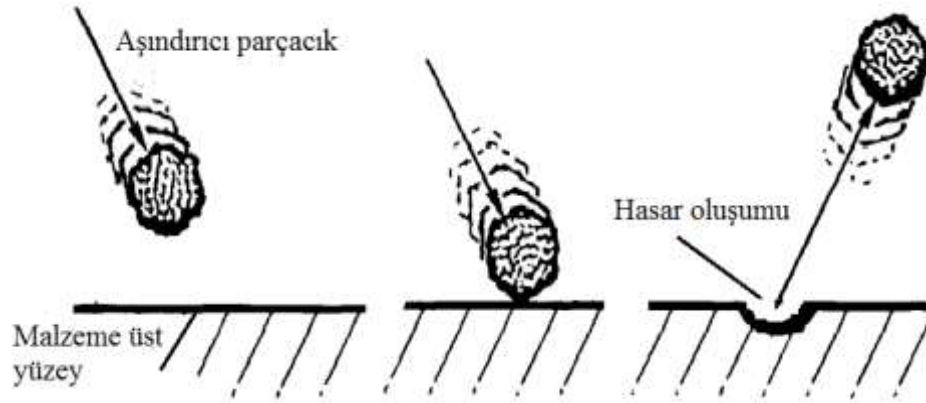


Şekil 4. Kırılmanın oluşma mekanizmaları; a) malzemenin zayıf bölgesinde ilk kırılmanın oluşması, b) sürtünme ve adhezif aşınmadan dolayı kırılmanın ilerlemesi, c) ikinci kırılmanın başlaması, d) ikinci kırılma ve malzemede hasar meydana gelmesi (Batchelor ve Stachowiak, 1993)

Malzemede Hertz basıncından dolayı oluşan çukurcukların çok küçük kalıp büyümediği ve yüzeye yayılmadığı durum basit oyuk (veya çukurcuk) korozyonu, çukurcukların zamanla büyüdüğü ve yayıldığı durum ise tahripkâr pitting olarak tanımlanır. Basit oyuk korozyonunda makina elemanının normal çalışması etkilenmezken tahripkâr oyuk korozyonunda ise makina elemanı kullanılamaz hale gelir. Yorulma aşınmanın oluşumunda malzemelerin doğal sertliği önemli rol oynamaktadır. Örnek, çeliğin yüzeyi sertleştirilirse çukurcuk oluşumu yavaşlatılabilir. Ayrıca bu aşınma türü yumuşak malzemelerde görülmemektedir (Bağcı, 2010).

1.3.1.5. Erozyon Aşınması

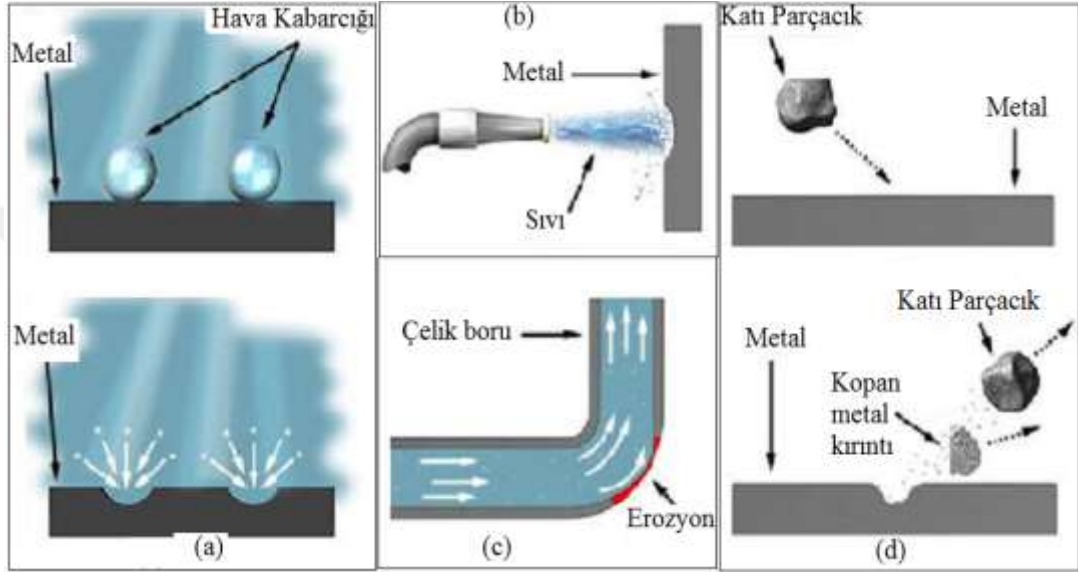
MIL-STD-3033 standardına göre; belirli bir hıza sahip olan katı parçacıkların malzeme yüzeyine belli bir açı ile çarpması durumunda, yüzeyin üst tabakasında malzeme kaybı meydana gelmesi ile sonuçlanan olay erozyon aşınması olarak tanımlanmaktadır. ASTM G76-13 standardına göre ise katı parçacık içeren akışkan belli bir hızla katı malzemenin yüzeyine çarptığında, malzemenin üst yüzeyinde mekanik etkileşimler meydana gelir. Bunun sonucu malzeme kaybı ve neticesinde malzemede hasarlar meydana gelmektedir. Bir akışkanın içerisinde katı parçacık bulunsun veya bulunmasın malzemenin yüzeyine çarptığında aşınma meydana gelir. Fakat genellikle akışkan, aşındırıcı parçacık içerdiği takdirde, hedef malzemede erozyon aşınması meydana gelir (Wright, 1969). Tekrarlı aşındırıcı parçacığın püskürtülmesiyle belli bir süreden sonra çarptırıldığı yüzeyde pürüzlülük meydana gelmekte ve böylece erozyon aşınması malzemede ciddi mekanik hasarlara yol açabilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Katı parçacık erozyon aşınma mekanizması

Makina elemanlarının eroziv ortamlarda bulunması durumunda yüzeylere sıvı damlamaları veya katı parçacıkların çarpması sonucu parçaların ömürlerinde ciddi azalmalar meydana gelebilmektedir. Bir yüzeye katı parçacıkların çarpmasıyla meydana gelen malzeme kaybı, erozyon aşınmasının en yaygın türüdür. Bu tip hasar türüne en çok rastlanan yerler, uzay ve havacılık araçları, jet motorları, helikopter rotor kanatları, uçak radomu ve kanat hücum kenarlarına katı parçacıkların çarpması, enerji dönüşüm sistemlerinde kömürün küçük tanecikler halindeki yaygın kullanılması, büyük türbinlerde oksit tabakalarının

kopması ve ardından kanatların yüzeyine çarpması gibi durumlardır. Sıvı kaynaklı katı parçacık erozyonunda ise aşındırıcı parçacık hareketli kanatlara, valf deliklerine, boru bağlantılarına, boru dirseklerine ve diğer yüzeylere çarpılarak şiddetli aşınmalar meydana getirir. Şekil 6'da erozyon aşınma türlerinin farklı alanlarda oluşturabileceği hasarlar gösterilmiştir.



Şekil 6. Erozyon aşınmasının türlerinin örnekleri; a) kavitasyon, b) abrasif jet mikro işleme, c) boru dirsek aşınması, d) katı parçacık erozyonu

Endüstride katı parçacık erozyonundan çeşitli alanlarda faydalanılmaktadır. Katı parçacık erozyonu, en yaygın olarak temizleme (kumlama) işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu işlemde işlenmiş parçalar üretimden sonra veya zaman içerisinde çevresinden pas, yağ ve boya gibi faktörlerden etkilenen parçalar temizlenir. Buna ilaveten abrasif jet mikro işleme (AJM) ile parça kesme işlemi de katı parçacık erozyonuna örnek olarak verilebilir.

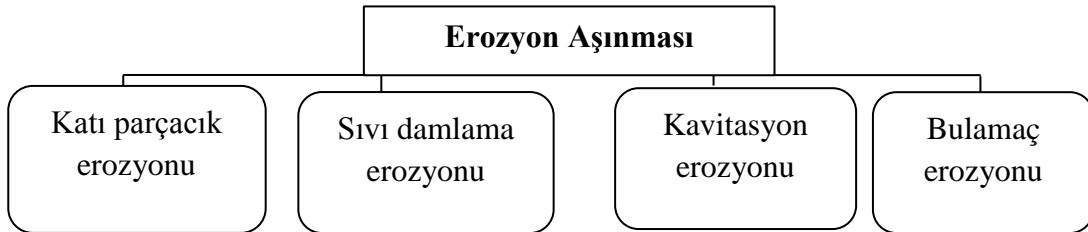
Katı parçacık erozyonu çoğu zaman istenmeyen hasarlara yol açmaktadır. Tablo 3'te katı parçacık erozyon aşınmasından olumsuz etkileyen sistemler ve parçalar gösterilmiştir.

Tablo 3. Katı parçacık erozyonuna maruz kalan sistemler ve parçalar
(Sundarajan ve Roy, 1997)

SİSTEM	PARÇALAR
Kimya Endüstrisi	Hava akışıyla aşındırıcı parçacık taşıyan iletim tüpleri
Hidrolik Maden Makinaları	Pompa ve Vanalar
İtme Mekanizmaları	Roket motor kuyruk lülesi, silah namlusu
Yanma Sistemleri (Odaları)	Yanma lüleleri, ısıtıcılar
Akışkan Ortamlı Yanma Odaları	Boyer ısı değiştircileri, genişleme türbinleri
Kömür Gazlaştırma İşlemi	Türbin, kilit hazne valfleri
Kömür Sıvılaştırma İşlemi	Buhar akışı kısma vanaları
Uçak Motoru	Kompresör ve türbin kanatları
Helikopter Motoru	Rotor ve gaz türbin kanatları

1.3.2. Erozyon Aşınma Türleri

Erozyon aşınması, hedef malzeme ve aşındırıcı madde arasındaki etkileşime bağlı olarak farklılık gösterir. Literatürde çoğunlukla erozyon dört gruba ayrılmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Erozyon aşınma türleri

1.3.2.1. Katı Parçacık Erozyonu

Hava/gaz karışımıyla ince ve keskin parçacıkların tekrarlı bir şekilde bir malzemenin yüzeyine çarptırılması sonucunda malzeme kaybı gerçekleşir. Katı parçacık erozyonu mühendislikte, kum püskürtme ile temizleme ve yüksek-hızlı aşındırıcı jet ile kesme gibi işlemlerde faydalar sağlmasına rağmen çoğu zaman ciddi hasarlara neden olmaktadır. Buna örnek olarak, kömürle çalışan enerji santrallerinde kullanılan türbinlerde, jet türbini ve boru dirseklerinde meydana gelen hasarlar verilebilir.

1.3.2.2. Sıvı Damlama Erozyonu

Malzeme yüzeyine sürekli sıvı damlaması veya çarptırılması sonucunda meydana gelen malzeme kaybı sıvı damlama erozyonu tanımlanmaktadır. Sıvı damlama veya çarptırma olayında, hedef malzemede aşırı yüksek yüzey temas basıncı meydana gelir ve malzemenin akma dayanımı aşılıp malzemeyi deformasyona uğratar. Uçak kanatlarının yağmur damlaları nedeniyle aşınması buna örnek olarak gösterilebilir.

1.3.2.3. Kaviteasyon Erozyonu

Kaviteasyon aşınması, genelde akım makinalarının fanlarında görülebilen bir sıvı erozyonu türüdür. Kaviteasyon sırasında, buharlaşma basıncının altındaki basınçlarda akışkan içinde yerel buharlaşmalar vuku bulmakta, daha sonra bu hava boşlukları çevresindeki sıvıyla hızlıca dondurulmakta ve bu sırada büyük bir basınç dalgası meydana gelmektedir. Bu basınç dalgası, çevresindeki metal üzerinde büyük hasarlara yol açabilmekte ve kısa zamanda bu parçalar (pompa kanatları, fan) kullanılmaz hale gelmektedir.

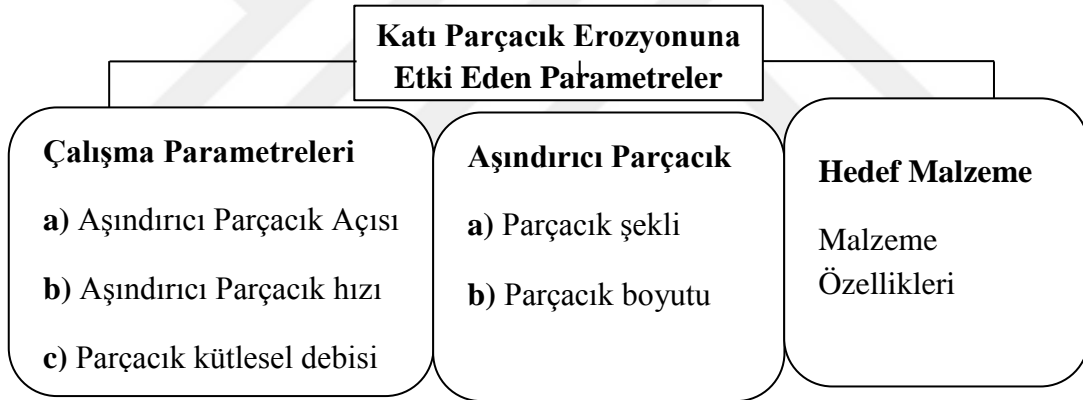
1.3.2.4. Bulamaç (Slurry) Erozyonu

Bulamaç erozyonu aşınması, içinde ince, küçük tozlar veya katı parçacık taşıyan sıvı bir malzemenin içinden veya yüzeyinden geçerse sıvı-katı parçacık ve malzeme ile arasında mekanik bir etkileşim gerçekleşir. Bu etkileşim sonucunda malzeme kaybı meydana gelir ve bu olay bulamaç (slurry) erozyonu olarak ifade edilir.

Karşılaştığı yerlere örnek olarak petrol sahası mekanik ekipmanları, katı-sıvı hidrolik taşıma sistemleri, hidroelektrik santralleri ve kömür sıvılaştırma tesisleri verilebilir (Nilkar vd., 2017) (Abouel-Kasem vd., 2010).

1.3.3. Katı Parçacık Erozyonuna Etki Eden Faktörler

Katı parçacık erozyonu diğer aşınma türleri gibi çok karmaşık olup çeşitli faktörlere bağlıdır. Katı, sıvı, gaz veya bu üç maddelerin birleşimi sonucunda makina elemanların yüzeylerinde oluşan çizik, çatlak, çukurcuk ve oyuk şeklindeki hasarlarda erozyon aşınması oldukça önemli etkiye sahiptir. Makina elemanların yüzeylerinde bu olumsuzlukların ortaya çıkmasında, esas malzeme özellikleri, aşındırıcı parçacık özellikleri, çalışma parametreleri ve çevresel etkenler çok önemli rol oynamaktadırlar. Katı parçacık erozyonunda etkili olan parametreler Şekil 8’de gösterilmiştir.

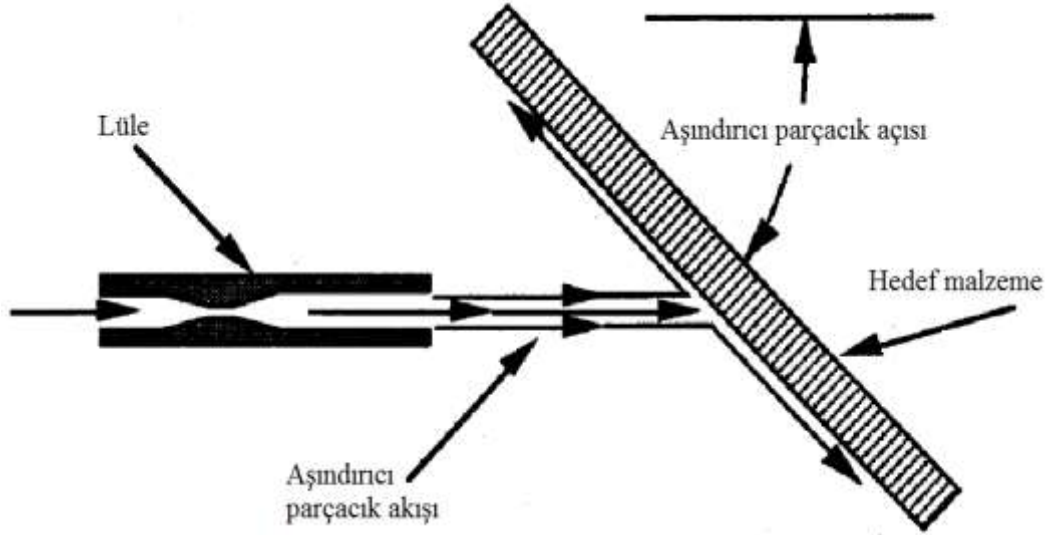


Şekil 8. Katı parçacık erozyonuna etki eden faktörler (Hutchings, 2000)

Şekil 8’de gösterilen parametreler dışında, parçacık tipi, erozyon testlerinin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ve nem gibi çevresel faktörler de test sonuçlarını etkilemektedir.

1.3.3.1. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısı

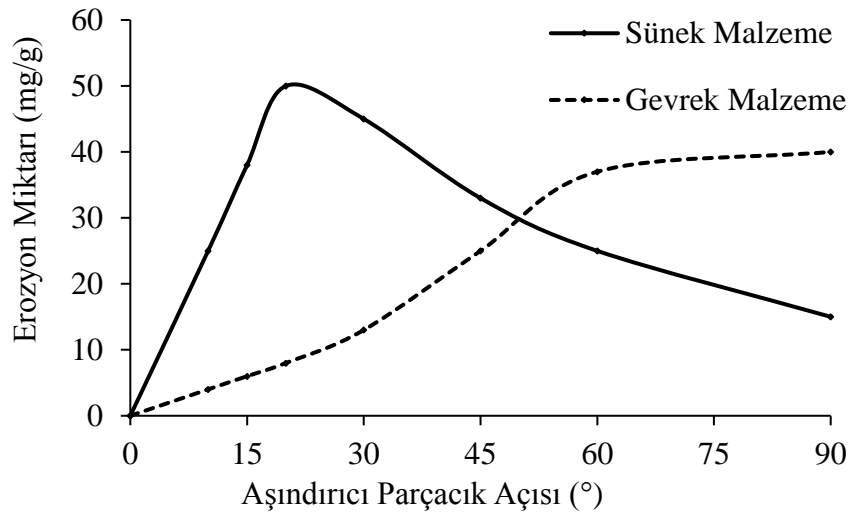
Katı parçacık erozyonunda en etkili parametrelerden biri olan aşındırıcı parçacık çarpma açısı, aşındırıcı parçacıklar ile hedef malzeme yüzey arasında oluşan açı olarak tanımlanmaktadır. Aşındırıcı parçacık açısı en düşük derecen (0°) en yüksek dereceye (90°) değişebilir. Genel olarak, metaller küçük açılarda ($15-30^\circ$) daha fazla erozyon aşınmasına uğrar. Öte yandan, seramik malzemeler ise dik açıda daha fazla erozyon aşınmasına maruz kalmaktadır (Hutchings, 1987). Şekil 9'de gösterildiği gibi yapılan araştırmalara göre sünek malzemelerde en yüksek erozyon oranı düşük aşındırıcı parçacık çarpma açılarında ($15-30^\circ$) meydana gelmekte iken gevrek malzemelerde en yüksek erozyon oranı, en yüksek aşındırıcı parçacık çarpma açısında (90°) meydana gelmektedir (Arjula vd., 2008). Şekil 9' da katı parçacık erozyonundaki parametreler ve aşındırıcı parçacık çarpma açısını gösterilmektedir



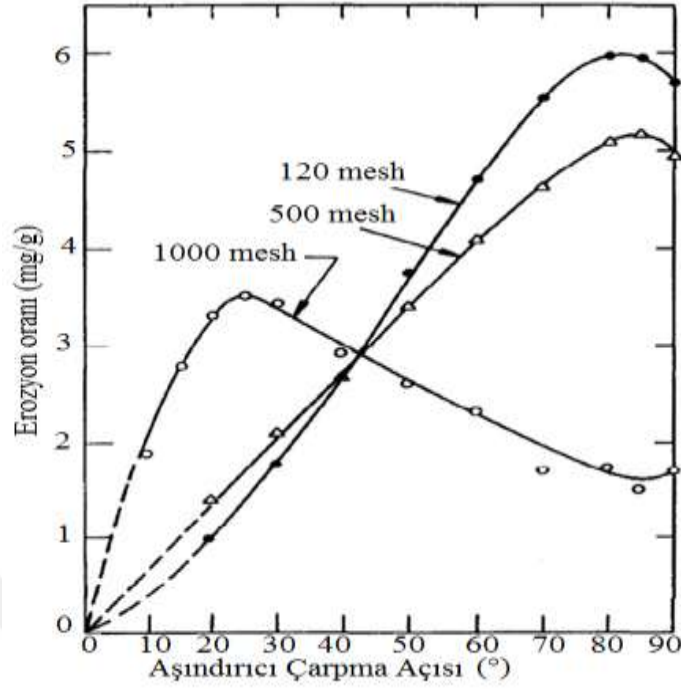
Şekil 9. Aşındırıcı parçacık çarpma açısının şematik gösterimi

Mühendislik malzemeleri, sünek veya gevrek oluşlarına göre farklı erozyon davranışları sergilemektedir. Yapılan araştırmalara göre Şekil 10'da gösterildiği gibi sünek malzemeler düşük açılarda en yüksek erozyona maruz kalmaktadır. Gevrek malzemeler ise, yüksek açılarda en yüksek erozyon değerini sergilemektedir. Yarı-sünek malzemeler için, en yüksek aşınma genellikle $45-60^\circ$ aşındırıcı parçacık çarpma açılarında meydana gelmektedir (Kaplan vd., 2018). Babu (2016), atmosferik plazma sprey tekniği ile CoNiCrAlY ve yttria ile kaplanmış olan Inconel 718 Nickel alışımin üzerinde çeşitli

aşındırıcı parçacık çarpma açıları (30, 60 ve 90°) katı parçacık erozyonu incelenmiştir. Bu malzeme için en yüksek erozyon oranı 60°'de meydana gelmiş olup ve yarı-sünek/gevrek malzeme davranışı sergilemiştir. Aynı çalışmanın 30° çarpma açısında mikro-kazma (micro-ploughing) ve mikro-kesme (micro-cutting) görülmüş olup, mikro-kırılma (micro-cracking) 90°'de oluşmaktadır. Aynı zamanda mikro-kesme ve mikro-kazıma ile mikro-kırılma karışımı da 60°'de gözlemlenmiştir. Sheldon ve Finnie (1966), sünek malzemeler, gevrek malzemeler ve yarı- sünek/gevrek malzemelerin katı parçacık erozyon davranışlarını geniş bir şekilde incelemişlerdir. Bu çalışmada 120 mesh (127 µm), 500 mesh (21 µm) ve 1000 mesh (9 µm) silikon karbür aşındırıcı parçacık, hedef malzemelerin yüzeyine 500 fps (152,4 m/s) çarpma hızıyla çarptırılmıştır. Hedef malzeme olarak; sünek malzeme olarak 1100-O Alüminyum kullanmıştır ve gevrek malzeme olarak ise takım çeliği (hardened tool steel, HRC 64) ve soda kireç camı (soda lime glass) tercih edilmiştir. 1100-O alüminyum malzemesinde çeşitli aşındırıcı parçacık boyutlarında yapılan testlerin sonucunda en yüksek erozyon değeri yaklaşık 10-30° arası aşındırıcı parçacık çarpma açısında meydana gelmiştir. Dolayısıyla, sünek malzemelerin davranışı aşındırıcı parçacık boyutundan bağımsızdır. Sünek malzemelerin aksine, gevrek malzemeler aşındırıcı parçacık boyutuna göre farklı erozyon karakteristiği sergilemektedir.



Şekil 10. Sünek ve gevrek malzemelerin erozyon aşınma davranışlarının gösterimi (Finnie, 1995)

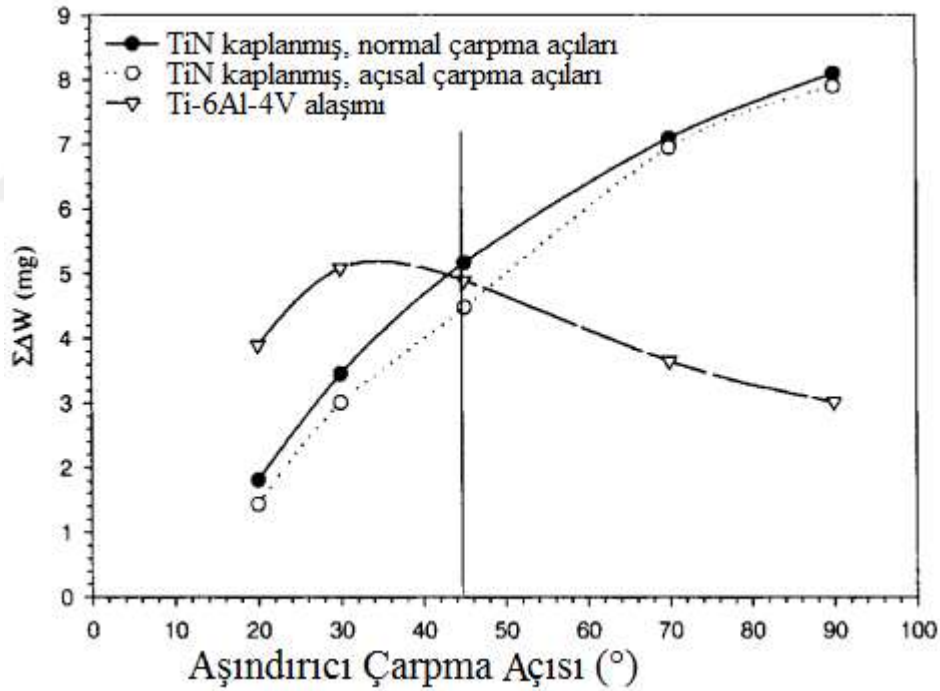


Şekil 11. Cam gevrek malzeme davranışından sünek malzeme davranışına değişim gösterimi (Finnie, 1966)

Budur'un (2018) yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında AISI 1020, Al6061, Ti6Al4V, SS304, Hardox 450 ve DP600 metalik malzemeleri katı parçacık erozyon testlerine tabi tutulmuştur. 20, 30, 45, 60 ve 90° aşındırıcı parçacık çarpma açıları ve 100, 127, 170, 210 ve 250 m/s aşındırıcı parçacık hızlarında bu malzemelerin erozyon aşınma davranışları incelenmiştir. Yapmış olduğu testler sonucunda tüm malzemelerin sünek davranış sergilediğini belirtmiştir. Al6061 alüminyum alaşımında diğer malzemelere göre en az erozyon kaybı görülmüşken, DP600 çelik malzemesi 20° aşındırıcı parçacık çarpma açısında diğer malzemelere göre en yüksek erozyon miktarına ulaşmıştır.

Bircan'ın (2014) yüksek lisans tezinde Inconel 718 alaşımının malzemesinin farklı sıcaklıklardaki katı parçacık erozyonu incelenmiştir. Yapılan testlerde 70 m/s aşındırıcı parçacık hızı ve 30, 45, 60 ve 90° aşındırıcı parçacık çarpma açıları, 120 mesh (127 µm) boyutunda köşeli beyaz alümina aşındırıcı parçacık olarak kullanılmıştır. Yapılan testlerin neticesinde erozyon oranı sıcaklığa göre değişim gösterip tüm sıcaklık değerlerinde en yüksek erozyon oranı 45° çarpma açısında meydana gelmiştir. Aşındırıcı parçacık açısının sabit olması durumunda test sıcaklığının artırılması erozyon miktarını arttırmıştır.

Pieters ve Liu (2001), yaptıkları bir çalışmada Ti-6Al-4V alaşımını, erozyon direnci daha yüksek olan bir titanyum alaşımı (TiN) ile kaplayıp farklı aşındırıcı parçacık çarpma açılarında erozyon davranışlarını incelemiştir. Test sonuçlarında Ti-6Al-4V alaşımı kaplanmadan önce farklı aşındırıcı parçacık çarpma açılarında yapılan testlerde beklendiği sünek malzeme olarak davranmıştır. Ancak, alaşım kaplandıktan sonra gevrek malzeme davranışı sergilemiştir. Şekil 12’de gösterildiği gibi Ti-6Al-4V alaşımı TiN malzemesi ile kaplanmış ve farklı aşındırıcı parçacık çarpma açılarındaki erozyon davranışı incelenmiştir. Açıl çarpmanın 45°’den düşük olduğu durumlarda kaplanmış numunelerin erozyon direnci oldukça iyi olarak tespit edilmiştir.. Ancak 45°’den yüksek açılarda malzemenin erozyon direnci düşmektedir. Ti-6Al-4V alaşımının 45°’den düşük aşındırıcı parçacık çarpma açılarında erozyon kaybı yüksek görülmektedir. 45°’den yüksek çarpma açılarında alaşımın erozyon direncinin arttığı görülmüştür.



Şekil 12. Ti-6Al-4V alaşımı ve TiN malzemesi ile kaplanmış durumlarında farklı çarpma açılarındaki erozyon miktarları(Pieters ve Liu, 2001)

Eyre (1978), yaptığı bir çalışmada düşük açılarda hedef malzemelerin yüzeyinde kesme aşınması (cutting wear) ve yüksek aşındırıcı parçacık çarpma açılarında ise hedef malzemelerin yüzeyinde malzeme deformasyonu meydana geldiğini tespit etmiştir.

1.3.3.2. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızı

Katı parçacık erozyon aşınmasında diğer bir önemli parametre, aşındırıcı parçacıkların çarpma hızıdır. Aşındırıcı parçacıkların hedef yüzeyinde kesme etkisi yapabilmesi veya deforme edebilmesi için belli bir hıza sahip olmaları gerekmektedir. Yapılan araştırmalara göre parçacıkların çarpma hızların artmasıyla birlikte, hedef malzeme yüzeyinde kesme ve plastik deformasyon meydana gelmektedir. Hedef malzeme gevrek davranış sergilerse, bu deformasyonlar malzemenin içyapısında çatlaklara (pitting) yol açmaktadır.

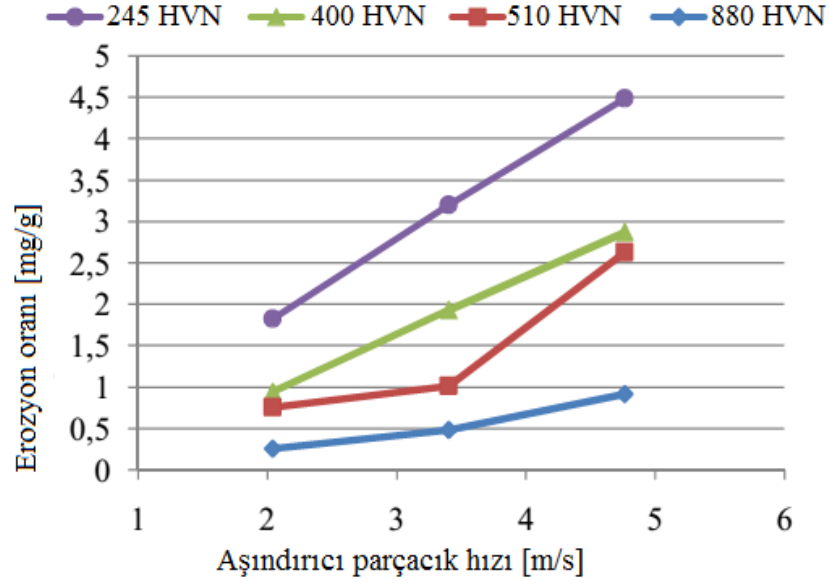
Khoddami vd., (2019), yaptıkları bir çalışmada Ti-6Al-4V alaşım malzemesinin deneysel erozyon davranışları ile sonlu eleman analizi (finite element analysis) sonuçlarını kıyaslamışlardır. Yapılan testlerde 25, 45 ve 90° aşındırıcı parçacık çarpma açıları ve 10, 17,5 ve 25 m/s aşındırıcı parçacık çarpma hızları tatbik edilmiştir. Malzemenin erozyon davranışları hem deneysel hem de sonlu eleman analizi için birbirine yakın olarak elde edilmiştir. Öte yandan, aşındırıcı parçacık hızının artmasıyla hem deneysel ve hem de sonlu eleman analizinde erozyon miktarı artış göstermiştir ve en yüksek erozyon kaybı 45° aşındırıcı parçacık çarpma açısında elde edilmiştir.

Avcu vd., (2013), Ti-6Al-4V alaşım malzemesinin üzerinde yaptığı bir çalışmada, malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı parçacıkların hızların artması ile birlikte erozyon oranı da artış gösterilmektedir. Budur (2018) yüksek lisans tezinde çeşitli metal ve alaşımlar üzerinde yaptığı çalışmada, aşındırıcı parçacık çarpma hızın artmasıyla, malzemelerin erozyon aşınması miktarlarını arttığını tespit etmiştir.

Bağcı (2010), doktora tezinde cam elyaf takviyeli epoksi (GF/EP) kompozit malzemelerin üç farklı parçacık çarpma hızındaki (23, 34 ve 53 m/s) erozyon davranışını incelemiştir. 23 m/s aşındırıcı çarpma hızındaki erozyon değerlerinin 34 m/s çarpma hızındaki değerlerden daha az olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde 34 m/s çarpma hızındaki erozyon miktarları da 53 m/s aşındırıcı çarpma hızındakinden daha düşüktür.

Zhou ve Bahadur (1995), yüksek sıcaklık değerinde erozyon oranının parçacık çarpma hızına bağlı değişimini incelemiştir. Yüksek sıcaklıklarda parçacık çarpma hızı arttıkça erozyon oranın da aynı oranda arttığını gözlemlenmiştir. Kosa (2016), doktora tezinde farklı ısı işlem görmüş çelik St 37 (245 HV), su verilmiş St 37 (510 HV), su verilmiş Ck 45 (880 HV) ve su verilmiş daha sonra 500 °C'de 1 saat tavllanmış Ck 45 (400 HV) çelik numunelerinin farklı aşındırıcı parçacık hızlarındaki erozyon davranışlarını incelemiştir.

Şekil 13'te bu numunelerin aşındırıcı parçacık çarpma hızına göre erozyon davranışları grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 13. Farklı ısıl işlem görmüş çeliklerin aşındırıcı parçacık hızına göre erozyon davranışları (Kosa, 2016)

Hedef malzemelerin sertliği erozyon aşınmasını yavaşlatmada veya hasarları en aza indirmede çok önemli bir rol oynamaktadır. Farklı ısıl işlem görmüş ve farklı sertliklere sahip olan çelikler, farklı aşındırıcı parçacık hızları ile testlere tabi tutulduğunda, en düşük sertlik değerine sahip olan St 37 (245 HV) çeliği, en fazla erozyona maruz kalmaktadır. En yüksek sertlik değerine sahip olan Ck 45 (880 HV) çeliği ise en düşük erozyona maruz kalmıştır. Bunlara ilaveten, aşındırıcı parçacık hızı arttıkça hedef malzemenin yüzey sertliğine bakılmaksızın erozyon aşınma oranı da artmaktadır.

Weeler vd., (2001, 2005), elmas (diamond) kaplama malzemesini kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle tungsten karbür (WC) malzemesine 60 µm kalınlık oluşturacak şekilde kaplamıştır. Bu çalışmalarda yüksek aşındırıcı parçacık çarpma hızının, hedef malzemenin yüzeyindeki etkileri (elastik-plastik deformasyonları ve gevrek kırılmalar) ve erozyon davranışlarına etkileri incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda yüksek aşındırıcı parçacık çarpma hızı ($V > 200$ m/s) için hedef malzemede önce oldukça küçük tanecik kopması (chipping) olduğu, parçacık hızı arttırıldığında kaplama tabakası ve ana malzemenin ara yüzeyinde olumsuzluklar ve ince tabaka ayrılmaları (delamination)

gözlemlenmiştir. Finnie (1960), yaptığı bir çalışmada tavllanmış SAE 1020 çelik malzemesinin erozyon aşınmasında kütle kaybının, aşındırıcı parçacık hızına göre değişimini incelemiştir. Bu çalışmanın neticesinde hedef malzemenin kütle kaybının aşındırıcı parçacık hızının artmasıyla birlikte arttığını tespit etmişlerdir.

Acar vd., (2017) yaptığı bir çalışmada, AA 6061 alüminyum alaşım üzerinde farklı aşındırıcı parçacık çarpma hızlarında ve çeşitli aşındırıcı parçacık çarpma açılarında erozyon aşınmasının etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda aşındırıcı parçacık hızının artmasıyla birlikte erozyon oranında da artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Finnie (1958), yaptığı çalışmalar sonucunda, erozyon aşınma oranı ile aşındırıcı parçacık çarpma hızı arasında bir ampirik bir bağıntıyı ortaya koymuştur (Denklem 1.1).

$$E = KV^n \quad (1.1)$$

E: Erozyon oranı (g/g)

V: Aşındırıcı parçacık çarpma hızı (m/s)

K: Sabit bir katsayısı

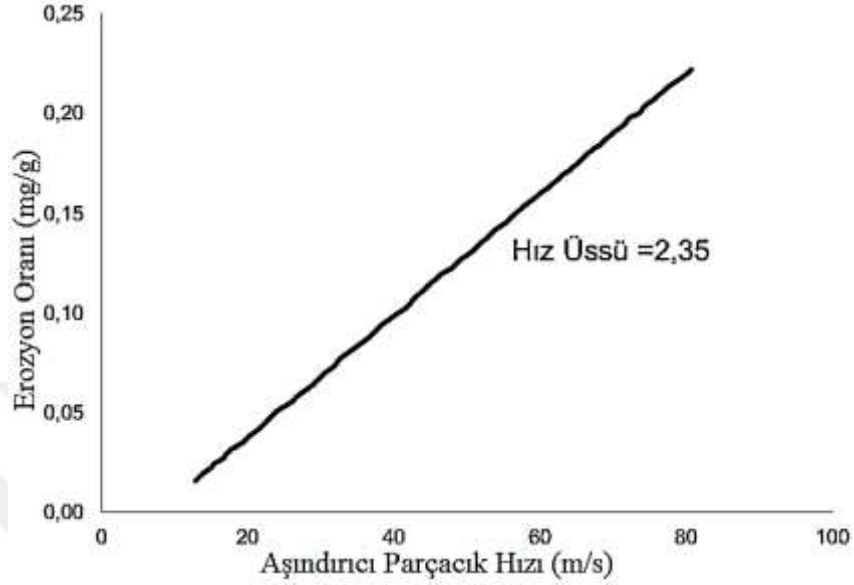
n: Hız üssü(değeri 2-5 arasındadır.)

Hız üssü değerleri malzemeye göre değişim göstermektedir. Birçok araştırmacı, *n* değerinin gevrek malzemeler için 3-5 arasında ve sünek malzemeler için 2-3 arasında olduğunu tespit etmiştir. Finnie (1960), bir diğer çalışmasında *n* değerinin aşındırıcı parçacık çarpma açısına ve erozyon oranına etkisini incelemiştir.

Yıldırım vd., (2013), 3003 alüminyum malzeme üzerinde çeşitli aşındırıcı parçacık hızı değerlerinin erozyon davranışına etkisini incelemiştir. Bu çalışmadan, hızın artmasıyla birlikte erozyon miktarının da arttığı tespit edilmiştir. 3003 alüminyum, sünek malzeme olduğu için tüm aşındırıcı parçacık hızlarında en yüksek erozyon oranı 15° aşındırıcı parçacık çarpma açısında meydana gelmiştir.

Routhbort ve Scattergood (1992), aşındırıcı parçacık boyutunun artmasıyla birlikte hız üssü değerinde bir düşüş olduğunu tespit etmiştir. Bunun sebebi ise, aşındırıcı parçacık ile hedef malzemenin yüzey teması etkileşimidir. Aynı zamanda *n* hız üssü değerinin aşındırıcı parçacığın şekline bağlı olabileceğini ancak bu konu üzerinde yeterli çalışma

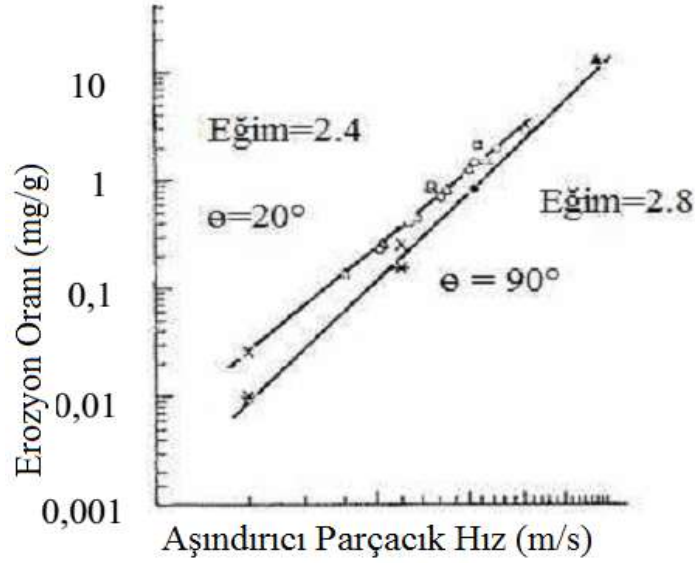
yapılmadığını ifade etmiştir. Yerramareddy ve Bahadur (1990), sünek bir malzeme olan Ti-6Al-4V alaşımı için n değerini 2.35 olarak tespit etmişlerdir (Şekil 14).



Şekil 14. Ti-6Al-4V alaşım malzemesi için erozyon oranının aşındırıcı parçacık hızı ile ilişkisi (Yerramareddy ve Bahadur, 1990)

Arjula vd., (2008), yaptıkları bir çalışmada yüksek performanslı termoplastik polimer malzemelerle katı parçacık erozyon parametrelerinin etkilerini incelenmiştir. Aşındırıcı parçacık olarak 200 μm boyutta silika kumu kullanılarak, farklı aşındırıcı parçacık hızları (25, 37, 50 ve 66 m/s) ve farklı aşındırıcı parçacık çarpma açılarında (15, 30, 60 ve 90°) testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde iki polimer hariç (polyphenylene sulfide ve polysulfone) diğer polimer numuneler için n hız üssü, sünek malzemeler davranışı sergileyen polimerler için 2-3 arasında ve gevrek malzeme davranışı sergileyen polimerler için ise 3-5 arasında olacak şekilde elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda aşındırıcı parçacık hızının artmasıyla birlikte erozyon oranının da arttığı tespit edilmiştir.

Bayındır'a (2009) göre, hız üssü daima 2 değerinden daha büyüktür ve genellikle yumuşak metaller için en yüksek erozyon miktarına yakın olan etki açılarında 2.4 civarındadır. Şekil 15'te bakır için gösterildiği gibi n değeri daha yüksek çarpma açılarında daha büyük değerler almaktadır. Hız üssü katsayısının değeri, hedef malzemenin yüzeyinden parçacıkları kaldırabilmesi için gerekli aşındırıcı parçacıkların sayısına da bağlıdır.



Şekil 15. Farklı araştırmalardan elde edilen bakır malzemesinin erozyon oranları (Bayındır, 2009)

1.3.3.3. Aşındırıcı Parçacık Kütlesel Debisi

Aşındırıcı parçacıkları akış miktarı (birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı parçacık kütlesi) katı parçacık erozyon aşınmasını etkileyen diğer önemli bir etkidir. Literatürde bu konu üzerinde çok fazla çalışma yapılmamıştır. Parçacık kütlesel debisi teorik olarak, aşındırıcı parçacıkların hedef malzemeye eşit çarpma açısı ve eşit çarpma hızında çarptıkları kabul edildiğinden; aşınma miktarı aşındırıcı parçacık kütlesel debisinden bağımsız olmalıdır. Lâkin uygulamalarda, erozyon aşınma testlerinde ölçülen erozyon aşınma oranı üzerinde parçacık debisinin önemli etkileri rapor edilmiştir. (Barkoula ve Karger-Kocsis, 2002).

Erozyon aşınma oranı, aşındırıcı parçacık kütlesel debisinin belirli bir akış miktarına kadar doğru orantılı olduğu, bu limit değerini ise yüzeye çarpan ve yüzeyden geri seken aşındırıcı parçacıkların arasındaki etkileşiminin bir sonucu olduğu ifade edilmektedir (Stachwiak ve Batcheler, 1993). Aşındırıcı parçacık akış debisi arttığında, ilgili yüzeye çarpmalar arasındaki zaman azalır. Bundan dolayı bir sonraki çarpmadan önce bozulma reaksiyonu için daha az zaman kalacaktır ve böylece bozulmanın derecesi ve ona bağlı olarak da erozyon aşınması azalacaktır (Yıldıran, 2013; Anand ve Hovis, 1987).

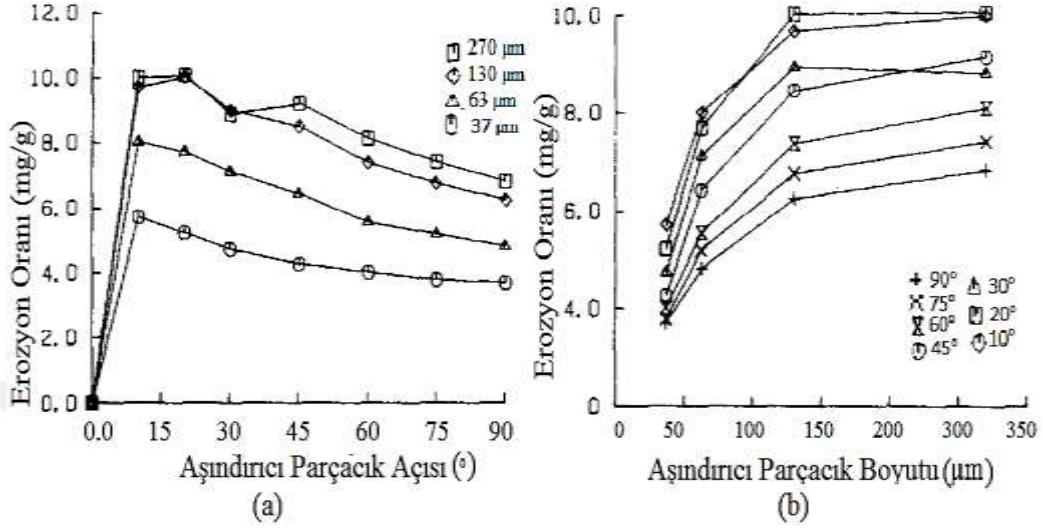
1.3.3.4. Aşındırıcı Parçacık Boyutu

Katı parçacık erozyonunda aşındırıcı parçacıkların boyutu önemli bir parametredir. Katı parçacık erozyon aşınmasının, aşındırıcı parçacık boyutlarına bağlı gösterdiği değişim incelendiğinde küçük aşındırıcı parçacık boyutlarında malzemede hasarın mikro kesme mekanizması ile gerçekleştiği; büyük aşındırıcı parçacık boyutlarında ise hasar mekanizmasının mikro çatlama ve mikro kırılma olduğu belirtilmiştir.. Büyük boyutlu aşındırıcı parçacıklar yüksek kinetik enerji ve yüksek darbe enerjileri ile hedef malzemede çatlak oluşumuna yol açarak hedef malzeme yüzeyinden daha büyük parçalar koparmakta ve dolayısıyla daha yüksek erozyona sebep olmaktadır. Küçük boyutlu aşındırıcı parçacıklar ise, kinetik enerjilerinin düşük olması nedeniyle düşük erozyon aşınmasına sebebiyet verirler.

Sinmazcelik vd., (2010) yaptığı bir çalışmada takviyeli polyephenylene sülfite (PPS) kompozit malzeme üzerinde üç farklı boyutta alüminyum oksit (300-425 μm , 150-212 μm ve 45-75 μm) aşındırıcı parçacık kullanmıştır. İncelemeler sonucunda küçük boyutlu aşındırıcı parçacıklar (45-75 ve 150-200 μm) için en yüksek erozyon aşınma oranı 30° parçacık çarpma açısında gözlemlenmiştir. Daha büyük boyutlu aşındırıcı parçacıklar (300-425 μm) için ise, en yüksek erozyon oranı 60° parçacık çarpma açısında tespit edilmiştir. Bu sonuçtan hareketle, düşük boyutlu aşındırıcı parçacıkların hedef malzemede sünek davranış sergilenmesine sebep olduğu; büyük boyutlu aşındırıcı parçacık kullanımında ise hedef malzemede yarı-sünek davranış elde edildiği belirtilmiştir.

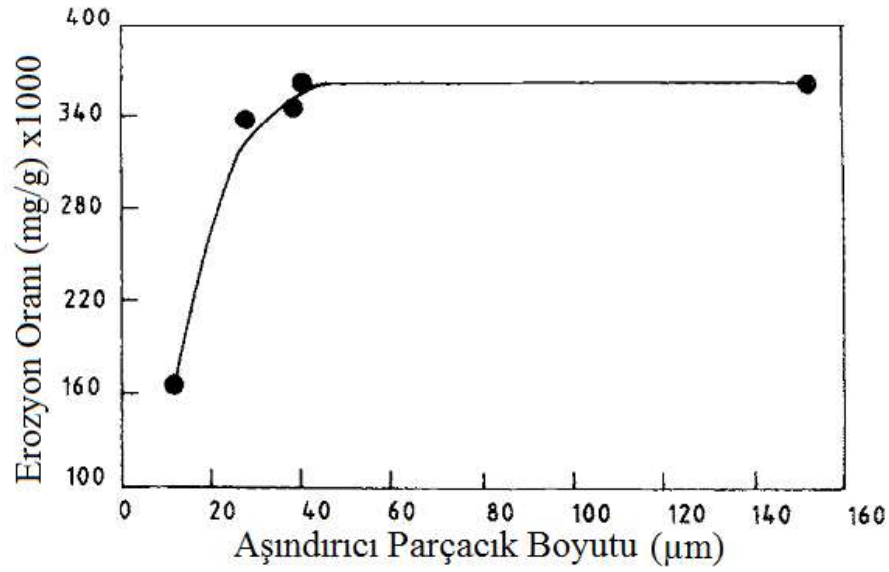
Yıldıran (2013), yüksek lisans tezinde 3003 H14 alüminyum alaşımı üzerinde erozyon aşınmaya etki eden faktörleri (aşındırıcı parçacık çarpma açısı, aşındırıcı parçacık çarpma hızı ve parçacık boyutu) incelemiştir. Testlerde iki farklı boyutta (80 ve 180 mesh) aşındırıcı parçacık kullanmıştır. Sonuç olarak, tüm çarpma açılarda ve çarpma hızlarda küçük boyutlu aşındırıcının (180 mesh) en yüksek erozyon oranına sebep olduğunu tespit etmiştir. Fowler vd., (2005), yaptığı bir çalışmada su jeti kesme yöntemine etki eden aşındırıcı parçacık boyutu ve iş parçası dönüş hızının malzemenin yüzey parametrelerine etkisini incelemiştir. Aşındırıcı parçacık olarak 180 μm (80 grit) ve 75 μm (200 grit) garnet kullanılmıştır. Erozyon oranının, yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey dalgalanmasının küçük boyutlu aşındırıcı parçacıklarda daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Merrison (1986) ve arkadaşları, 304 paslanmaz çelik malzeme üzerinde alümina oksit aşındırıcı parçacıkların oluşturdukları erozyon aşınmasını incelemiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda aşındırıcı

parçacık boyutunun 130 μm 'ye kadar olduğu durumlarda erozyon aşınma oranını arttırdığı, ancak bu boyuttan sonra çok etkili olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. Aşındırıcı parçacık boyutunun erozyon oranına etkisi, a) farklı aşındırıcı parçacık boyutlarının ve çarpma açısının erozyon oranına etkisi, b) parçacık çarpma açısı ile aşındırıcı parçacık boyutunun erozyon oranına etkisi (Merrison vd., 1986)

Tabakoff ve Vittal (1983), gaz türbinlerinin kanatçıklarında kullanılan INCO 600 malzemesi üzerinde çeşitli aşındırıcı parçacık boyutlarının erozyon davranışına etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, Aşındırıcı parçacık boyutunun 70-230 μm arasında olduğu durumda erozyon oranının sabit kaldığı, aşındırıcı parçacık boyutunun büyümesiyle erozyon oranının arttığı tespit edilmiştir. Sundarajan ve Roy (1997), SS 304 paslanmaz çeliği üzerinde yaptıkları bir çalışmada 40 μm 'den büyük boyutlardaki aşındırıcı parçacıkların erozyon oranının değişmediğini göstermişlerdir (Şekil 17).



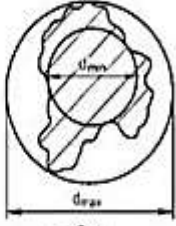
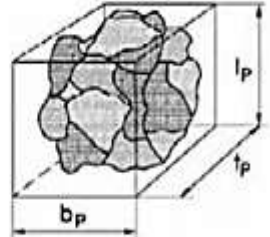

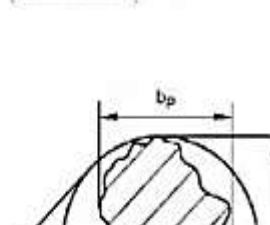
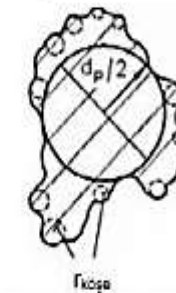
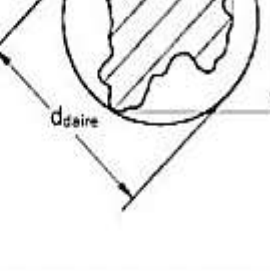
Şekil 17. SS 304 paslanmaz çeliğin erozyon miktarının parçacık boyutuna göre değişimi (Sundarajan ve Roy, 1997)

1.3.3.5. Aşındırıcı Parçacık Şekli

Katı parçacık erozyon aşınmasında, parçacıkların şekli de önemlidir. Doğada bulunan ve erozyon aşınmasına neden olan parçacıklar genellikle düzgün geometrilere sahip değildir. Aşındırıcı parçacık geometrisi, küresel ve keskin köşeli olarak sınıflandırılır. Bu geometri değişikliği, erozyon oranında önemli bir değişime neden olmaktadır. Aşındırıcı parçacık şekil parametreleri, her bir parçacığın şeklini tanımlar. Şekil parametreleri, parçacığın genişliği, uzunluk ve kalınlık oranları ile geometrik şekli olmak üzere iki farklı özelliğe sahiptir. Şekil 18’de bu parametrelerin ilişkileri ve grafiksel tanımı gösterilmiştir.

Bahadur ve Badruddin (1990), yaptıkları bir çalışmada 18Ni(250) yüksek paslanmaz çelik malzemesi üzerinde üç aşındırıcı parçacığın (Al_2O_3 , SiC ve SiO_2) etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, alümina ve silika parçacıklarının boyutlarının artmasıyla birlikte erozyon oranı da artmıştır. Alümina parçacık için erozyon oranı, 50 µm boyuta kadar artış göstermiş; ancak bu boyuttan sonra erozyon aşınma oranının değişmediği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, silika aşındırıcı parçacık için erozyon oranı 34 µm boyuta kadar artmış; ancak bu değerden sonra değişmediği görülmüştür. Lâkin silika oksit (SiO_2) aşındırıcı parçacık boyutunun artmasıyla birlikte erozyon aşınma oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise silika oksit parçacığının tipi, şekli ve sertliğinden kaynaklanmıştır.

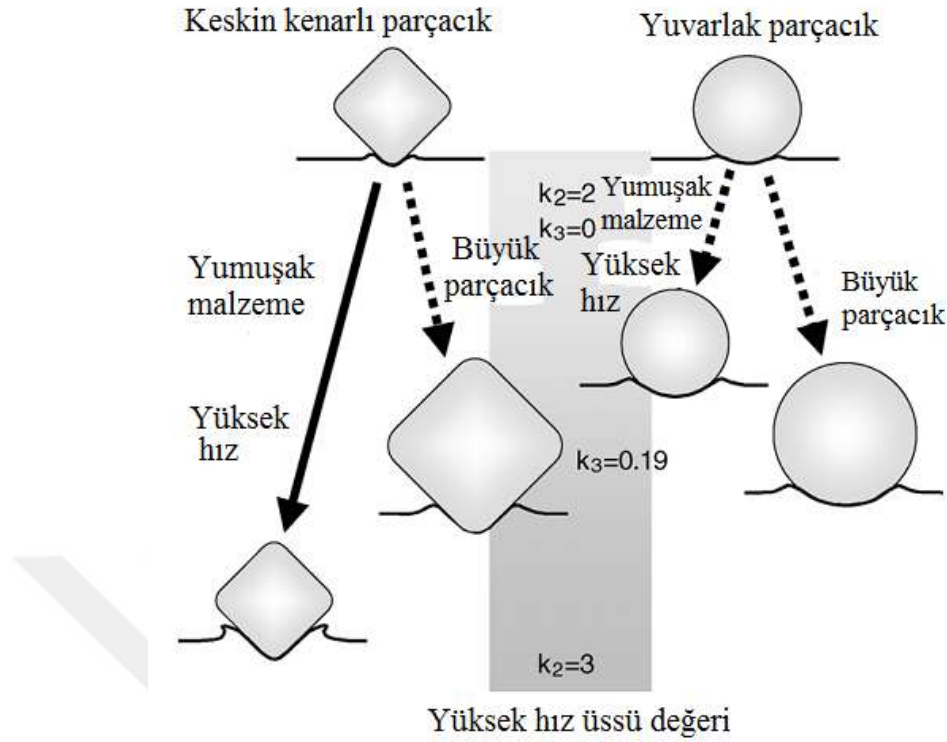
Alümina ve silika parçacıkların sertlikleri sırayla 2100 ve 2480 KHN (Knoop Sertlik Değeri: Knoop Hardness Number) ve hafif keskin köşeli şekle sahip olduğu için yüksek erozyon aşınmasına neden olmuştur. Silika oksit aşındırıcı parçacığın sertliği (820 KHN) ve hafif küresel şekle sahip olması nedeniyle hedef malzemede (sertlik 530 KHN) aşınma meydana gelmediği tespit edilmiştir.

Parametreler ve tanımı	Grafiksel ifade	Parametreler ve tanımı	Grafiksel ifade
şekil faktörü $F_{\text{şekil}} = d_{\text{min}}/d_{\text{max}}$		uzama oranı $r_E = l_p/b_p$	
dairesellik $F_D = (4\pi A_p)/\text{çevre}^2$		düzlemsellik $r_F = l_p/t_p$	
yuvarlaklık $S_R = [\sum (2 \cdot \frac{rköşe}{d_p})] / N_{köşe}$		küresellik $S_P = (4 \cdot b_p \cdot l_p / \pi)^{1/2} / d_{\text{daire}}$	

Şekil 18. Aşındırıcı parçacık şekil parametreleri (Bahadur ve Badruddin, 1990)

Ally (2010), yüksek lisans tezi çalışmasında, keskin köşeli aşındırıcı parçacıkların yumuşak yüzeylerde yuvarlak hatlara sahip parçacıklara oranla daha fazla aşınmaya neden olduğunu tespit etmiştir.

Oka vd., (2005), yaptıkları bir çalışmada, aşındırıcı parçacık çarpma hızının artması veya aşındırıcı parçacık boyutunun büyümesi ile birlikte hedef malzemede daha fazla aşınma, çukur ve çiziklerin oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bunlara ilaveten, köşeli ve keskin parçacıkların, yuvarlak parçacıklara göre daha fazla aşınmaya sebep olduğunu gözlemlenmiştir (Şekil 19).



Şekil 19. Aşındırıcı parçacık şekli ve boyutunun erozyon oranına etkisi (Oka vd., 2005)

Şekil 19’de gösterildiği gibi keskin, yüksek hızlı parçacıklar, yuvarlak ve düşük hızlı parçacıklara göre daha fazla hedef malzemenin yüzeyine nüfuz ederler.

Lin vd., (2018) yaptıkları bir çalışmada, sabit aşındırıcı parçacık debisi (0.65 g/s) ve sabit aşındırıcı parçacık çarpma hızında (97 m/s) ile SS 316 paslanmaz çelik malzeme üzerinde dört farklı boyutlu (75, 150, 300 ve 600 μm) silika karbür aşındırıcı parçacık boyutunun erozyona etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın neticesinde, erozyon miktarlarının aşındırıcı parçacık çarpma açılarına göre değiştiği ifade edilmiştir. 90° çarpma açısında büyük boyutlu aşındırıcı parçacıkların (özellikle 600 μm), hedef malzeme yüzeyinde diğerlerine göre daha fazla pürüzlülük ve daha fazla mikro kırılmalara neden olduğu görülmüştür. Öte yandan, küçük boyutlu (75 μm) parçacıkların bazılarının hedef yüzeye gömüldüğü tespit edilmiştir. Başka bir bulgu da 75, 150 ve 600 μm boyutlu parçacıkların sebep olduğu erozyon miktarları aynı iken 300 μm boyutlu parçacıkların neden olduğu erozyon miktarı daha fazla olarak elde edilmiştir. Bu fazlalık, parçacığın şeklinden kaynaklanıp, 300 μm boyutlu parçacıkların keskin köşeli, diğer parçacıkların ise göreceli olarak daha yuvarlak şekle sahip olduğu rapor edilmiştir. Keskin köşeli parçacıkların şekil faktörü 1.0 ve yuvarlak şekli parçacıkları için 0.53 olarak rapor edilmiştir.

1.3.3.6. Hedef Malzeme Özellikleri

Katı parçacık erozyonuna maruz kalan malzemenin mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri, katı parçacık erozyon aşınmasında önemli bir rol oynamaktadır. Hedef malzemenin içyapısı, sertliği, yoğunluğu vb. özellikleri katı parçacık erozyon miktarının değişmesine yol açmaktadır. Katı parçacık erozyonuna maruz kalan malzemelerin gevreklik, süneklik ve yarı-sünek özelliklerine bağlı olarak hangi aşındırıcı parçacık çarpma açısında en yüksek erozyon miktarına ulaşılacağı bilinmelidir.

Erozyon aşınmasındaki kütle kaybı, çarpma açısının bir fonksiyonu olarak değerlendirildiğinde sünek ve gevrek malzemeler farklı özellikler gösterir (Finnie, 1995). Sünek malzemelerin karakteristik özelliği, düşük aşındırıcı parçacık çarpma açılarında (15-30°) en yüksek erozyon miktarına ulaşmalarıdır. Gevrek malzemeler, en yüksek erozyon kaybını dik çarpma açısında (90°) gösterirler.

Takviyeli kompozit malzemelerinde, en yüksek erozyonun 45-60° arasında meydana geldiği varı-sünek malzeme davranışı sergilendiği bildirilmektedir. Karbon- fiber ve cam-elyaf takviyeli epoksilerin her türlü elyaf yerleştirme biçiminde en yüksek erozyon kütle kaybına 60° çarpma açısında ulaşıldığı gözlemlenmiştir (Kaunda vd., 2012; Miyazaki ve Takeda, 1993). Takviye edilmemiş polimerlerin büyük kısmı, sünek özelliğe sahiptir ve 30° çarpma açısında en yüksek erozyon miktarına ulaşılmaktadır (Bitter, 1993).

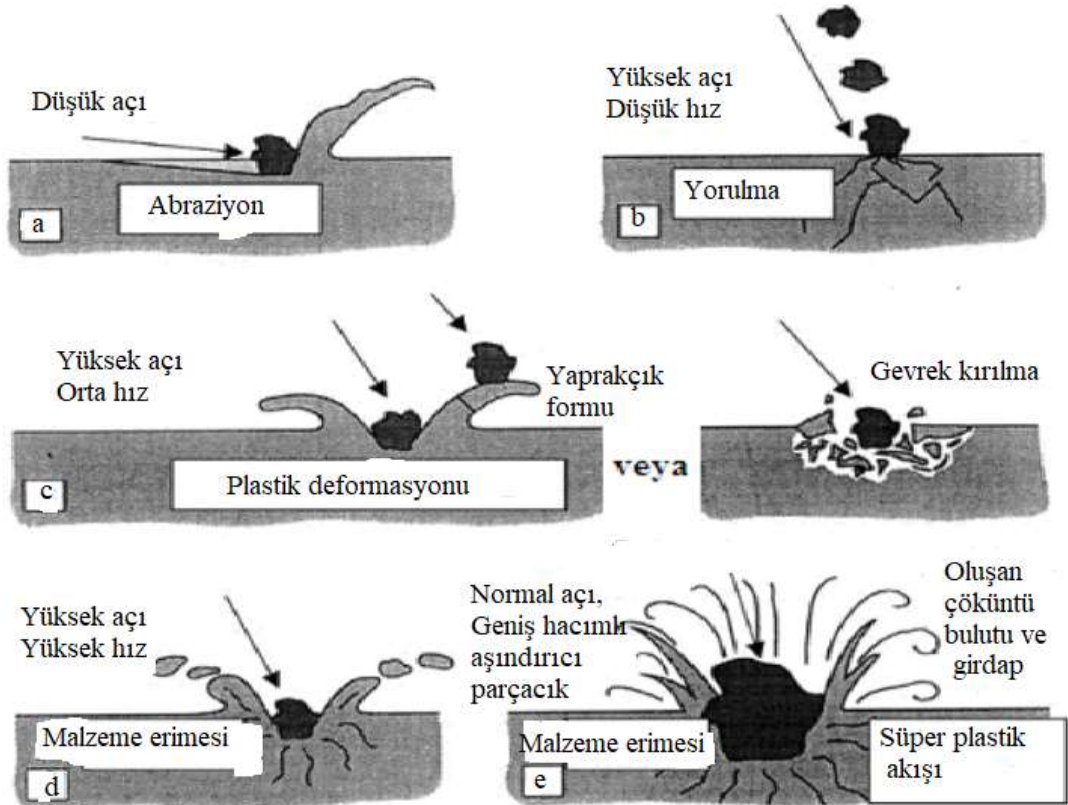
Avcu vd. (2013), tarafından 3003 alüminyum alaşımı üzerinde yapılan çalışmada, tarama elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope: SEM) ve enerji saçılmalı x-ışını spektroskopisi (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS) yöntemiyle, 90° aşındırıcı çarpma açısıyla yapılan testlerde hedef malzeme yüzeyinde aşındırıcı parçacıkların (garnet) bazılarının gömülü olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak hedef malzemenin sünek malzeme olması gösterilmiştir.

Finnie (1995) yaptığı çalışmalarında, katı parçacık erozyonunda sünek malzemeler için düşük (15-30°) çarpma açılarda en yüksek erozyon miktarına ulaşıldığını; gevrek malzemeler için ise en yüksek erozyon miktarının, yüksek (70-90°) çarpma açılarında meydana geldiğini tespit etmiştir. Aynı yazar (Finnie, 1966) bir başka çalışmasında soda-kireç cam malzemenin aşındırıcı parçacık boyutunun erozyon değerinin bir fonksiyonu olduğunu ve parçacığın küçülmesiyle birlikte gevrek davranıştan sünek davranışa geçildiğini ifade etmişlerdir.

1.3.4. Katı Parçacık Erozyon Aşınma Mekanizmaları

Katı parçacıkların bir malzeme yüzeyine belli bir sürede sürekli çarpması sonucu, hedef malzeme yüzeyinden parça kopmasına neden olmaktadır. Katı parçacık erozyon aşınması karmaşık bir mekanizma olup; iyice anlaşılması için araştırmacılar tarafından çeşitli parametrelerin (aşındırıcı özellikleri, hedef malzeme özellikleri ve çevreden kaynaklanan faktörlerin), etkileri incelenmiştir.

Katı parçacık erozyonunda, aşındırıcı parçacıkların tekli veya çoklu çarpması sonucu malzeme yüzeyinde mikro-çatlama, mikro-çizilme ve mikro-kesilme olayları gerçekleşmektedir. Bunlara ilaveten, hedef malzemede sürekli darbelerin tesiriyle yüzeyde ve yüzeyin altında yorulma çatlakları ortaya çıkmakta daha sonra da yüzeyde oyuklar ve çukurcuklar meydana gelmektedir. Şekil 20'de katı parçacık erozyonunda karşılaşılan mekanizmalar gösterilmiştir.



Şekil 20. Erozyon aşınmasında karşılaşılan muhtemel mekanizmalar (Balcı, 2009)

Literatürde malzemelerde oluşan erozyon oranı bulmak amacıyla en yaygın olarak aşağıdaki formülü kullanılmaktadır:

$$E = \frac{m_1 - m_2}{mt} \quad (1.2)$$

E: Erozyon oranı,

m_1 : Hedef malzemenin testten önceki ilk kütlesi,

m_2 : Hedef malzemenin testten sonraki kütlesi,

m: Hedef yüzeye çarpan aşındırıcı parçacık kütlesi debisi

t: Erozyon testi süresi

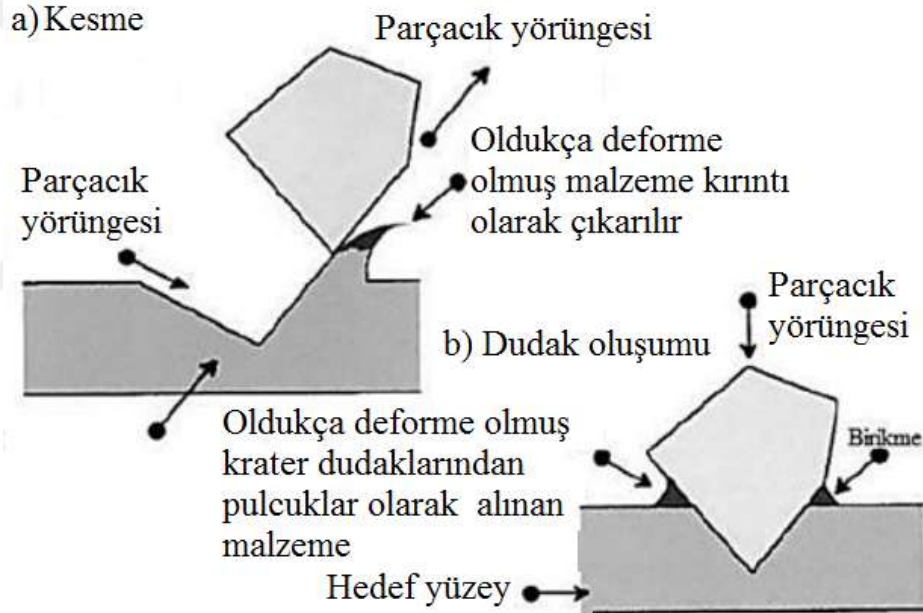
Katı parçacık erozyon mekanizmasıyla ilgili yapılan araştırmalarda, erozyon oranı hedef malzemenin özelliklerine, aşındırıcı parçacık özelliklerine ve çevresel etkenlere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Aşındırıcı parçacık çarpma açısına bağlı olarak hedef malzemenin sünek, gevrek veya yarı-sünek davranış sergilemesi söz konusudur. Gevrek malzemeler büyük çarpma açılarında, sünek malzemeler küçük çarpma açılarında ve yarı-sünek malzemeler ise 45-70° arasındaki çarpma açılarında en yüksek erozyon değerine ulaşmaktadırlar

1.3.5. Sünek Malzemelerde Katı Parçacık Erozyonu

Aşındırıcı parçacıklar sünek malzeme yüzeyine çarptığında, malzeme yüzeyinde plastik deformasyona sebep olmaktadır. Bu olumsuzluklar, hedef malzeme yüzeyinde mikro-kazıma ve mikro-kesme şeklinde meydana gelmektedir. O'Flynn ve arkadaşları (2001), küçük çarpma açılarında sünek malzemelerin erozyon aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Keskin uçlara sahip aşındırıcı parçacıklar sünek malzeme yüzeyine çarptığında, sahip oldukları kinetik enerjilerinden dolayı malzeme yüzeyine batarlar. Eğer Aşındırıcı parçacıklar, belli bir açıdan hedef malzeme yüzeyine çarparlarsa, kazıma etkisi ile yüzeyden bir miktar parçayı öne doğru biriktirmeye neden olurlar (Şekil 21a). Bu bir plastik deformasyon sürecidir. Bu parçalar belli bir miktar malzemeyi önünde biriktirdikten sonra hedef malzemenin yüzeyinden ayrılır. Bu süreç böyle devam ederek, arkadan gelen diğer aşındırıcı parçacıklar da aynı plastik deformasyon sürecini devam ettirirler. Hedef

malzeme yüzeyinde biriken parçalar, aşırı plastik deformasyona uğrayınca malzeme yüzeyinden kopar ve ayrılırlar.

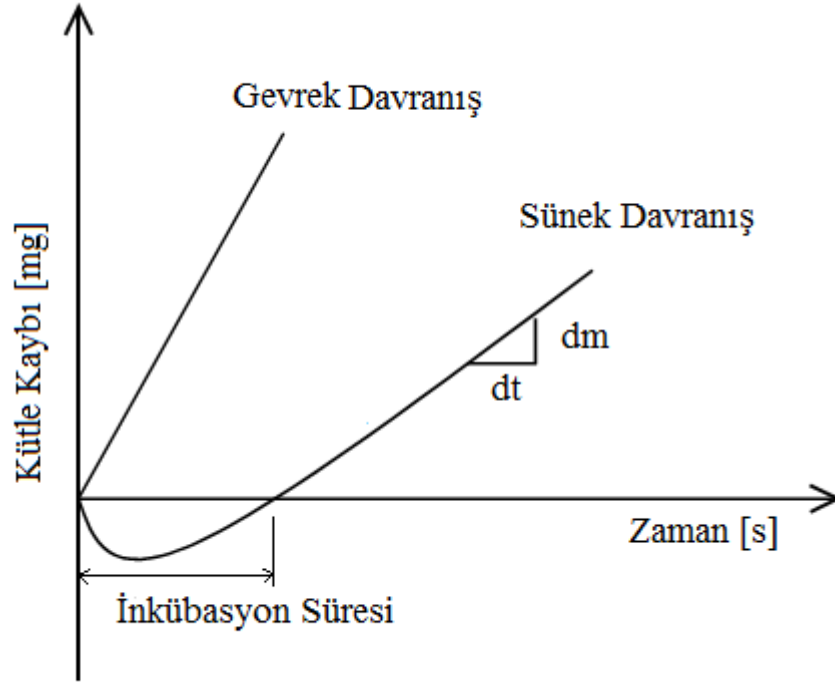
Aşındırıcı parçacıklar büyük açılarda hedef malzeme yüzeyine çarptırılırsa, keskin uca sahip aşındırıcı parçacıklar hedef malzeme yüzeyine batar ve böylece malzeme yüzeyinde plastik deformasyona neden olurlar (Şekil 21b). Aşındırıcı parçacıklar, kinetik enerjilerinden dolayı malzeme yüzeyinde krater (çukur) oluştururlar. Çukur oluşumu sırasında, parçacıklar hedef malzemenin kenarlarında malzeme birikimine sebep olurlar. Belli bir miktar malzeme biriktirme işlemi yaptıktan sonra parçalar hedef yüzeyinden ayrılırlar. Bu süreç, diğer aşındırıcı parçacıklar tarafından devam ettirilerek plastik deformasyona uğrayarak yüzeyde biriken malzeme numuneden kopar.



Şekil 21. Metallarda katı parçacık erozyonu ile malzeme kaybı mekanizmaları, a) kesme, b) deformasyon (O'Flynn vd., 2001)

Bazı malzemeler için, aşındırıcı parçacıklar yüzeye çarptıkları zaman yüzeye gömülebilir ve bu durumda sünek davranış gösteren malzemelerde bir başlangıç kütle kazancı oluşabilir. Temel olarak, süneklik davranışları sergileyen hedef malzemelerde ve yüksek geliş açılarında daha belirgin olarak gözlenen bu sürece inkübasyon süresi (incubation period) denilmektedir. Diğer aşındırıcı parçacıkların malzeme yüzeyine çarpma eyleminin devam etmesi sonucunda inkübasyon süresi aşılar ve hedef malzeme yüzeyinden

parça kopmaları oluşur. Birçok yumuşak hedef malzemenin katı parçacık erozyonu için inkübasyon süresinin varlığı ihmal edilebilir. Hedef yüzeye çarpan aşındırıcı parçacıkların kütlesi, yüzeyden kaybedilen toplam kütle ile doğru orantılı olarak kabul edilir. Kırılgan davranış sergileyen malzemelerde inkübasyon süresi rapor edilmemiştir. Sünek ve gevrek malzemelerde zamana göre kütle kaybı Şekil 22’de gösterilmiştir.



Şekil 22. Sünek ve kırılgen malzemelerde kütle kaybının aşındırıcı parçacıkların toplam kütlesiyle ilişkisi (Barkoula ve Karger-Kocsis, 2002)

Bayındır (2009), yapmış olduğu yüksek lisans tezinde alüminyum alaşımlarının katı parçacık erozyon davranışını incelemiştir. Hedef malzeme olarak 3003, 5754, 6061, 1050 ve 7075 alüminyum alaşımlarını kullanmıştır. Aşındırıcı parçacık olarak, 200 ve 400 μm boyutlarında alümina oksit (Al_2O_3) ile 400 μm boyutunda SAE G40 çelik kullanmıştır. Testler 30, 45 ve 60° olmak üzere üç farklı aşındırıcı parçacık çarpma açısında ve 30 m/s aşındırıcı parçacık çarpma hızında gerçekleştirilmiştir. Böylece, katı parçacık erozyon aşınmasında çarpma açısı, malzeme cinsi ve parçacıkların boyutunun etkileri incelemek istenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, SAE G40 çelik aşındırıcı parçacığın alümina oksit

aşındırıcı parçacığa göre daha fazla aşındırma sağladığı, aşındırıcı parçacık boyutunun arttırılmasının erozyon oranını arttırdığı tespit edilmiştir. Alüminyum alaşımları sünek davranış sergilemiş ve test edilen numuneler arasında en az erozyon dayanımı sergileyen 1050 alüminyum alaşımının 30° çarpma açısında en yüksek erozyon oranına ulaşmıştır.

Ally (2010), yüksek lisans tez çalışmasında, Al6061 alüminyum alaşımı, Ti-6Al-4V titanyum alaşımı ve 316 Paslanmaz çelik malzemelerinin erozyon davranışlarını inceleyip sonuçları birbirleriyle kıyaslamıştır. Aşındırıcı parçacık olarak 50 µm boyutunda alümina oksit (Al_2O_3) kullanılmış, parçacıkların çarpma açıları ise 30, 45, 60 ve 90° olarak belirlenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda en fazla erozyon 316 paslanmaz çelikte, en az aşınma da Al6061'de gözlemlenmiştir.

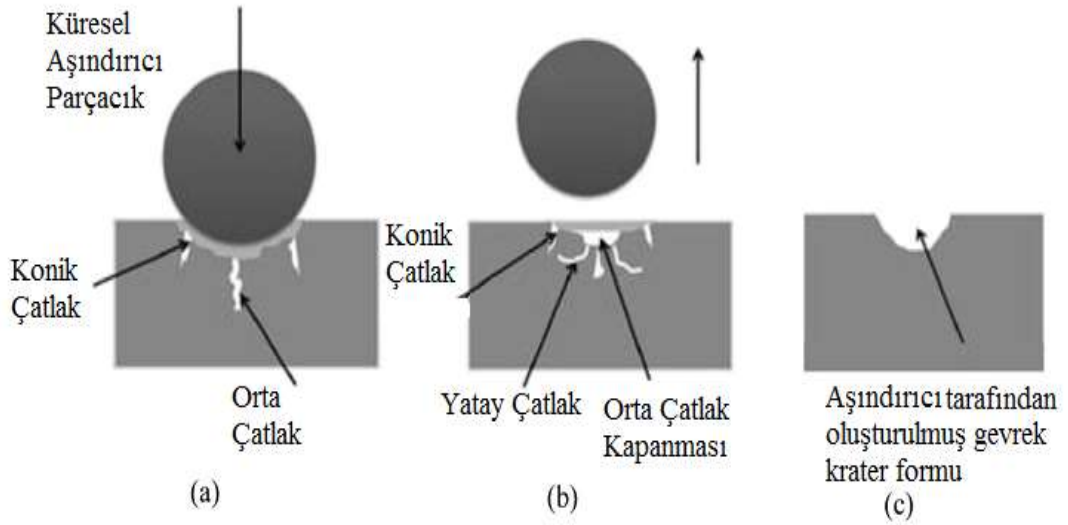
Avcu (2013), yapmış olduğu doktora çalışmasında titanyum alaşımlarının katı parçacık erozyon davranışlarını incelemiştir. Çalışmasında Ti-6Al-4V malzemesinin farklı basınç değerlerinde (1.5, 3 ve 4 bar) ve değişik çarpma açılarında (30, 60 ve 90°) erozyon testleri gerçekleştirmiştir. Testler sonucunda aşınmış numunelerin yüzey morfolojisini ve pürüzlülük değerlerini incelemiştir. Elde edilen bu değerler yardımıyla Ti-6Al-4V malzemesinin erozyon davranışı için özgün bir görüntü analiz yöntemi geliştirilmeye çalışılmıştır.

Yıldırım (2013), yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında 3003 H14 alüminyum alaşımının erozyon davranışını incelemiştir. 15, 30, 45 ve 60° çarpma açıları ve aşındırıcı parçacık olarak 80 ve 180 grit boyutlarında garnet aşındırıcı parçacıkları kullanmıştır. Testde aşındırıcı parçacıkları püskürten havanın basıncını, 1.5, 3 ve 4 bar olarak ayarlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, 15° çarpma açısı ve 4 bar basınçta maksimum erozyon miktarı elde edilmiştir. Testler sonrasında aşınmış numunelerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. Bu incelemelerde 15° ve 30° çarpma açılarında numune yüzeylerinde mikro-kazıma ve mikro-kesme şeklindeki erozyon mekanizmaları, 45° ve 60° çarpma açıları ise derin çukurlar gözlemlenmiştir.

1.3.6. Gevrek Malzemelerde Katı Parçacık Erozyonu

Gevrek malzemeler üzerinde yapılan deneysel araştırmalar, erozyon mekanizması genellikle çatlak şeklindedir (Parsi vd., 2014). Aşındırıcı parçacıklar, gevrek bir malzeme yüzeyine çarptığında, çarptığı hız seviyesine ve çarptığı açıya bağlı olarak hedef malzemenin yüzeyinde yatay ve dikey çatlaklara sebep olurlar. Aşındırıcı parçacıkların yüzeye çarpmalarının devam etmesi, yüzeyde oluşan çatlakların büyümesine neden olmaktadır. Hedef malzemedeki yatay ve dikey çatlaklar, yüzeyde küçük parçacıklar şeklinde dağılırlar. Malzeme yüzeyinde dağılan bu parçalar, yüzeye çarpan diğer aşındırıcı parçacıklar tarafından ayrılarak deformasyon işlemi gerçekleşmektedir.

Gevrek malzemeler, küçük çarpma açılarında en yüksek erozyon dayanımına sahiptirler. Sünük malzemelerin aksine, gevrek malzemelerde en düşük erozyon dayanımı büyük çarpma açılarında meydana gelmektedir (Finnie, 1958). Şekil 23'te gevrek malzemelerde oluşan katı parçacık erozyonu mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 23. Gevrek malzeme katı parçacık erozyon mekanizması: a) konik ve orta çatlağın oluşumu, b) orta çatlağın kapanması ve yatay çatlakların oluşumu, c) aşındırıcı tarafından oluşturulmuş gevrek kraterin gösterimi (Parsi vd., 2014)

Finnie (1960), ilk olarak kırılgen malzemeler üzerinde çeşitli erozyon çalışmaları yapmıştır. Bir çalışmasında, elastik bir küreyi çeşitli hızlarda cam malzeme üzerinde kullanarak erozyon testleri gerçekleştirmiştir. Hedef malzemenin elastisite modülü ve

Poisson oranının etkisi ile aşındırıcı parçacığın yoğunluğu, hızı, Poisson oranı ve elastisite modülünü içeren maksimum radyal gerilme denklemlerini ortaya koymuştur. Finnie aynı zamanda, maksimum çekme gerilmesinin yüzeyde çarpma bölgesi çevresinde radyal yönde meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca kırılğan malzemede darbenin bir halka çatlağı yarattığını gözlemlemiştir.

Zhou ve Bahadur (1995), tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklıklardaki hava ortamında ısıtılmış Ti-6Al-4V alaşımının korozyon-erozyon davranışı incelenmiştir. Hedef malzemeyi, 10 - 90° arasındaki parçacık çarpma açısı ve 55-110 m/s arasında çarpma hızında 120 mesh boyutunda silikon karpit aşındırıcı parçacıkları ile aşındırmışlardır. Aşındırıcı parçacık Çarpma açısının 30° olduğu durumda maksimum erozyon oranını gözlemlemiştir. Yükselen sıcaklık değerlerinde, 30° çarpma açısının olduğu durumda erozyon oranının sıcaklık ile düzenli olarak arttığını ancak çarpma açısının 90° olduğu durumda ise erozyon oranının sıcaklık ile aşırı artış gösterdiğini gözlemlemiştir.

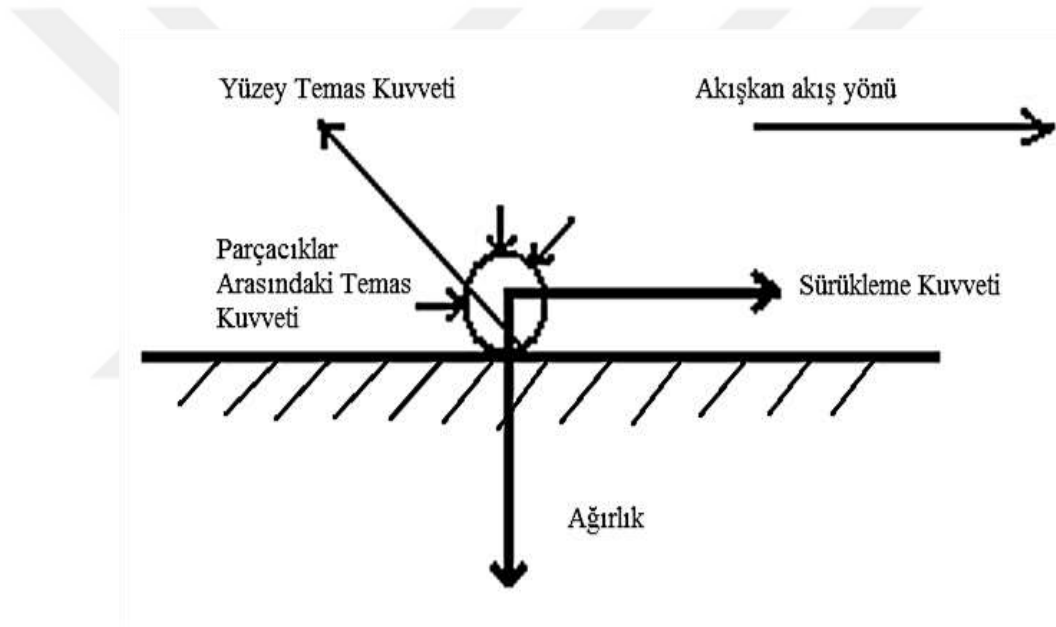
Arjula ve arkadaşları (2008), iyi termoplastik polimer malzemelerin erozyon aşınma davranışları incelemiştir. Çalışmada yedi çeşit termoplastik malzeme (polyetherimide, polyetheretherketone, polyetherketone, polyphenylene sulfide, polyethersulfonei, polysulfone ve ultrahigh molecular weight polyethylene) hedef malzeme olarak kullanmıştır. Testler 15 - 90° çarpma açıları, 25-66 m/s arasında aşındırıcı çarpma hızlarında ve 200 ± 50 µm boyutunda aşındırıcı parçacık olarak silika kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, bazı malzemelerde (PEEK, PPS ve UHMWPE) inkübasyon sürecinin dik çarpma açısında aşındırıcı parçacık çarpma hızının artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Ancak diğer numunelerde bu olay gerçekleşmemiştir.

Yıldırım ve arkadaşları (2014), 3003 alüminyum alaşım malzemesinin katı parçacık erozyon aşınma etkilerini incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde aşındırıcı parçacık çarpma hızının artmasıyla birlikte erozyon oranının da arttığı, aşındırıcı parçacıkların boyutunun büyümesiyle birlikte erozyon oranında azalma gözlemlenmiştir. Küçük çarpma açılarda (15°) hedef malzeme yüzeyinde mikro-kazıma ve mikro-kesme çok daha baskın olarak görülmektedir. Ama orta çarpma açıları (60°) malzeme yüzeyinde plastik deformasyonun oluştuğunu tespit edilmiştir. Malzeme yüzeyinin metalografik incelemesinde bazı aşındırıcı parçacıkların hedef yüzeyine gömüldüğü tespit edilmiştir.

1.3.7. Aşındırıcı Parçacıkların Kuvvet Analizi ve Yüze Etkisi

Hedef malzeme yüzeyi ile temas halinde olan bir aşındırıcı parçacık, farklı kaynaklardan gelen birçok kuvvete maruz kalmaktadır. Yan yana bulunan ve birbiri ile temas eden aşındırıcı parçacıklar, temas kuvvetlerine neden olabilirler ve akan bir akışkan varlığı halinde sürüklenme durumu meydana gelebilir.

Abrazif aşınmada, aşınan parçacıkların miktarı, kayma mesafesine ve normal kuvvetin şiddetine bağlıdır. Erozyon aşınma olayında ise aşınma miktarı yüze çarpmakta olan aşındırıcı parçacıkların kütlesine, sayısına ve bunların çarpma hızına bağlıdır.



Şekil 24. Yüzeyle temasta olan bir aşındırıcı parçacığa etki eden kuvvetler (Hutchings, 1987)

Aşındırıcı parçacığın yüzey temas kuvvetinin büyüklüğü çok önemlidir. Bu kuvvet, hedef malzemenin yüzeyini deforme edip hasarlara yol açmaktadır. Yüzey temas kuvvetinin/basıncının büyüklüğü, parçacıkların arasındaki etkileşim kuvveti, yerçekimi kuvveti ve sürüklenme kuvvetine bağlıdır. Buna ilaveten, aşındırıcı parçacığın akışına, çarpma hızına, çarpma açısına ve hedef malzeme özelliklerine de bağlıdır (Hutchings, 1987).

1.4. Tezin Konusu ve Amacı

Bu tez çalışması kapsamında pleksiglas, siyah lamine cam, renksiz lamine cam ve polikarbonat gibi şeffaf mühendislik malzemelerinin katı parçacık erozyon davranışlarının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, katı parçacık erozyon testleri üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, tüm malzemelerin katı parçacık erozyonu davranışları için sabit bir aşındırıcı parçacık çarpma açısı (90°) seçilmiş ve bu açı değeri için farklı aşındırıcı çarpma hızlarında (75, 150 ve 190 m/s) erozyon performansları incelenmiştir.

İkinci aşamada ise, sabit bir aşındırıcı parçacık çarpma hızında (150 m/s) ve değişik parçacık çarpma açılarında (20, 30, 45, 60 ve 90°) erozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede seçilen şartlarda şeffaf malzemelerin erozyon miktarlarının değişimlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamında her test durumu en az iki tekrar edilmiştir.

Malzemelerin üzerinde aşındırıcı parçacıkların boyutunun etkisini incelemek amacıyla, ilk iki aşama sonunda numuneler arasında en yüksek erozyon dayanımına sahip olduğu anlaşılan polikarbonat üzerinde iki farklı boyutta silika karbür (SiC) parçacığı kullanılmıştır.

2. TEZ KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında polikarbonat, pleksiglas, siyah lamine cam ve renksiz lamine cam gibi şeffaf malzemelerinin katı parçacık erozyon davranışları aşındırıcı parçacık çarpma açısı ve çarpma hızına göre incelenmiştir.

İlk aşamasında sabit bir aşındırıcı parçacık çarpma açısı (90°) seçilmiştir ve bu parçacık çarpma açısı için dört farklı çarpma hızlarında (75, 150 ve 190 m/s) erozyon aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise sabit bir aşındırıcı parçacık çarpma hızı (150 m/s) seçilmiştir. Bu parçacık çarpma hızı için beş farklı aşındırıcı parçacık çarpma açısında (20, 30, 45, 60 ve 90°) erozyon testleri her bir malzeme için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her test en az ikişer tekrarlanarak erozyon miktarları karşılaştırılmıştır.

2.1. Deneysel Çalışmalar

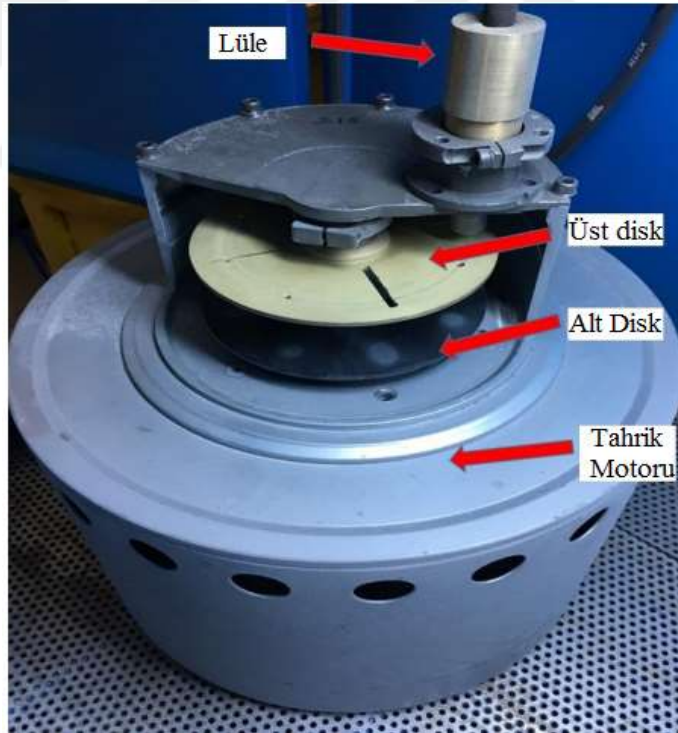
Katı parçacık erozyon testleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında TUSAŞ-TAI ile gerçekleştirilen bir proje (DKTM 2015-03, Sözleşme No: 201500439) kapsamında imal edilmiş ve MIL-STD 3033, ASTM-G76 ve ASTM-F1864 standartlarına uygun testler yapabilen bir test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu test düzeneği ile istenilen standarda uygun lüle (nozzle) kullanılarak testler gerçekleştirilebilmektedir.

2.1.1. Aşındırıcı Parçacıkların Özellikleri ve Hız Ölçümü

Tez çalışmasında gerçekleştirilen testlerde iki farklı aşındırıcı parçacık kullanılmıştır. İlk olarak 52 μm boyutlu alümina oksit (Al_2O_3) aşındırıcı parçacıklar tüm numuneler için ASTM G*76 Standardı referans alınarak kullanılmıştır. İkinci aşındırıcı parçacık ise, 71 ve 348 μm nominal boyutlardaki silika (SiC) kumu olup MIL-STD-3033 standardına uygun olarak 3. aşamada test edilen polikarbonat malzemenin testlerinde kullanılmıştır.

Aşındırıcı parçacıkların boyut dağılımları “Malvern Mastersizer” cihazıyla incelenmiş olup ölçüm raporları Ek-1, Ek-2 ve Ek-3’te sunulmuştur. Aşındırıcı parçacıkların hızlarının tespiti amacıyla aynı laboratuvarında bulunan “Çift Disk Hız Ölçüm Düzenegi” kullanılmıştır.

Çift disk hız yöntemi, Ruff ve Ives tarafından 1975 yılında bulunmuştur. Bu yöntem ile malzemelerin erozyon testinde uygulanan bir gaz-parçacık akışındaki katı parçacıkların hızını belirlemek için bir yöntem tarif edilmiştir. Bu basit mekanik konfigürasyon, katı parçacıkların hızlarının ölçümünü çok farklı koşullar altında yapılmasını sağlar. Parçacıkların uçuş süresi, iki dönen disk arasındaki kontrollü bir yol uzunluğu üzerinden belirlenir. Bu düzenek aynı açısal hızla dönen iki disk ve disklerin dönmesini sağlayan bir tahrik motorundan oluşmaktadır. Aşındırıcı parçacıklarının çift disk yöntemi ile yapılan hız ölçümleri sonucu, basınç- aşındırıcı parçacık hız kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir. Şekil 25’te çift disk ekipmanları gösterilmiştir.

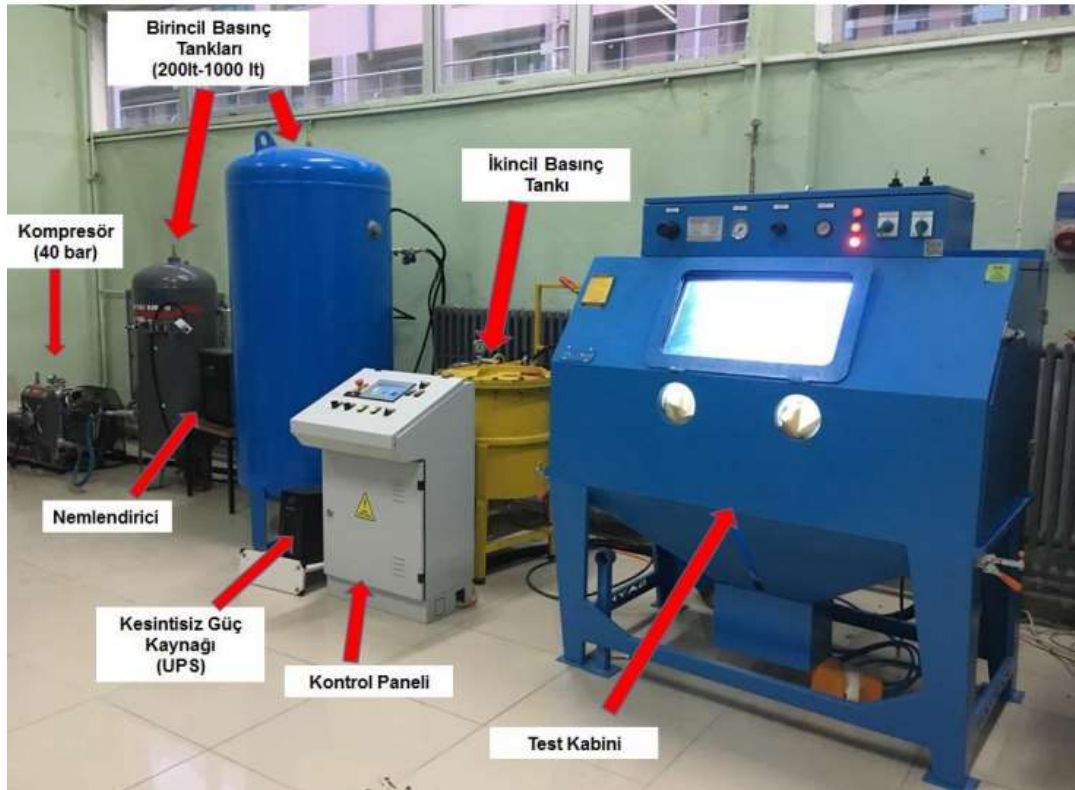


Şekil 25. Çift disk hız ölçüm düzenegi

2.1.2. Katı Parçacık Erozyon Test Sistemi ve Test Prosedürü

Literatürde erozyon aşınma testleri için yaygın olarak katı parçacık, santrifüj hızlandırıcı, sıvı-çamur, dönen kol ve sirkülasyon metotları kullanılmaktadır. Bu metotların arasında en yaygın olanı katı parçacık erozyon yöntemidir. Bu metotta aşındırıcı parçacıklara hava veya sıvı akıntısında ivme kazandırılması ve çarpma hızını elde etmek için sirküler hareketin kullanılması amaçlanır. Katı parçacık erozyon aşınması için yaygın olarak referans alınan iki ASTM standardı mevcuttur. Bunlar ASTM G76-13 ve ASTM F1864 standartlarıdır. Ancak bu standartlar, uzay ve havacılık sektöründe özellikle helikopterin iniş-kalkış sırasında meydana gelen koşulları temsil etmemektedir. Bu sebeple MIL-STD-3033, Amerikan Askeri Standardı geliştirilmiştir. Bu standartta, aşındırıcı parçacıklara yüksek çarpma hızı kazandırılması gereklidir.

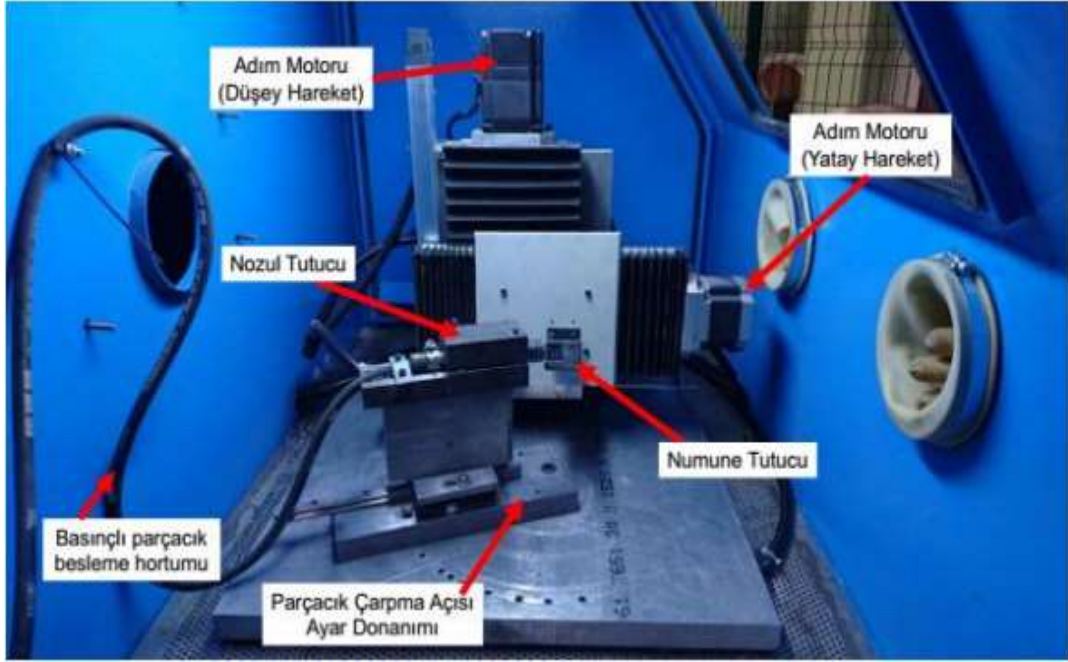
Standartlarda belirtilen şartlara uygun olarak KTÜ Mekanik Laboratuvarı'nda mevcut bulunan ve tez kapsamındaki araştırmalar için kullanılmak üzere hazırlanan test düzeneğinin ana elemanları Şekil 26'da verilmiştir.



Şekil 26. KTÜ katı parçacık erozyon test düzeneği görüntüsü

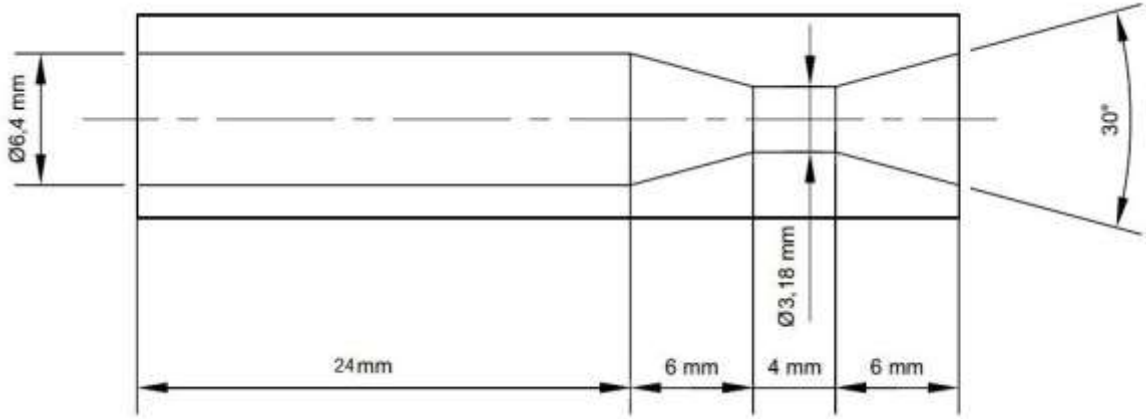
Bu test düzeneğinde istenilen basınç değerini sağlamak için 40 bar basınç kapasiteli bir adet kompresör bulunmaktadır. Kompresör tarafından sağlanan basıncın depolanması için, biri 200 litrelik ve diğeri 1000 litre kapasiteli iki hava tankı mevcuttur.

Testler esnasında kullanılan havanın neminin alınması için bir adet basınçlı hava kurucusu da sistem bileşenlerindedir. Bulunmaktadır. Testde aşındırıcı parçacıkların istenilen hızda test numunelerine yönlendirilmesi için basınçlandırılmasını sağlayan bir adet ikincil koşullandırma tankı mevcuttur. Bu tankın içerisinde bir adet hassas dozajlama düzeneği bulunmakta olup bu düzenek yardımıyla 0.2 g/dk hassasiyetine kadar toz miktarı elde edilmesi mümkündür. Aşındırıcı parçacıklar, ikincil basınç tankında belli bir değere kadar basınçlandırılıp lüle yardımıyla numune yüzeyine püskürtülmektedir.



Şekil 27. KTÜ katı parçacık erozyon test sistemi kabin içi görüntüsü

Katı parçacık erozyon testlerinde ilk iki aşamada ASTM G76 standardına uygun olarak ve ortalama çapı 52 µm olan aşındırıcı parçacık alümina oksit (Al_2O_3) ve 1/16" (1.587 mm) çaplı lüle kullanılmıştır. 3. aşamada ise aşındırıcı parçacık olarak 71-348 µm boyutlu silika karbür (SiC) kullanılmıştır. Yapılan yüksek basınç değerlerinde blokaj (kitlenme) sorunu yaşanmaması için daha büyük çapa 1/8" (3.175 mm) sahip ve MIL-STD-3033 standarda uygun olan lüle kullanılmıştır. Bu lüle yardımıyla 6630 mbar basınç değerine kadar testler sorunsuz bir şekilde tamamlanmıştır. Şekil 28'de bu lüleye ait teknik resim gösterilmektedir.



Şekil 28. Erozyon testlerinde kullanılan lüle teknik resmi (1/8" lüle çapı)

Testler esnasında, test parametrelerinin kontrol edebilmesi için bir kontrol panel mevcuttur. Bu panel yardımıyla kompresörün açılıp/ kapatılması, nem alma sisteminin açılıp/kapatılması, hassas dozajlama ünitesinin hızının ayarlanması, birincil ve ikincil tanklarındaki havanın basıncının ayarlanması, MIL-STD-3033 testleri için numune tutucu tablanın hareketinin sağlanması ve çalışma bölgesinin belirlenmesi ile test kabının içindeki basınç, nem ve sıcaklık ölçümleri de yapılabilmektedir. Testler esnasında elektrik kesilmesi ve gerilim değişmesinin önlenmesi için kesintisiz güç kaynağı kullanılmıştır. Katı parçacık erozyon testleri yapılırken aşağıdaki işlem sırası takip edilmiştir.

1. Malzemeleri istenilen boyutlarda kesilmiştir. Cam numuneler elmas cam kesici aparatıyla kesilmiştir. Polikarbonat ve pleksiglas numuneleri testere makinesi ile kesilmiştir.
2. Testden önce numunelerin ilk ağırlıkları en az üç kez 10^{-4} g hassasiyete sahip hassas terazi ile tartılarak aritmetik ortalaması kaydedilmiştir.
3. Numune, test kabini içindeki tutucu aparata yerleştirilerek lüle istenilen aşındırıcı parçacık çarpma açısına göre ayarlanmıştır.
4. Aşındırıcı parçacıklara istenilen hızın kazandırılması için gerekli basınç miktarları, ikincil tanka girilmiştir. Selenoid vanalar desteğiyle istenilen bu basınç değeri sürekli olarak sağlanmıştır.
5. Aşındırıcı parçacıkların debileri 2.3 g/dk olarak ayarlanmıştır. Bu debi değeri ikincil basınç tankı içerisinde bulunan hassas dozajlama düzeneği ile sağlanmıştır. Aşındırıcı parçacıkların debisi test esnasında kontrol edilmiştir.

6. Katı parçacık erozyon testleri periyodik olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Testin toplam süresi 16 dakika olup toplam dört periyottan oluşmaktadır. Her periyot sonunda test durdurulmuş ve numunenin kütlesi hassas terazi ile üçer kez ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda ortaya çıkan aritmetik ortalama değeri kaydedilmiştir.
7. Her periyodun sonunda kütle aritmetik ortalaması numunenin ilk kütlesinden çıkartılmış ve erozyon kaybı olarak test föyüne kaydedilmiştir.
8. Katı parçacık erozyon testlerinde üç aşındırıcı parçacık kullanılmıştır. İlk olarak tüm malzemeler için alümina (Al_2O_3) aşındırıcı parçacık kullanılmıştır.
9. Son testler olarak polikarbonat malzemesi için iki farklı boyutlu silika (SiC) kullanılmıştır. Bu aşamada önce küçük boyutlu ($71 \mu m$) silika ve sonra büyük boyutlu ($348 \mu m$) silika toz kullanılmıştır.
10. İlk testlerde alümina aşındırıcı parçacık kullanılmış olup bu grup testler iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Birinci aşamada erozyon miktarının aşındırıcı parçacık çarpma hızına göre değişimleri incelenmiştir. Sabit bir aşındırıcı parçacık çarpma açısı (90°) için farklı çarpma hızlarında malzemelerin erozyon davranışlarını incelenmiştir. Bu test şartları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Erozyon miktarının aşındırıcı parçacık çarpma hızına göre test şartları

Test Basınç [mbar]	300, 850, 2100, 4000
Çarpma Açısı [$^\circ$]	90
Test Süresi [dk]	16 dk (4x4)
Aşındırıcı Parçacık	Al_2O_3
Parçacık Boyutu [μm]	52
Test Tekrar Sayısı	En az 2 tekrar
Hedef Malzeme	Polikarbonat, pleksiglas, siyah ve renksiz lamine cam

İkinci aşamada ise erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimleri incelenmiştir. Bu aşamada sabit bir aşındırıcı parçacık hızı ($150 m/s$) ile farklı parçacık çarpma açılarında testler gerçekleştirilmiştir. Bu test şartları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Erozyon miktarının aşındırıcı parçacık çarpma açısına göre test şartları

Test Basınç [mbar]	2100
Çarpma Açısı [°]	20, 30, 45, 60, 90
Test Süresi [dk]	16 dk (4x4)
Aşındırıcı Parçacık	Al ₂ O ₃
Parçacık Boyutu [µm]	52
Test Tekrar Sayısı	En az 2 tekrar
Hedef Malzeme	Polikarbonat, pleksiglas, siyah ve renksiz lamine cam

11. Yapılan testlerde erozyon aşınmasına karşı en iyi performansı polikarbonat malzeme sergilenmiştir. Bundan dolayı 3. Aşamada daha büyük ve farklı aşındırıcı parçacık (SiC) kullanılıp polikarbonat malzemesinin erozyon davranışları tekrar incelenmiştir.

Tablo 6. Polikarbonat malzemesi aşındırıcı parçacık çarpma hızına göre test şartları

Test Basıncı [mbar]	380, 2030, 3700
Çarpma Açısı [°]	90
Test Süresi [dk]	16 dk (4x4)
Aşındırıcı Parçacık	SiC
Parçacık Boyutu [µm]	71
Test Tekrar Sayısı	En az 2 tekrar
Hedef Malzeme	Polikarbonat (Polycarbonate Solid Sheet)

Tablo 7. Polikarbonat malzemesi aşındırıcı parçacık çarpma hızına göre test şartları

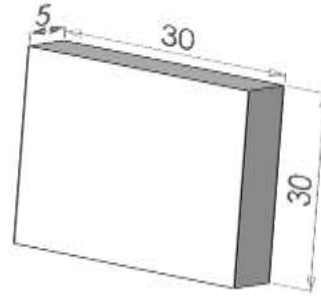
Test Basınç [mbar]	1100, 6630
Çarpma Açısı [°]	90
Test Süresi [dk]	16 (4x4)
Aşındırıcı Parçacık	SiC
Parçacık Boyutu [μm]	348
Test Tekrar Sayısı	En az 2 tekrar
Hedef Malzeme	Polikarbonat (Polycarbonate Solid Sheet)

2.2. Numune Özellikleri

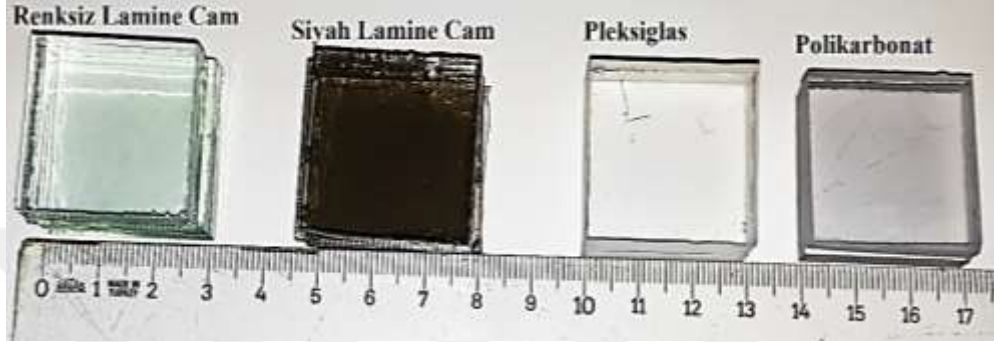
Tez çalışmasının deneysel bölümünde polikarbonat, pleksiglas, siyah lamine cam ve renksiz lamine cam gibi şeffaf malzemelerin katı parçacık erozyon davranışları incelenmiştir. Bu numunelerin aşındırıcı parçacık çarpma açısına ve aşındırıcı parçacık çarpma hızına göre erozyon miktarının değişimleri tespit edilmiştir. Hedef malzemeler farklı firmalardan temin edilmiştir. Lamine camlar (Şişecam A.Ş.) elmas cam kesici aparatıyla firmanın profesyonel ustaları tarafından kesilmiştir. Polikarbonat (SABIC, Suudi Arabistan) ve pleksiglas (yurt içi temin) numuneleri elektrikli testereyle belirtilen ölçülerde kesilmiştir. Tablo 8’de kullanılan numuneler ve kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 8. Erozyon test numunelerinin türleri ve kalınlıkları

Numune Türü	Kalınlık (mm)
Polikarbonat (Polycarbonate)	5
Pleksiglas	8
Renksiz Lamine Cam	8
Siyah Lamine Cam	8



a)



b)

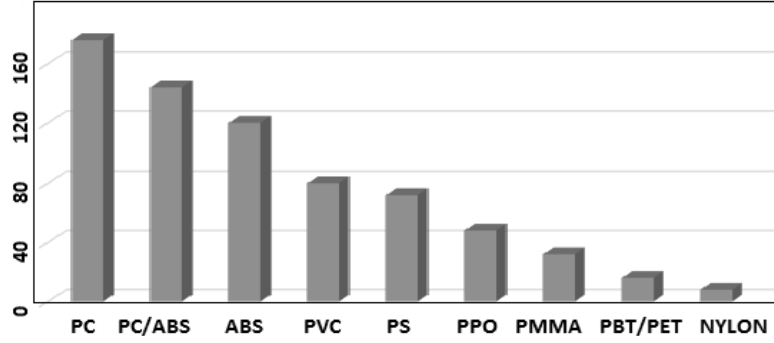
Şekil 29. a) Polikarbonat numunenin boyutları, b) Test numunelerinin görüntüsü

Yapılan erozyon testleri neticesinde lamine camlar, ikinci periyotun sonunda, yüksek test basıncı (aşındırıcı parçacık hızı) değerlerinde ve yüksek aşındırıcı parçacık çarpma açılarında delinmiştir. Buna ilaveten, pleksiglas malzemesinin de yüksek basınçlarda ve yüksek aşındırıcı parçacık çarpma açılarında delindiği gözlemlenmiştir. Çarpma açısı azaldıkça hedef malzeme yüzeyinde oluşan aşınma izi bölgesinin büyüdüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle büyük çaplı lüle kullanımında daha büyük numuneler hazırlanmıştır.

2.2.1. Polikarbonat (Polycarbonate Solid Sheet) Malzemesi ve Özellikleri

Polikarbonat (polycarbonate solid sheet) levhalar, termoplastik malzeme olarak kategorize edilmektedir. Polikarbonat (PC) malzeme, piyasada çeşitli renklerde, saydam ve yarı saydam olarak cama alternatif olarak sunulmaktadır. Işık geçirgenliği %85 civarında olup cama göre oldukça dayanıklı ve hafiftir. Her iki tarafından yüksek düzeyde UV (ultraviolet) ışıklardan korumakta ve camın bugün kullanıldığı alanlar için daha uygun bir alternatif sunmaktadır. Polikarbonat ısıya dayanıklıdır ve alev geciktiriciler (flame retardant) ile birlikte bu direnci daha üst seviyeye taşınabilmektedir. Polikarbonatın diğer bir özelliği de çok esnek olmasıdır. Alüminyum levhalar gibi plakalar halinde üretilebilir ve

kolayca stoklanabilir. Kalınlığı ile orantılı olarak soğuk büküm alabildiği gibi ısı ile de şekillendirilebilmektedir. Polikarbonat amorf bir malzeme olup kristalli katıların özelliklerini göstermez.



Şekil 30. Polikarbonat (PC) malzemesinin diğer plastik malzemelere göre darbe dayanımının karşılaştırması (URL-2, 2019)

Hava araçlarında kanopi malzemesi olarak da kullanılan polikarbonat levhalar, katı parçacık erozyon davranışlarını incelenmesi amacıyla TUSAŞ-TAI'den temin edilmiş olup Saudi Basic Industries Corporation (SABIC, Riyad, Suudi Arabistan) tarafından üretilmektedir.

Tablo 9. Polikarbonat malzemenin özellikleri (URL-4, 2019)

Yoğunluk [g/cm³]	1.19
Rockwell Sertlik (M skalası)	70
Çekme Gerilmesi [MPa]	62
Elastisite Modülü [N/mm²]	2340
Işık Geçirgenliği [%]	88
Çalışma Sıcaklığı Aralığı [°C]	-40 - 115

Polikarbonat malzeme, yüzeyde su tutmama, mükemmel ısı ve ses izolasyonu özelliklerine sahiptir. Kırılmaya karşı oldukça dirençli olup camdan 200 kat ve pleksiglas levhadan 6 kat mukavemetlidir. Bu malzeme

- Otomotiv
- Uzay ve havacılık
- Askeri alanlarda (kurşungeçirmez, koruma kalkanlar)
- İnşaat
- Fabrikaların aydınlık alanlarında
- Yaya geçitlerinde
- Merdiven ve balkon korkuluklarında

Kullanılmaktadır. Bu malzemenin avantajlarının yanı sıra az da olsa dezavantajları da vardır. Polikarbonat malzeme cama oranla daha yumuşak yüzeye sahip olması nedeniyle kolayca çizilebilir. Çeşitli temizlik malzemelerinin içerdiği kimyasallardan ve aşındırıcılardan da olumsuz yönde etkilenmekte ve zaman içinde kendilerine özgün üstün optik özelliklerin kaybedebilmektedir, (Bayramoğlu, 2005). Lâkin gelişen teknoloji sayesinde bu malzemelerin yüzeyleri çeşitli yöntemlerle kaplanarak erozyon aşınmalarına karşı dayanımı arttırılmaktadır.



Şekil 31. Polikarbonat levha malzemenin görüntüsü

2.2.2. Pleksiglas (Polymethylmethacrylate) Malzemesi ve Özellikleri

Pleksiglas malzemeler piyasada renkli ve renksiz çeşitleri bulunan termoplastik malzemelerdir. Literatürde polymethylmethacrylate (PMMA) olarak bilinen bu malzeme saydam ve yarı saydam, kolay işlenebilen, UV (ultraviolet) ışınımına dirençli, ışık geçirgenliği yüksek ve cama göre daha dayanıklı olup camdan kat kat hafif olmaktadır.

Tablo 10. Pleksiglas malzemenin özellikleri (URL-5, 2019)

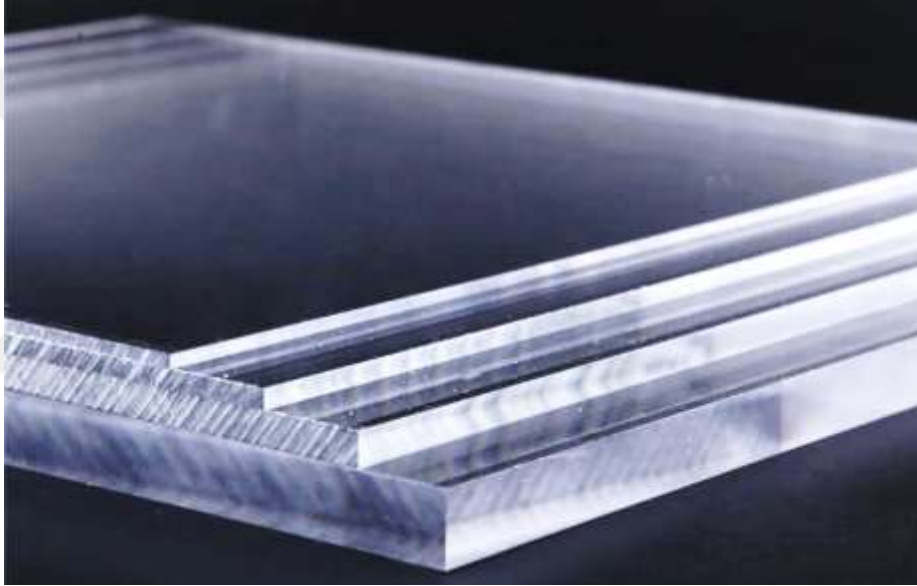
Yoğunluk [g/cm³]	1.18
Rockwell Sertlik	95
Kopma Gerilmesi [MPa]	70
Elastisite Modülü [N/mm²]	3300
Işık Geçirgenliği [%]	92
Çalışma Sıcaklığı Aralığı [°C]	70 - 150

Bu malzemenin cama göre daha hafif olması camın kullanıldığı birçok yerde kullanılabilmesi önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- Otomotiv yan sanayi
- Denizcilik sektöründe (yat)
- Polis kalkanları
- Gıda endüstrisinde stoklama kabı
- Sağlık sektöründe (küvez Camı)
- İnşaat sektöründe ve mimarlık iç dekorasyon

Bu malzemelerin yüzeyleri cama göre biraz daha yumuşaktır. Pleksiglas ve polikarbonat gibi polimerik malzemeler üstün optik özelliklere sahip olmalarına rağmen çoğu zaman atmosferik ortamda bulunan tozların neden olduğu çizilme ve aşınmanın yanı sıra çeşitli temizlik malzemelerinin içerdiği kimyasallardan ve aşındırıcılardan da olumsuz yönde etkilenmekte ve zaman içinde kendilerine özgü üstün optik özelliklerini kaybetmektedirler. Bu sebeple, bu tür malzemeler yüzey geliştirme yöntemleri ile

kaplanarak, kullanım amacının gerektirdiği koşullara dayanıklı şekilde modifiye edilmektedir. Bayramoğlu (2005), yüksek lisans çalışmasında pleksiglas malzemenin yüzey çizilme direncini arttırmak için UV ışınları ile sertleşebilen Sol-Jel kaplama yöntemini kullanarak pleksiglas malzemenin üzerine istenilen kalınlıkta ve homojen olarak uygulanabilmesi amacıyla bir uygulayıcı kullanmıştır. Çalışma sonunda, kaplanmış numunenin sertliğinin ısıtılma süresine bağlı olarak %5 ile %9 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Parlaklık test sonuçlarına göre modifiye olmamış numunelerin parlaklığı ısıtılma süresi ile değişim göstermezken, kaplanmış numunenin parlaklığı ısıtılma süresine bağlı olarak değişmektedir. Isıtılma süresi arttıkça malzemenin parlaklığı azalmaktadır.

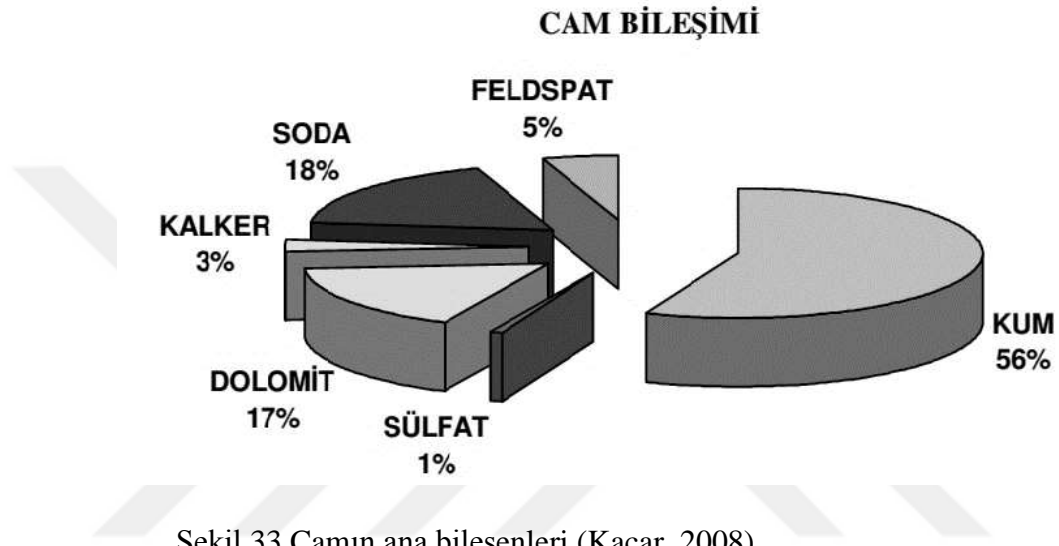


Şekil 32. Farklı kalınlıklardaki pleksiglas levha malzeme

2.2.3. Siyah ve Renksiz Lamine Cam ve Özellikleri

Cam, muhtemelen insan tarihinde kaydedilen en eski insan yapımı gevrek bir malzemedir (Erorta, 2002). Cam, şeffaf, parlak, kırılğan, sert ve yüksek sıcaklıkta eriyerek, hızlı bir biçimde oda sıcaklığına soğutulan ve bu esnada kristalleşme göstermeyen amorf (yarı düzenli yapıda) bir malzemedir. Başka bir deyişle, çeşitli hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılarak 1500 °C sıcaklığın üzerinde akışkan hale getirildikten sonra kontrollü olarak soğutulmasıyla oluşan bir maddedir (O'Regan, 2014). Camın yapımında kullanılan hammaddeler, camın kullanımı, rengi ve diğer özelliklerine göre değişim göstermektedir. Bu hammaddeler genel olarak kum, dolomit, soda, feldspat, kalker, sodyum sülfat ve cam

kırığı başlıkları altında toplanır. Esas bileşeni kuvars (SiO_2) olan kum genel olarak %95 üzerinde SiO_2 içermekte olup geri kalan kısım ise yan bileşenler veya minerallerden oluşmaktadır. SiO_2 camın iskeletini oluşturmaktadır. Camlar doğa ve kullanım koşullarına dayanabiliyorsa bu büyük oranda içindeki SiO_2 miktarı ile ilgilidir (Kaçar, 2008). Başta kum olmak üzere diğer hammaddeler de uygun şekilde tartılarak homojen karışımı sağlanırsa, istenilen yüksek kalite cam elde edilebilmektedir.



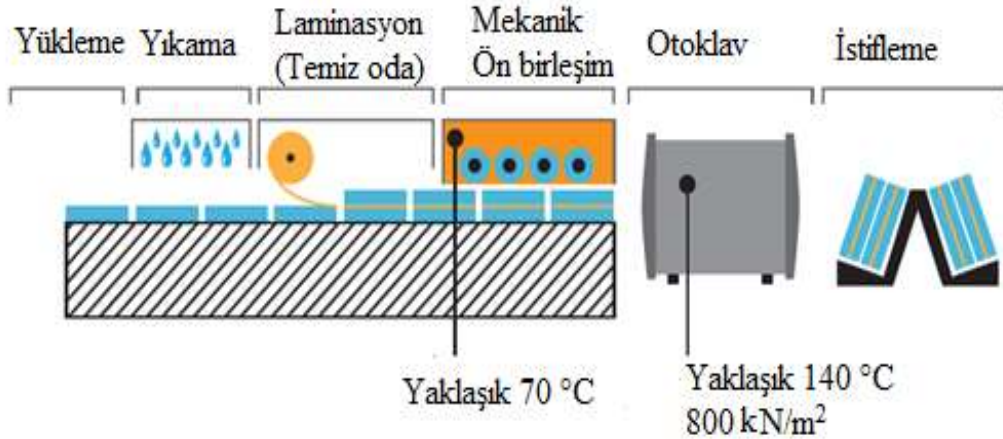
Cama renk verme prosesi, içinde renk pigmenti bulunan hammaddelerin camın içine karıştırılarak, beraber ergitilmesi yöntemi ile gerçekleştirilir. Renklendirici madde olarak oksit kullanılır. Renk veren oksitler değişik oranlarda kullanılarak çeşitli renkler verilebileceği gibi birkaçının bir arada kullanılmasıyla farklı renkler de oluşabilir. Oksitler camda çözünerek renk oluştururlar. Camda kullanılan bazı renk veren oksitler aşağıda sıralanmıştır (Erorta, 2002).

- Yeşil: Cr_2O_3 (krom trioksit), Fe_2O_3 (demir trioksit),
- Mavi: CuO (bakir oksit), CoO (kobalt oksit), CoO_3 (kobalt trioksit)
- Menekşe rengi: MnO (mangan oksit), MnO_2 (mangan dioksit),
- Kırmızı: S (sülfür) , Cd (kadmiyum)

Camın viskozitesi en önemli teknolojik özelliğidir. Camın ergime koşulları, işlenmesi, tavlama sıcaklığı, kristalleşme hızı büyük oranda viskozite tarafından belirlenir. Camın yoğunluğu, katı halinde birçok başka özelliğini etkilediği gibi ergitme aşaması için de

önemlidir. Camın kırılma indeksi genellikle yoğunlukla artarken, özgül hacimle azalır (Kaçar, 2008). Camın diğer bir özelliği ise gelen ışını %85-98 oranında geçirmesidir. Bu nedenle iyi bir ışık geçirgenlik özelliğine sahiptir. Ayrıca kalınlığının artmasıyla birlikte cam, ısı ve ses geçirgenliğini azaltmaktadır (URL-3, 2019).

Testde kullanılan camlar iki katmanlı olup ara katman olarak polivinil butiral (PVB) malzemesi kullanılmıştır. Bu tür camlar lamine camlar olarak adlandırılmaktadır. Lamine camlar emniyetli ve yüksek güvenilir camlar grubundan sayılmaktadır. Ara katman polimer malzemelerin kalınlığı 0.38 - 6 mm arasında değişebilmekte olup, çoğu zaman 0,38 mm kalınlığında kullanılmaktadır. Kurşungeçirmez lamine camlar için 6 mm kalınlıkta polivinil butiral (PVB) malzeme kullanılmaktadır (Garg, 2007). Düz camlar PVB malzeme ile montaj yapıldıktan sonra bir fırında 70 °C ısı altında merdanelerden geçirilerek katmanda bulunan hava taneciklerinin çıkması sağlanmaktadır. Bu camlar, tekrar yaklaşık 140°C otoklav içinde ve 800 kN/m² basınca tabi tutulur (O'Regan, 2014). Şekil 34'te lamine camların üretim aşamaları gösterilmektedir.

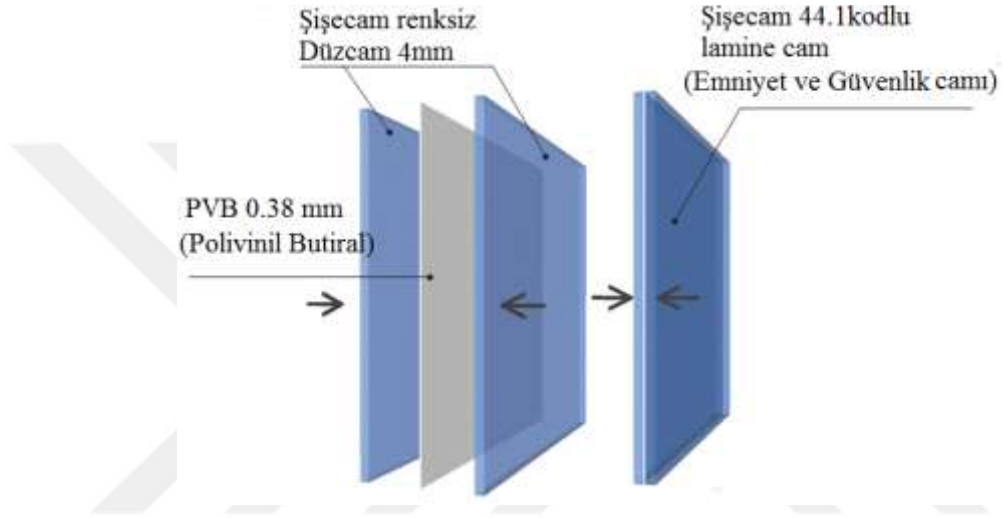


Şekil 34. Lamine cam üretim hattı (URL-6, 2019).

Katı parçacık erozyon testlerinde kullanılan lamine camlar Trakya Cam Sanayi A.Ş fabrikasından temin edilmiştir. Firma, gizlilik politikası nedeniyle üretilen cam malzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında bilgi paylaşmamaktadır. Bu nedenle, firma tarafından lamine camlara verilen kodlar kullanılmıştır. Literatür araştırmasına göre soda-kireç silika camı en yaygın cam türüdür. Literatürde bulunan genel bilgiler Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Lamine camın fiziksel ve mekanik özellikleri (URL-6, 2019)

Yoğunluk [g/cm³]	2.5
Sertlik HM (Mohs Skalası)	6
Basınç Dayanımı [MPa]	175
Işık Geçirgenliği [%]	85-98



Şekil 35. Lamine cam malzeme üretim montaj yapısı (URL-6, 2019)

Teknolojinin gelişmesiyle camların kullanım alanları genişlemektedir. Lamine camların kullanım alanlarının bazıları aşağıda verilmiştir.

- Otomotiv ön camları
- İnşaat sektörü
- Rüzgârlıklar
- Giydirme cephe

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Test Sonuçları

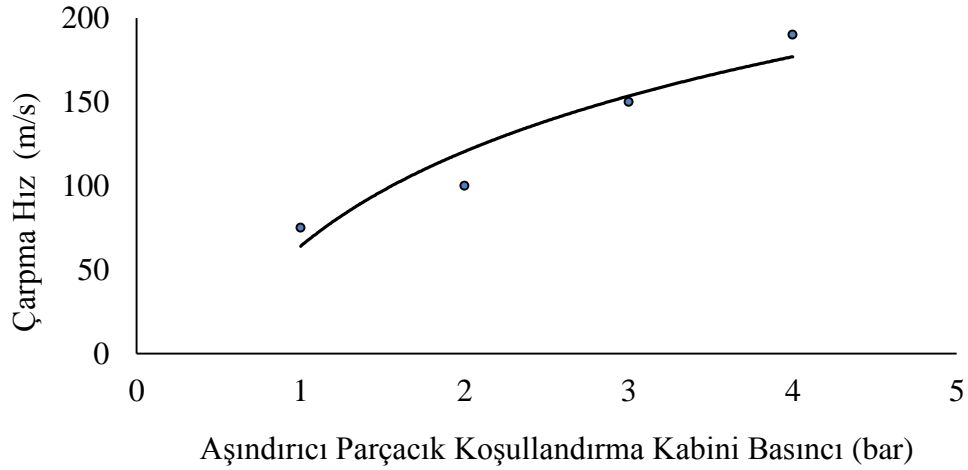
Bu çalışma kapsamında dört şeffaf malzemenin (pleksiglas, polikarbonat, siyah lamine cam ve lamine cam) katı parçacık erozyon davranışlarının incelenmesi amacıyla testler gerçekleştirilmiştir. Katı parçacık erozyon testleri üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bu malzemelerin erozyon davranışlarının çarpma hızına göre değişimleri ele alınmıştır. Bunun için sabit bir çarpma açısı (90°) seçilmiş ve bu açı değerinde farklı çarpma hızlarında oluşan erozyon miktarları incelenmiştir. İkinci aşamadaki katı parçacık erozyon testlerinde ise çarpma açısının malzemelerin erozyon davranışına etkisi incelenmiştir. Bunun için sabit bir çarpma hızı (150 m/s) seçilmiş ve bu değer için beş farklı çarpma açısında testler gerçekleştirilmiştir. Son olarak 3. aşama çalışmaları kapsamında, en iyi erozyon aşınma dayanımı performansı sergileyen polikarbonat malzemesi, farklı boyut ve türdeki aşındırıcı parçacıklar (Al_2O_3 - 240, SiC-60 ve SiC-220) kullanılarak test edilmiştir.

3.2. Hız Kalibrasyon Eğrisinin Eldesi

Katı parçacık erozyon testinde kullanılan aşındırıcı parçacıkların numune yüzeyine istenilen hız değerinde çarptırılması için, daha yüksek kapasitesi olan ikincil basınç tankından basınçlandırılmakta ve test kabine beslenilmektedir. Testlerde kullanılan tozların (Al_2O_3 - 240, SiC-60 ve SiC-220) hız-basınç kalibrasyon değerleri çift disk yöntemiyle belirlenmiştir. Parçacıkların hız değerlerine karşılık gelen basınç miktarları tablolarda verilmektedir. Hız-basınç kalibrasyonu değerleri grafiksel olarak ayrı ayrı verilmektedir. Her parçacık için grafik yardımıyla istenilen hız değeri (basınç miktarı) tespit edilmektedir. Bütün malzemelerin erozyon aşınma testlerinde alümina oksit kullanılmıştır. Tablo 12’de alümina oksit aşındırıcı parçacığına ait hız-basınç değerlerini verilmiştir. Şekil 36’de ise alümina oksit parçacığının kalibrasyon değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 12. Alümina (Al_2O_3 -240 grit) aşındırıcı parçacığına ait -basınç-hız değerleri

Basınç [mbar]	Aşındırıcı Parçacık Hızı [m/s]
300	75
850	100
2100	150
4000	190

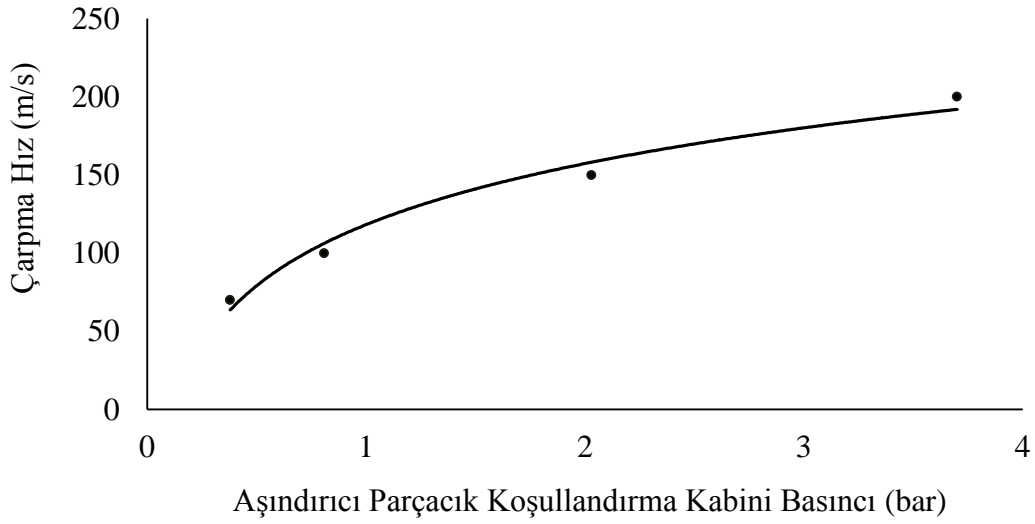


Şekil 36. Alümina oksit (Al_2O_3 -240 grit) aşındırıcı parçacığının hız-basınç kalibrasyon grafiği

Şekil 37’de silika (SiC-220 grit) ve boyutu yaklaşık $71\mu m$ olan aşındırıcı parçacığın hız-basınç kalibrasyon değerleri grafiksel olarak verilmiştir. Bu parçacıklar sadece polikarbonat malzemenin testlerinde kullanılmıştır”. Bu parçacık türü, alümina oksit (Al_2O_3) kuma göre daha az bir erozyon aşınmasına sebep olmaktadır. Tablo 13’te bu parçacığın hız-basınç kalibrasyon değerleri verilmektedir.

Tablo 13. Silika (SiC- 220 grit) aşındırıcı parçacığına ait basınç-hız değerleri

Basınç [mbar]	Aşındırıcı Parçacık Hızı [m/s]
380	70
810	100
2030	150
3700	200

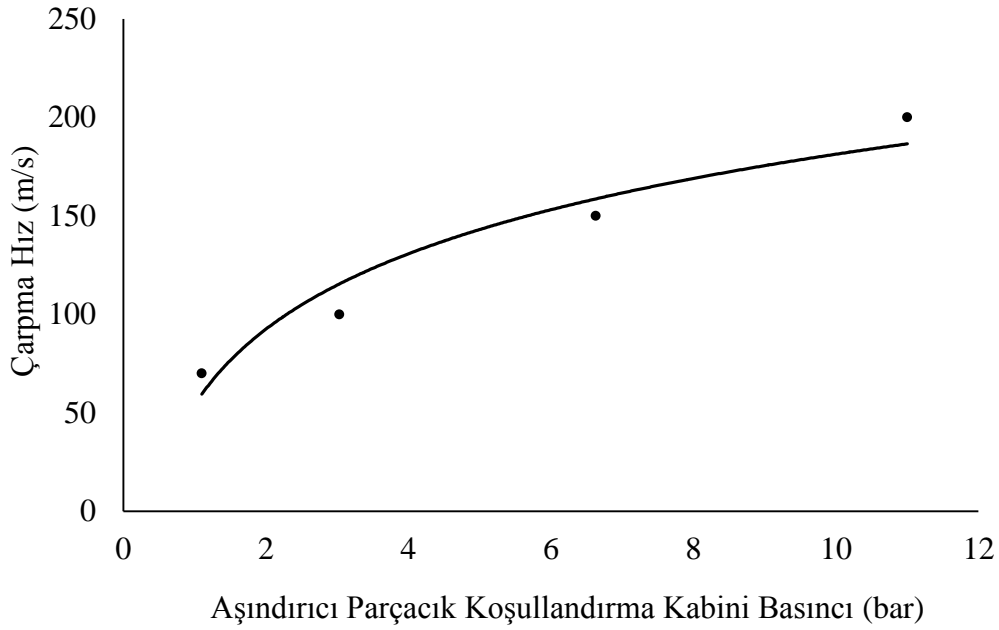


Şekil 37. Silika (SiC-220 grit) aşındırıcı parçacığının hız-basınç kalibrasyon grafiği

Şekil 38'de silika (SiC-60 grit) ve boyutu yaklaşık 240 μm olan aşındırıcı parçacığının hız-basınç kalibrasyon değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu parçacıklar sadece 3. aşamadaki polikarbonat numunelerin testlerinde kullanılmıştır. SiC-60 grit parçacık diğer aşındırıcı parçacıklara göre daha fazla test basıncı gösterip ve daha büyük boyuta sahip olmaktadır. Dolayısıyla bu parçacık diğer iki aşındırıcı parçacığa göre daha fazla aşınmaya sebep olmaktadır. Tablo 14'te bu parçacığının hız-basınç kalibrasyon değerleri verilmektedir.

Tablo 14. Silika (SiC-60 grit) aşındırıcı parçacığına ait basınç-hız değerleri

Basınç [mbar]	Aşındırıcı Parçacık Hızı [m/s]
1100	70
3030	100
6630	150
11000	200



Şekil 38. Silika (SiC-60 grit) aşındırıcı parçacığın hız-basınç kalibrasyon grafiği

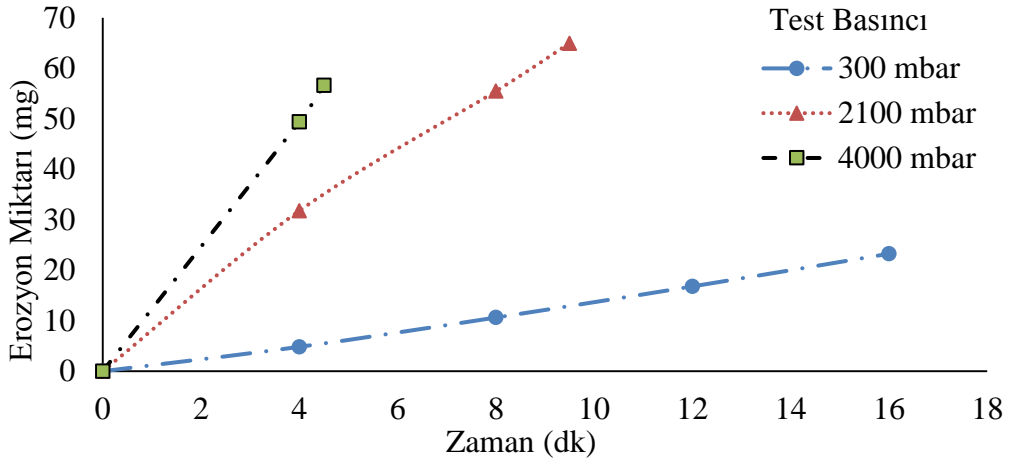
Testlerden önce aşınma davranışları incelenecek olan numunelerin ilk ağırlıkları hassas teraziyle ölçülmüştür. Her numune için toplam test süresi 16 dakika olacak şekilde ayarlanmıştır. Her dört dakika (4, 8, 12 ve 16) sonunda numunelerin ağırlıkları tekrar ölçülerek ağırlık kayıpları (numune yüzeyindeki erozyon aşınması miktarı) elde edilmiştir.

3.3. Erozyon Miktarının Zamana Göre Değişimi

3.3.1. Pleksiglas (Polymethylmethacrylate) Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi

Test edilen malzemelerin erozyon davranışlarının zamana göre değişimleri hem çarpma açısına ve hem de çarpma hızına göre ayrı ayrı grafiklerde verilmiştir. Tüm malzemeler için ayrı ayrı ikişer grafik sunulmuştur. İlk grafikler, farklı çarpma hızlarında meydana gelen erozyon miktarlarının zamana göre değişimi, ikinci grafikler ise farklı çarpma açılarındaki erozyon miktarlarının zamana göre değişimlerini göstermektedir.

Şekil 39’da ilk test numunesi olan pleksiglas malzemesinde 90°sabit çarpma açısında değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimi görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere pleksiglas malzemesinde en düşük kütleli erozyon miktarı 300 mbar (75 m/s) değerinde görülmekte olup doğrusal olarak artmaktadır. Bu malzeme 300 mbar basınç değerinde ilk 4 dakika sonunda 4.83 mg’lık bir kütleli erozyon miktarı meydana gelmektedir. Sırasıyla 8, 12, ve 16 dakika sonunda erozyon miktarları 10.63, 16.80, ve 23.26 mg olarak ölçülmüştür. 2100 mbar basınç değerindeki yapılan testlerde ise 4 ve 8 dakikalar sonunda sırasıyla 31.76, ve 55.46 mg olarak ölçülmüştür. Bu malzeme 2100 mbar basınçta 9.5 dakikanın sonunda 64.96 mg erozyon değerine ulaşmış delinmiştir. 2100 mbar basınç (150 m/s) değerinde, 4 ve 8 dakikanın arasında erozyon değişiminin eğimi çok hafif de olsa azalmaktadır. Bunun için iki neden söz konusu olabilir. Birinci sebep, aşındırıcı parçacıklar, numunenin gövdesini delip ilerlemektedir. Bu delikte yüksek hava-kum sirkülasyonu meydana geldiğinden aşınma işlemini yavaşlamaktadır. İkinci sebepse, lüle ile aşınma yüzeyi arasındaki mesafenin giderek artmasından kaynaklanmaktadır. Son olarak 4000 mbar basınç değerinde yapılan testlerde 4 dakika sonunda 49.40 mg erozyon miktarı elde edilmiştir. 4.5 dakika sonunda 56.63 mg erozyon miktarına ulaşıldıktan sonra malzeme delinmiştir. Bu malzeme için en yüksek erozyon miktarı 4000 mbar basınç (190 m/s) değerinde meydana gelmektedir. Pleksiglas test değerleri Tablo 15’te verilmiştir.



Şekil 39. Pleksiglas malzemesinde sabit çarpma açısında (90°) değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

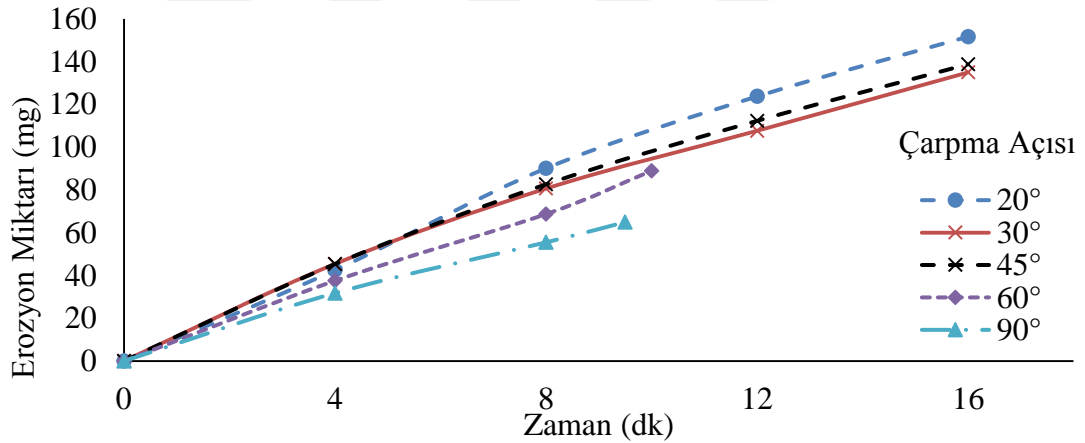
Tablo 15. Pleksiglas numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	300 mbar Erozyon Miktarı (mg)	2100 mbar Erozyon Miktarı (mg)	4000 mbar Erozyon Miktarı (mg)
4	4.8	31.7	49.4
8	10.6	55.4	56.6
12	16.8	64.96	t=4.5 dk'da delindi
16	23.2	t= 9.5 dk'da delindi	

Şekil 40'ta ise yine aynı malzemenin sabit 150 m/s (2100 mbar) hızda değişik çarpma açıları arasında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi görülmektedir. Şekil 40'tan görülebileceği gibi en düşük kütleli erozyon miktarı 90°'lik çarpma açısında elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4 dakika sonunda 31.76 mg'lık kütleli erozyon miktarı elde edilmiştir. Erozyon miktarı 8 ve 9.5 dakika sonunda sırasıyla 55.46 ve 64.96 mg olarak ölçülmüştür. Grafikte görüldüğü gibi bu açıda erozyon miktarı yavaş ilerlemektedir. Bunun sebebi ise pleksiglas malzemesi aşınmaya maruz kalırken malzemenin çarpma yüzeyinde bir delik meydana gelmektedir, bu deliğin içinde oluşan hava-kum sirkülasyonu erozyon miktarını yavaşlatmaktadır. Bu açı için malzeme 9.5 dakikanın sonunda delinmektedir. Malzemelerin arasında ikinci olarak en düşük erozyon miktarı 60°'lik çarpma açısında

meydana gelmektedir. Bu açı değerin için 4 dakika sonunda 37.58 mg erozyon değeri ölçülmüştür. Sırasıyla 8 ve 10 dakikalar sonunda 68.7 ve 88.93 mg değerinde erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu açıda pleksiglas malzemesi 10 dakikanın sonunda delinmektedir.

45°'de erozyon miktarı 4 dakika sonunda 45.37 mg olarak ölçülen erozyon miktarı diğer 8, 12 ve 16 dakikalarda doğrusal olarak artış göstererek sırasıyla 82.6, 123.3 ve 138.76 mg olarak ölçülmüştür. 30°'lik çarpma açısında yapılan testlerde ise yine aynı dakikalarda erozyon miktarları sırasıyla 45.4, 80.63, 107.64 ve 134.96 mg olarak ölçülmüştür. Bu malzeme için en yüksek kütleli erozyon miktarı 20° de yapılan testlerde meydana gelmektedir. Bu açı değerinde ilk 4 dakika sonunda 42.5 mg olarak ölçülen erozyon miktarları doğrusal olarak artarak sırasıyla 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 90.1, 123.7 ve 151.66 mg değerine ulaşmıştır. Bu malzemenin görüntüleri Şekil 49'da ve erozyon değerleri Tablo 16'da verilmiştir.



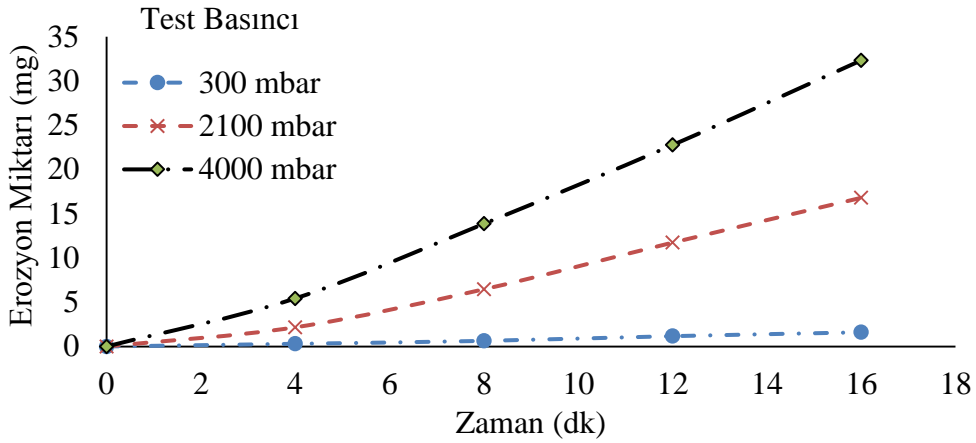
Şekil 40. Pleksiglas malzemesinde 2100 mbar basınç (150 m/s) değerinde değişik çarpma açılarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Tablo 16. Pleksiglas numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	20° Erozyon Miktarı (mg)	30° Erozyon Miktarı (mg)	45° Erozyon Miktarı (mg)	60° Erozyon Miktarı (mg)	90° Erozyon Miktarı (mg)
4	42.5	45.4	45.33	37.5	31.7
8	90.1	80.63	82.6	68.7	55.4
12	123.7	107.6	112.3	88.9	64.9
16	151.6	134.9	138.7	t=10 dk'da delindi	t=9.5 dk'da delindi

3.3.2. Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Zaman Göre Değişimi

Şekil 41'de test edilen malzemelerden ikincisi olan polikarbonat malzemesinde farklı çarpma hızlarındaki kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimi görülmektedir. Grafikten anlaşılacağı gibi bu malzemede en düşük erozyon miktarı 300 mbar basınç (75 m/s) görülmekte olup, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı doğrusal olarak artmaktadır. Ancak bu artış, test edilen tüm diğer malzemelere göre daha düşüktür. Bu malzemede 300 mbar basınç değerinde 4, 8, 12. ve 16. dakika sonunda sırasıyla 0.3, 0.63, 1.16 ve 1.6 mg değerlerinde erozyon miktarları ölçülmüştür. 2100 mbar basınç (150 m/s) değerindeki yapılan testlerde ise 4 dakika sonunda 2.16 mg erozyon miktarı görülmüş olup, bu değer 16. dakika sonunda 16.8 mg'a kadar doğrusal olarak artmıştır. Son olarak bu malzeme için en yüksek kütleli erozyon miktarı 4000 mbar basınç (190 m/s) değerinde ölçülmüştür. Bu basınçta yapılan testlerde ise 4 dakika sonunda erozyon miktarı 5.43 mg olarak ölçülmüştür. Sırasıyla 8, 12 ve 16. dakikalar sonunda erozyon miktarı 13.86, 22.76 ve 32.33 mg olarak elde edilmiştir. Polikarbonat numunede elde edilen erozyon miktarları Tablo 17'de verilmiştir.



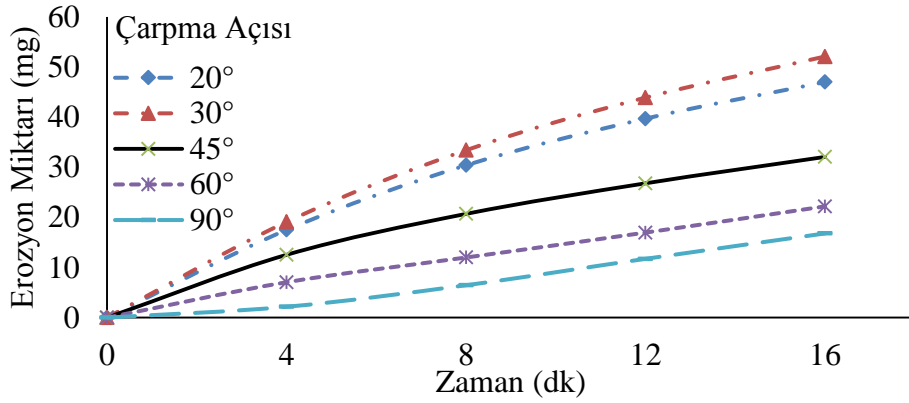
Şekil 41. Polikarbonat malzemesinde sabit çarpma açısında (90°) değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Tablo 17. Polikarbonat numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	300 mbar Erozyon Miktarı (mg)	2100 mbar Erozyon Miktarı (mg)	4000 mbar Erozyon Miktarı (mg)
4	0.3	2.1	5.4
8	0.6	6.4	13.8
12	1.1	11.7	22.7
16	1.6	16.8	32.3

Şekil 42’de ise aynı malzeme için değişik çarpma açılarındaki erozyon miktarının zamana göre değişimi görülmektedir. Grafikten görüldüğü üzere bu malzemede en düşük erozyon miktarı yine 90° ’lik çarpma açısında ölçülmüştür. Bu açı değerinde, ilk 4 dakika sonunda 2.16 mg’lık bir erozyon miktarı ölçülmüş olup; doğrusal olarak artarak ve 16. dakikanın sonunda 16.8 mg’lık bir erozyon değerine ulaşılmıştır. Bu malzeme için ikinci düşük erozyon miktarı 60° ’lik çarpma açısında meydana gelmektedir. Bu açı için erozyon miktarları 4, 8, 12, ve 16. dakikalarda sırasıyla 7.06, 12, 16.96 ve 22.20 mg olarak ölçülmüştür. 45° ’lik çarpma açısında yapılan testlerde 4 dakika sonunda 12.53 mg ölçülen erozyon miktarının her dört dakika sonunda doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiş ve 16 dakika sonunda erozyon miktarı 32.06 mg değerine ulaşmıştır. Polikarbonat malzemesinde

en yüksek ikinci erozyon miktarı değeri 20°'lik çarpma açısındaki meydana gelmiş olup bu açı değerinde ilk 4 dakika sonunda 17.50 mg kütleli erozyon miktarı olarak ölçülmüştür. Bu kütleli erozyon miktarı doğrusal artarak 16 dakika sonunda 47 mg değerine ulaşmıştır. Son olarak polikarbonat malzemesi için en yüksek erozyon miktarları 30° değerinde ölçülmüştür. Bu açıdaki erozyon miktarlarını incelediğimizde 4, 8, 12 ve 16. dakikalar sonunda sırasıyla 19.10, 33.4, 43.9 ve 52.10 mg'lık erozyon değerleri ölçülmüştür. Bu malzeme için bütün çarpma açılarında, erozyon miktarları doğrusal olarak artmaktadır. Polikarbonat numunelerin görüntüleri Şekil 49'de ve test değerleri Tablo 18'de verilmiştir.



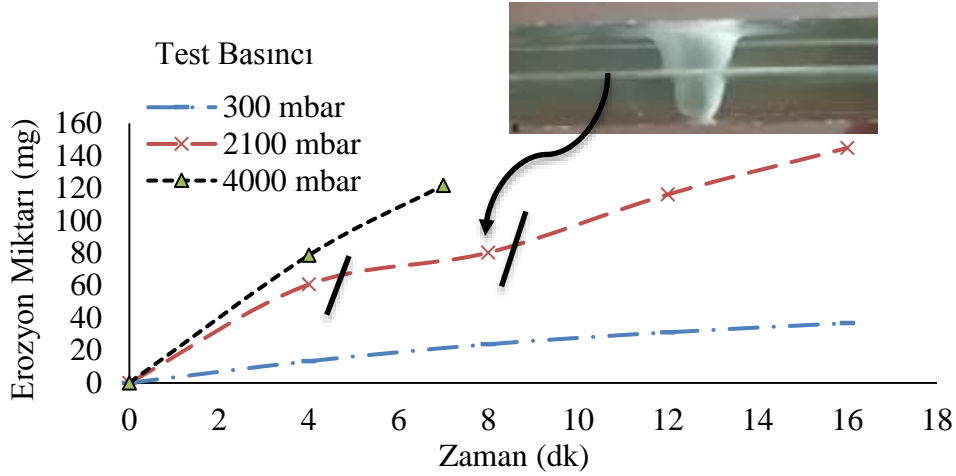
Şekil 42. Polikarbonat malzemesinde 2100 mbar basınç (150 m/s) değerinde değişik çarpma açılarındaki oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Tablo 18. Polikarbonat numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	20° Erozyon Miktarı (mg)	30° Erozyon Miktarı (mg)	45° Erozyon Miktarı (mg)	60° Erozyon Miktarı (mg)	90° Erozyon Miktarı (mg)
4	17.5	19.1	12.5	7.0	2.1
8	30.4	33.4	20.7	12	6.4
12	39.7	43.9	26.8	16.9	11.7
16	47	52.1	32.0	22.2	16.8

3.3.3. Renksiz Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi

Şekil 43'te renksiz lamine cam malzemesinde farklı çarpma hızlarındaki erozyon miktarlarının zamana göre değişimi görülmektedir. Lamine cam üzerinde yapılan testlerde en düşük erozyon miktarı 300 mbar basınç (75 m/s) değerinde elde edilmiştir. Bu basınçta ilk 4 dakika sonunda 13 mg'lık bir erozyon miktarı elde edilmiştir. 8, 12 ve 16 dakika sonunda erozyon değerleri sırasıyla 23.36, 31.10 ve 36.76 mg olarak ölçülmüştür. Bu basınçta erozyon miktarının artış eğimi diğer basınçlar göre düşük olarak gerçekleşmiştir. Artmaktadır. 2100 mbar basınçta yapılan benzer testlerde ise 4 dakika sonunda 60.6 mg'lık bir erozyon değeri ölçülmüştür. Bu testde dördüncü ve sekizinci dakika arasında erozyon miktarında bir yavaşlama görülmüştür. Bu durum, lamine camın arasında bulunan Polivinil Butiral (PVB) malzemedeki kaynaqlanmaktadır. Aşındırıcı parçacık lüle vasıtasıyla malzemenin yüzeyine kum-hava karışımı olarak püskürtülmektedir. Bu işlem sekizinci dakika sonuna doğru lamine camın ortasında bulunan PVB katmanına ulaşmaktadır. PVB ara katmanı aşınma miktarını belli bir süre yavaşlatmaktadır. Bu basınçta erozyon miktarı 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 80.26, 116.0 ve 144.7 mg olarak ölçülmüş olup sekizinci dakikadan sonra doğrusal olarak artış gözlemlenmiştir. Bu malzemede en yüksek erozyon miktarı 4000 mbar (190 m/s) değerinde meydana gelmektedir. Bu basınçta 4 dakika sonunda erozyon miktarı 78.60 mg olarak elde edilmiştir. Bu testte de lamine cam 7 dakika sonunda 121.7 mg erozyon değerine ulaşmış malzeme delinmiştir. Renksiz lamine cam test sonuçları Tablo 19'de verilmiştir.



Şekil 43. Renksiz lamine cam için sabit çarpma açısında (90°) değişik çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

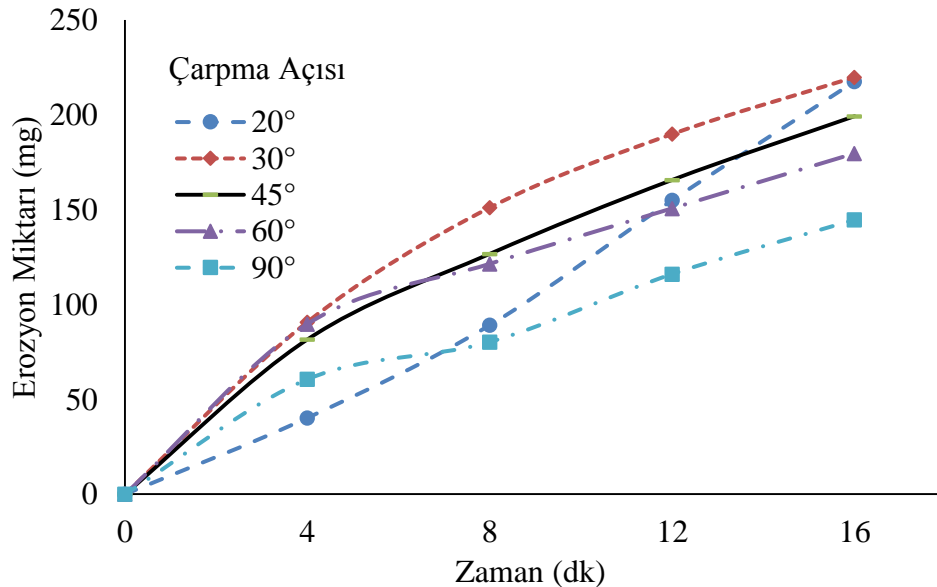
Tablo 19. Renksiz lamine cam sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	300 mbar Erozyon Miktarı (mg)	2100 mbar Erozyon Miktarı (mg)	4000 mbar Erozyon Miktarı (mg)
4	13.3	60.6	78.6
8	23.7	80.2	121.7 t= 7 dk'da delindi
12	31.1	116.0	
16	36.7	144.7	

Şekil 44'te renksiz lamine cam malzemesinde değişik çarpma açılarındaki oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi görülmektedir. Bu malzemede yapılan testlerde diğer iki numuneden farklı bir erozyon değerleri ve grafiği gözlemlenmiştir. 90° 'lik çarpma açısında ilk 4 dakika sonunda 60.6 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu açıda dördüncü ve sekizinci dakika arasında erozyon değerlerinde bir yavaşlama görülmüştür. Bu düşüşün sebebi ise lamine katmanlı camın arasında bulunan polivinil bütirla (PVB) malzemesi erozyon aşınmasının ilerlemesini engellemesidir. Bu malzeme için 8 dakika başında PVB malzemesi katmanı aşılıp aşınma doğrusal bir şekilde artmaktadır. Erozyon değerleri ise 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 80.26, 116.06 ve 144.73 mg olarak ölçülmüştür. 20° 'lik çarpma açısında ise ilk 4 dakikada diğer çarpma açılarına göre en düşük erozyon miktarı

olarak gözlemlenmiş olup değeri ise 40.26 mg olarak ölçülmüştür. Bu çarpma açısında dördüncü dakikadan 16. dakikaya kadar erozyon miktarında doğrusal artış görülmektedir. 16 dakika sonunda sırasıyla 217.6 mg erozyon miktarı elde edilmiştir. 45°'lik çarpma açısında ise 4 dakika sonunda erozyon miktarı 81.6 mg olarak ölçülmüştür. Bu çarpma açısında erozyon miktarı her dört dakikada bir artarak 16 dakika sonunda 199.33 mg değerine ulaşmıştır. Bu çarpma açısında erozyon katmanlı camın ortasında bulunan PVB malzemesi üzerinde ilerlemektedir. 60°'lik çarpma açısında ilk 4. dakika sonunda diğer üç çarpma açısına (90, 45, ve 20°) göre daha fazla bir erozyon miktarı gözlemlenmiştir. Bu açı için 16 dakika sonunda erozyon miktarı 179.73 mg olarak ölçülmüştür. Bu çarpma açısı için 4. ve 8. dakika arasında lamine katmanlı camda bulunan PVB malzemesinin delinmesi gerçekleşmiştir. Bu andan itibaren aşınma hem üst hem de alt tabakada iki kanal oluşturacak şekilde ilerlemiştir.

Bu malzeme için en yüksek erozyon miktarı 30° çarpma açısında ölçülmüştür. Bu açı değerinde 4, 8, 12 ve 16 dakikalar sonundaki erozyon miktarları 90.8, 151.13, 189.9 ve 219.90 mg olarak ölçülmüştür. Renksiz lamine cam numunesinin erozyon değerleri Tablo 20'de ve numune görüntüleri Şekil 49'de verilmiştir.



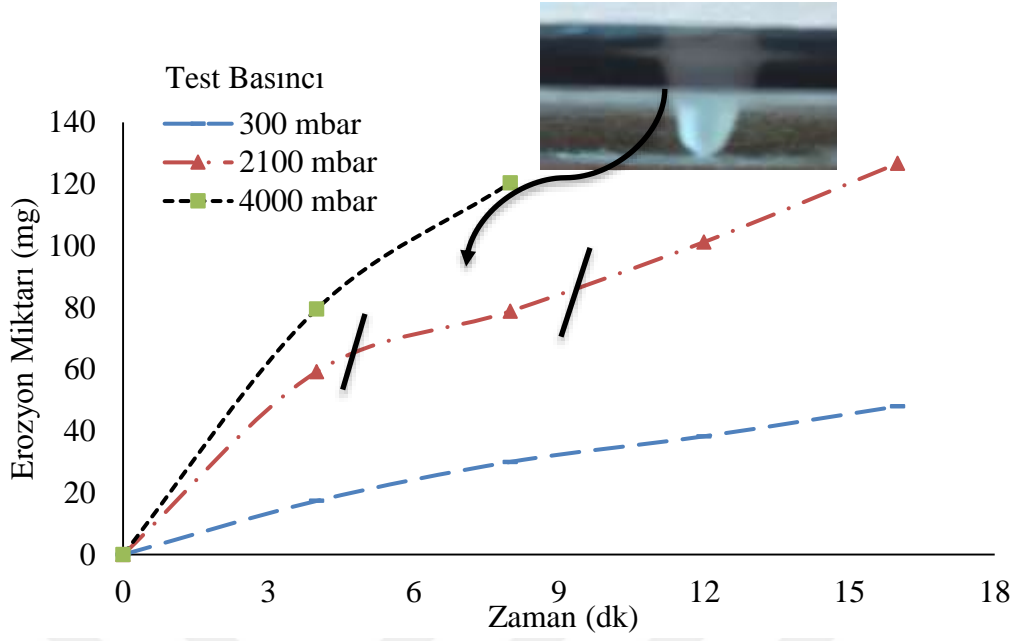
Şekil 44. Renksiz lamine cam malzemesinde 2100 mbar basınçta (150 m/s) değişik çarpma açılarında meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Tablo 20. Renksiz lamine cam numunenin sabit hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	20° Erozyon Miktarı (mg)	30° Erozyon Miktarı (mg)	45° Erozyon Miktarı (mg)	60° Erozyon Miktarı (mg)	90° Erozyon Miktarı (mg)
4	40.2	90.8	81.6	89.7	60.6
8	89.1	151.1	126.7	121.5	80.2
12	155	189.9	165.7	150.7	116.0
16	217.6	219.9	199.3	179.7	144.7

3.3.4. Siyah Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi

Şekil 45'te siyah Lamine cam malzemesi değişik çarpma hızlarındaki erozyon miktarlarının zamana göre değişimi görülmektedir. Bu malzeme için yapılan testlerde en düşük erozyon miktarı 300 mbar basınç (75 m/s) değerinde meydana gelmektedir. Bu basınç için 4, 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 17.40, 30.04, 38.34 ve 48.04 mg olarak erozyon miktarı elde edip aşınma eğrisi doğrusal olarak artmaktadır. 2100'lik çarpma basınç için dördüncü ve sekizinci dakika arasında bir yavaşlama gözlemlenmektedir. Bunun sebebi siyah Lamine katmanlı bulunan Polivinil Butiral (PVB) malzemesinden kaynaklanmaktadır. PVB malzemesi Lamine camlarda erozyon aşınma prosesinin ilerlemesini belli bir süre engellemektedir. Bu basınç için değerler 4. dakika sonunda 59.23 mg olarak ölçülmüştür. Bu basınç için 8, 12 ve 16. dakikalar sonunda sırasıyla 78.89, 101.27 ve 126.72 mg olarak ölçülüp erozyon miktarı doğrusal olarak artmaktadır. Son olarak bu malzeme için en yüksek erozyon miktarı 4000 mbar basınçta meydana gelmektedir. Bu basınçta yapılan testlerde 4 dakika sonunda 79.53 mg'lık bir erozyon miktarı elde edilmektedir. Bu basınçta malzeme 7 dakika sonunda 120.46 mg erozyon miktarına ulaşıncaya numune delinmektedir. Siyah lamine cam test sonuçları Tablo 21'de verilmiştir.



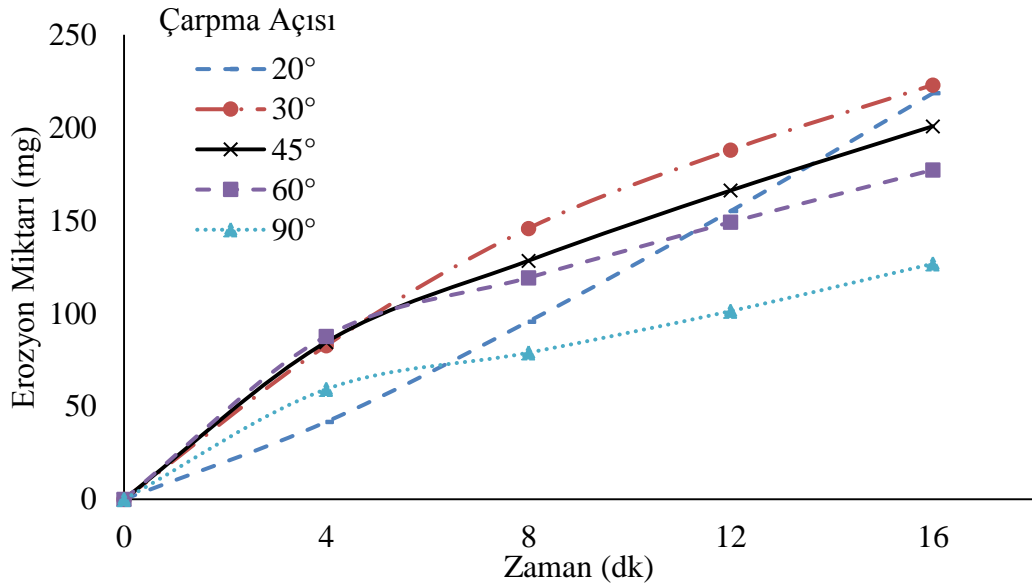
Şekil 45. Siyah renkli lamine cam için sabit çarpma açısında (90°) değişik çarpma hızlarında oluşan erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Tablo 21. Siyah lamine cam sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	300 mbar Erozyon Miktarı (mg)	2100 mbar Erozyon Miktarı (mg)	4000 mbar Erozyon Miktarı (mg)
4	17.4	59.2	79.5
8	30.0	78.8	120.4 t=7 dk'da delindi
12	38.3	101.2	
16	48.0	126.77	

Şekil 46'da siyah lamine cam malzemesinde değişik çarpma açılarında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi görülmektedir. Bu malzemedeki yapılan testlerde de diğer lamine camda olduğu gibi düşük erozyon miktarı 90° 'lik çarpma açısında ölçülmektedir. Bu açı değerinde ilk 4 dakika sonunda 59.27 mg erozyon miktarı elde edilip bu değer 20° 'lik çarpma açısında ilk dört dakika erozyon miktarına göre daha fazla olarak ölçülmüştür. Siyah Lamine cam için de diğer lamine cam da olduğu gibi dördüncü ve sekizinci dakika arasında bir erozyon düşüşü gözlemlenmektedir. Bunun sebebi ise siyah lamine katmanlı camın

arasında bulunan PVB malzemenin kaynaklanmaktadır. PVB malzemesi belli bir miktar erozyonun gelişmesine önlenmektedir. Bu çarpma açısı için 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 78.87, 101.27 ve 126.77 mg olarak erozyon miktarı elde edilip doğrusal olarak artmaktadır. 20°'lik çarpma açısı da diğer lamine cam gibi bir yolu izlemektedir. Bu açı için ilk 4 dakika sonunda 41.66 mg olarak erozyon miktarı elde edilip diğer çarpma açısına göre en düşük olarak gözlemlenmektedir. Sırasıyla bu açı için 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 95.7, 155.16 ve 218.56 mg erozyon miktarı doğrusal olarak çok hızlı bir artış gösterilmektedir. 60°'lik çarpma açısında yapılan testlerde ise 4 dakika sonunda 87.76 mg ölçülen erozyon miktarının her dört dakika sonunda doğrusal olarak artmış ve 16 dakika sonunda erozyon miktarı 177.3 mg değere ulaşmıştır. 45°'lik çarpma açısında yapılan testlerinde ikinci en yüksek erozyon miktarı elde edilip ilk 4 dakika sonunda 84.03 mg erozyon miktarı ölçülüp doğrusal olarak artış görülmektedir. Bu çarpma açısı için 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 128.4, 160.2 ve 200.8 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. Son olarak bu malzeme için diğer renksiz lamine cam da olduğu gibi en yüksek erozyon miktarı 30°'de meydana gelmektedir. Erozyon miktarları ise 4, 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 82.73, 144.8, 188 ve 223.03 mg olarak ölçülmüştür.. Bu malzemenin görüntülerini Şekil 49'da verilmiştir. Siyah lamine cam numunelerinin test sonuçları Tablo 22'de ve görüntüleri Şekil 49'da verilmiştir.



Şekil 46. Siyah renkli lamine cam numunede 2100 mbar basınç (150 m/s) değerinde değişik çarpma açılarındaki oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Tablo 22. Siyah lamine cam sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri

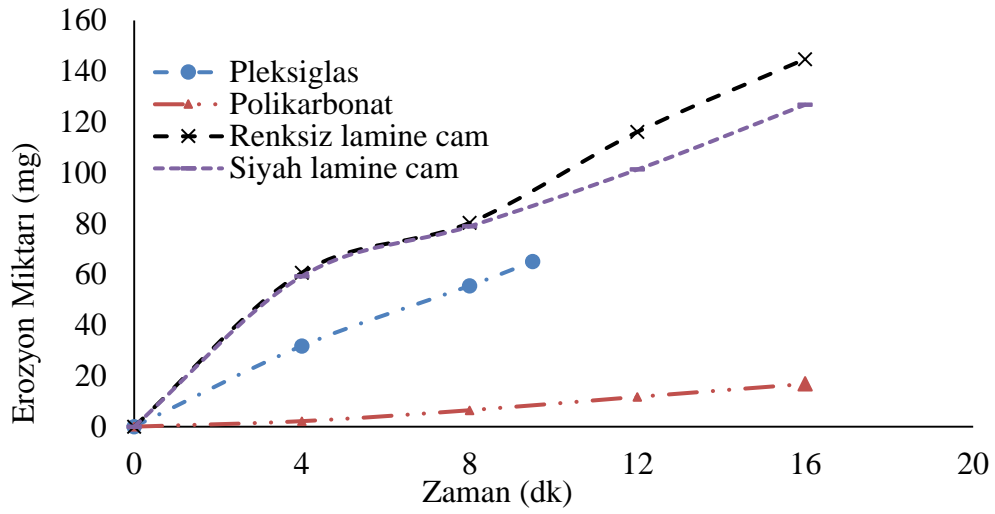
Test Süresi (dk)	20° Erozyon Miktarı (mg)	30° Erozyon Miktarı (mg)	45° Erozyon Miktarı (mg)	60° Erozyon Miktarı (mg)	90° Erozyon Miktarı (mg)
4	41.6	82.7	84.6	87.76	59.2
8	95.7	145.8	128.4	119.2	78.8
12	155.1	188	166.2	149.13	101.2
16	218.5	223.0	200.8	177.3	126.7

3.3.5. Tüm Malzemelerin Erozyonunun Zamana Göre Değişiminin Karşılaştırılması

Şekil 47’de tüm malzemelerin sabit çarpma açısı (90°) ve sabit çarpma hızında 150 m/s (2100 mbar) kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişiminin karşılaştırılması gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde kütleli erozyon miktarları bakımından en kötü erozyon davranışı Lamine cam malzemelerde görülmektedir. Bu malzemelerde dördüncü ve sekizinci dakika arasında erozyon miktarlarında yavaşlama görülmektedir. Bunun sebebi ise Lamine camda bulunan Polivinil Butiral (PVB) malzemesidir. Bu katman malzemesi lamine camlarda erozyon aşınmasının ilerlemesini engellemektedir. Bu malzemeler arasında en yüksek erozyon miktarı Lamine cam malzemesinde gözlemlenmektedir. Erozyon miktarı ise 4, 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 60.66, 80.96, 116.06 ve 144.73 mg erozyon değeri olarak ölçülmüştür. İkinci en yüksek erozyon miktarı da siyah lamine cam malzemesinde ölçülmüştür. Bu malzeme için 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 59.23, 78.87, 101.27 ve 126.77 mg erozyon miktarı elde edilip doğrusal olarak artmaktadır.

Pleksiglas malzemesindeki kütleli erozyon miktarı lamine camlara göre daha iyi bir erozyon direnci sergilemektedir. Bu malzemede 4 dakika sonunda 37.96 mg erozyon miktarı olarak ölçülmüştür. Bu malzemede yapılan testlerde 9.5. dakika sonunda 64.96 mg erozyon miktarına varınca numune delinmektedir.

Son olarak malzemelerin arasında en iyi erozyon davranışı sergileyen polikarbonat malzemesidir. Bu malzemede 90° çarpma açısında ve 2100 mbar basınç (150 m/s) değerinde yapılan testlerde en düşük erozyon değerleri elde edilmiştir. Polikarbonat malzemesi için 4, 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 2.16, 6.46, 11.73 ve 16.8 mg erozyon miktarları elde edilip doğrusal olarak artmaktadır. Bu miktarlar diğer malzemelere göre oldukça düşüktür ve en yüksek erozyon miktarını sahip malzemeden yaklaşık 9 kat daha az bir erozyon değeri sergilemektedir. Test sonuçları Tablo 23’de verilmiştir.

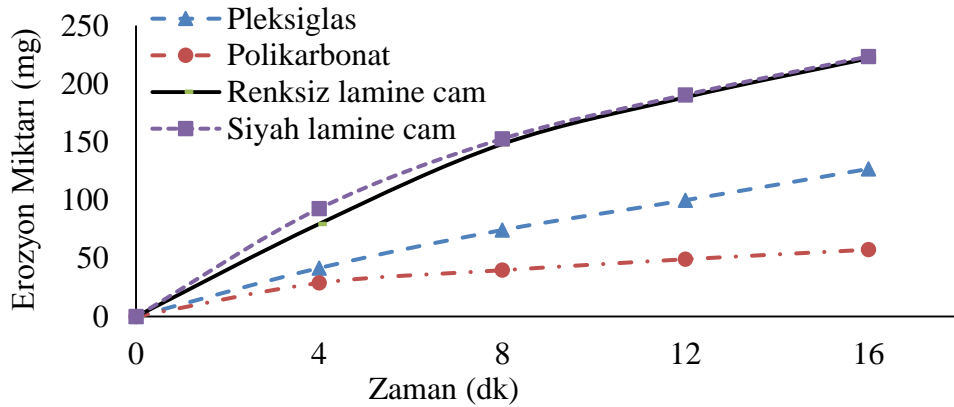


Şekil 47. 90° sabit çarpma açısında tüm malzemelerde 2100 mbar (150 m/s) sabit basınçta oluşan kütle erozyon miktarlarının zamana göre değişiminin karşılaştırılması

Tablo 23. Tüm malzemelerin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	Pleksiglas Erozyon Miktarı (mg)	Polikarbonat Erozyon Miktarı (mg)	Renksiz Lamine Cam Erozyon Miktarı (mg)	Siyah Lamine Cam Erozyon Miktarı (mg)
4	31.7	2.1	60.6	59.2
8	55.4	6.4	80.2	78.8
12	64.9	11.7	116.0	101.2
16	t=9.5 dk'da delindi	16.8	144.7	126.7

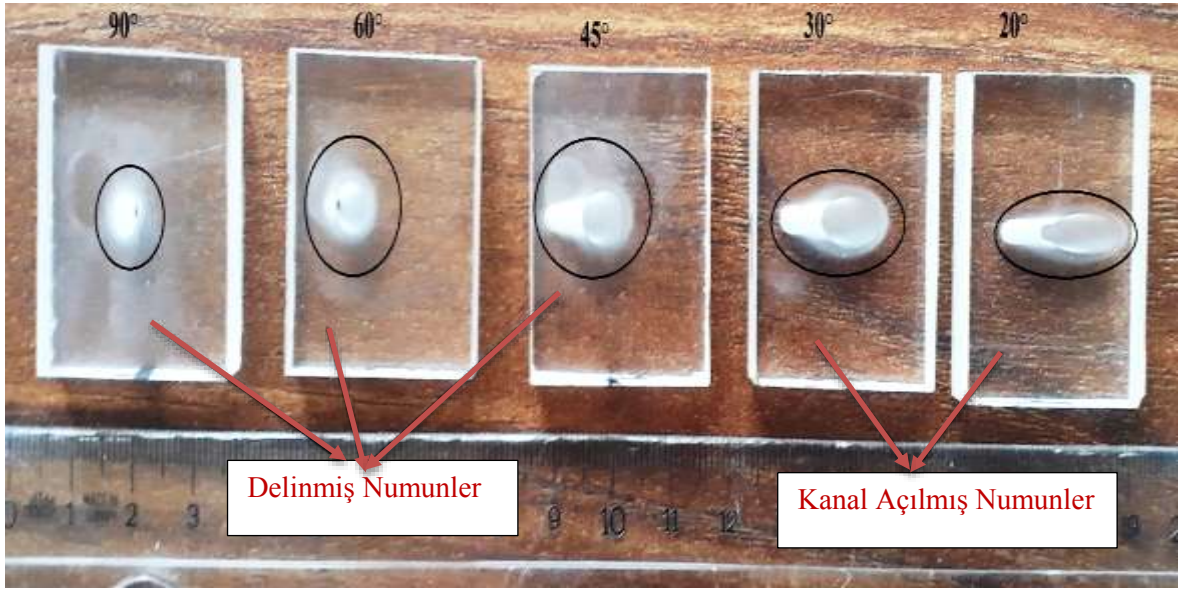
Şekil 48’de tüm malzemelerin sabit çarpma açısı 30° ve sabit çarpma hızında 150 m/s (2100 mbar) kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi karşılaştırılmaktadır. Grafikte görüldüğü üzere en kötü erozyon davranışlarını Lamine camlar sergilemektedir. Bu malzemelerde Polivinil Butiral (PVB) malzemesi bulunduğu için belli bir süre erozyon aşınmanın ilerlemesini engellemektedir. Bu iki lamine cam malzemesinde erozyon davranışları birbirine çok yakın olarak ölçülmüştür. Siyah lamine cam malzemesi için 4, 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 92.76, 152.56, 190.43 ve 223.33 mg erozyon değerleri olarak ölçülmüştür. Renksiz lamine cam malzemesi ise 4, 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 79.56, 148.1, 188.3 ve 221.16 mg erozyon miktarları olarak ölçülmüştür. Pleksiglas malzemesi ise lamine camlara göre daha iyi erozyon davranışı sergilemektedir. Bu malzemedeki yapılan testler sonucunda 4, 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 41.66, 74.26, 99.93 ve 126.81 mg erozyon miktarları olarak ölçülmüş olup zamana göre artış göstermektedir. Son olarak testi yapılan malzemelerde en iyi erozyon davranışı sergileyen polikarbonat malzemesidir. Polikarbonat malzemesi, lamine camlara göre yaklaşık dört kat daha iyi erozyon direnci sergilemektedir. Bu malzeme için 4 dakika sonunda 28.8 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu malzeme için 8, 12, ve 16 dakikalar sonunda sırasıyla 39.8, 49.2 ve 57.4 mg erozyon miktarı olarak elde edilmektedir. Test sonuçları Tablo 24’de verilmiştir.



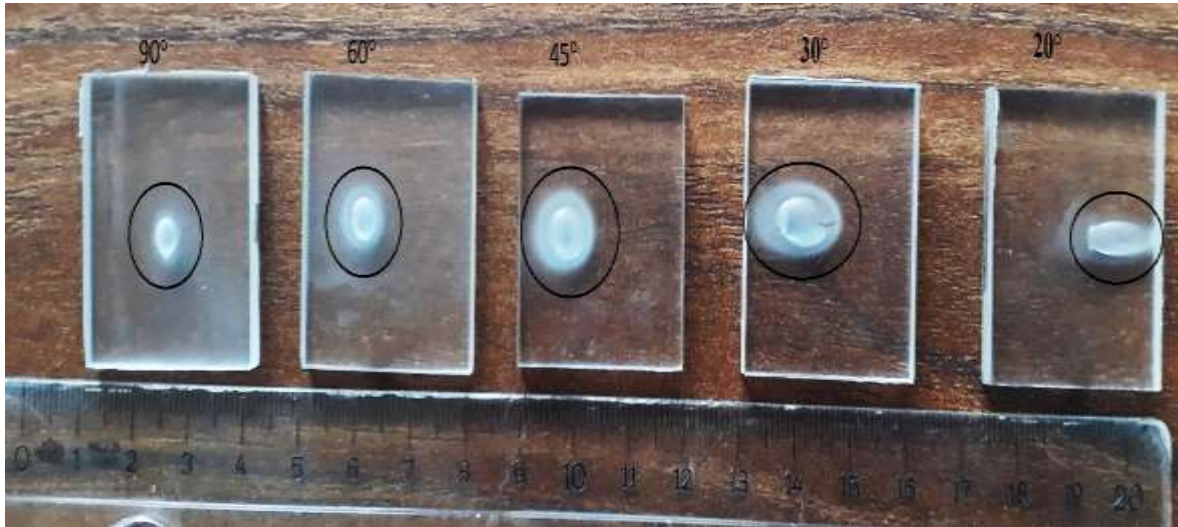
Şekil 48. 30° sabit çarpma açısında tüm için 2100 mbar (150 m/s) sabit basınçta oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişiminin karşılaştırılması

Tablo 24. Tüm malzemelerin 30° çarpma açısındaki erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	Pleksiglas Erozyon Miktarı(mg)	Polikarbonat Erozyon Miktarı (mg)	Renksiz Lamine Cam Erozyon Miktarı (mg)	Siyah Lamine Cam Erozyon Miktarı (mg)
4	41.6	28.8	79.5	92.7
8	74.2	39.8	148.1	152.5
12	99.9	49.2	188.3	190.4
16	126.8	57.4	221.6	223.3



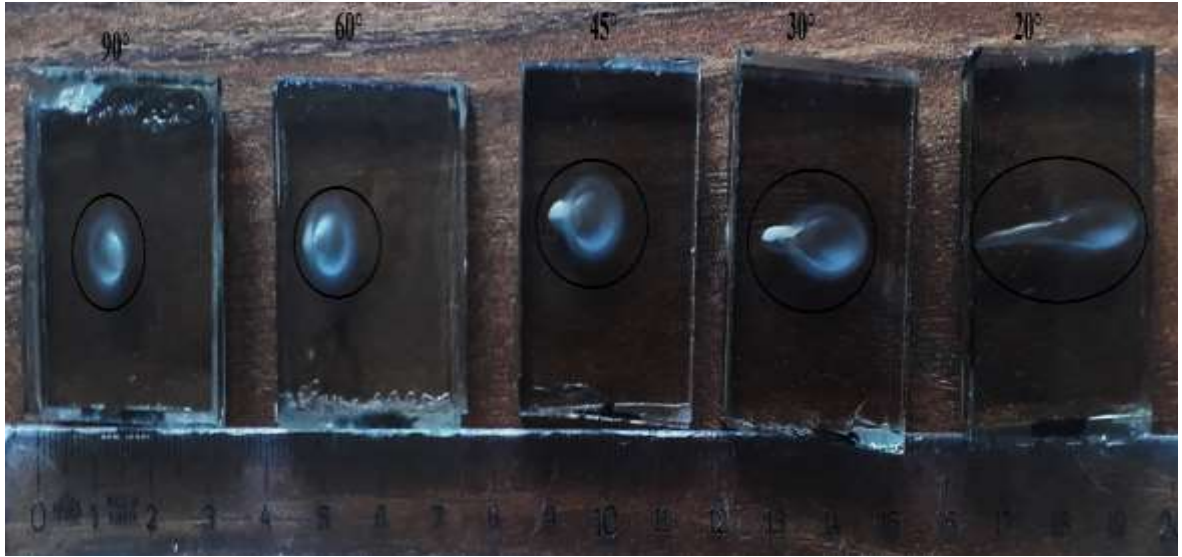
(a)



(b)



(c)



(d)

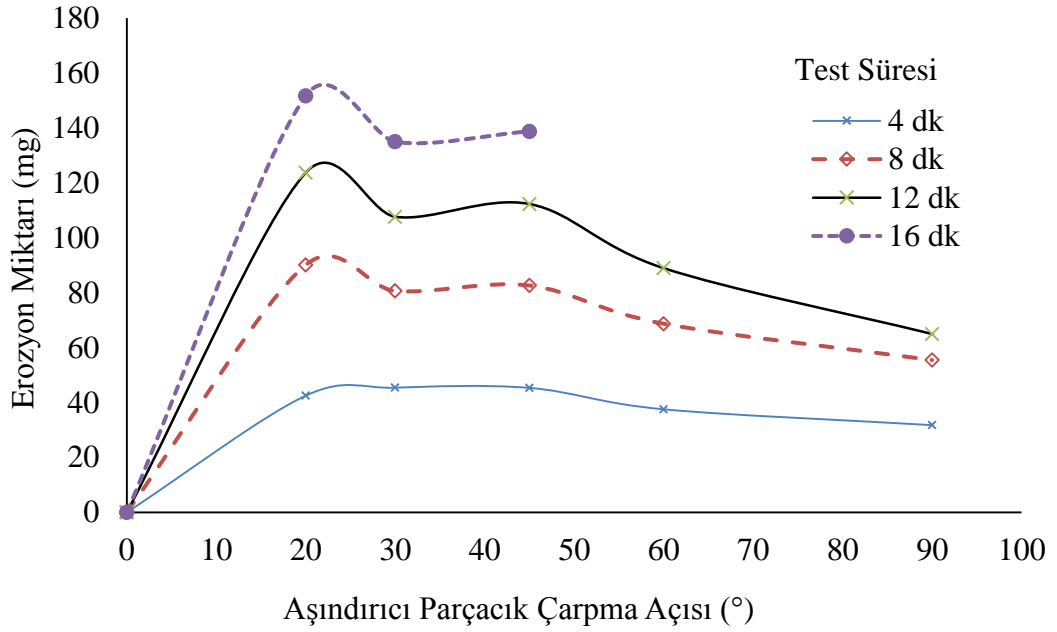
Şekil 49. Test edilen tüm numunelerin sabit aşındırıcı parçacık hızı 150 m/s ve farklı çarpma açısının görüntüleri; a) pleksiglas, b) polikarbonat, c) renksiz lamine cam, d) siyah lamine cam

3.4. Çarpma Açısına Göre Erozyon Miktarının Değişimi

3.4.1. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Pleksiglas (Polymethylmethacrylate) Malzemenin Erozyonununun Değişimi

Bu bölümde malzemelerin erozyon davranışlarının çarpma açısına göre etkisini incelemek üzere yapılan testlerin bulguları grafiksel olarak sunulmuştur. Tüm malzemeler için test sonuçları ayrı ayrı grafiksel olarak verilmiştir. Bu grafiklerin bitiminde tüm malzemeler için 16 dakika sonunda meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimleri karşılaştırılmıştır. Son olarak tüm malzemelerin 16. dakika sonunda meydana gelen hacimle erozyon miktarları tek grafikte verilip birbiriyle karşılaştırılmıştır. Malzemenin hacimsel erozyon miktarı, malzemede oluşan erozyon değerinin o malzemenin yoğunluğuna bölünmesi ile elde edilmektedir.

Şekil 50’de pleksiglas malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi gösterilmektedir. Grafikte her dört dakika sonunda çeşitli çarpma açılarında meydana gelen kütleli erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Bu malzeme için zaman artınca kütleli erozyon miktarı da artmaktadır. Grafikte 12 dakikadaki kütleli erozyon miktarları incelendiğinde: En düşük erozyon miktarı 90°’lik çarpma açısında oluşmaktadır. Bu çarpma açısında erozyon değeri ise 64.96 mg olarak ölçülmüştür. Çarpma açısı 60°’ye düştüğünde erozyon miktarı artarak 89.93 mg miktarına ulaşmaktadır. 45°’deki çarpma açısında yapılan testlerde kütleli erozyon miktarı 112.3 mg değerine yükselmiştir. 30°’ye düştüğünde kütleli erozyon miktarında hafif bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu çarpma açısı için erozyon miktarı ise 107.64 mg olarak ölçülmüştür. Son olarak maksimum kütleli erozyon miktarı 20°’lik çarpma açısında meydana gelmektedir. Bu çarpma açısında kütleli erozyon miktarı 123.7 mg değere çıkmıştır. Test sonuç değerleri Tablo 24’te verilmiştir.



Şekil 50. Pleksiglas malzemesinde 2100 mbar (150 m/s) test basıncına meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

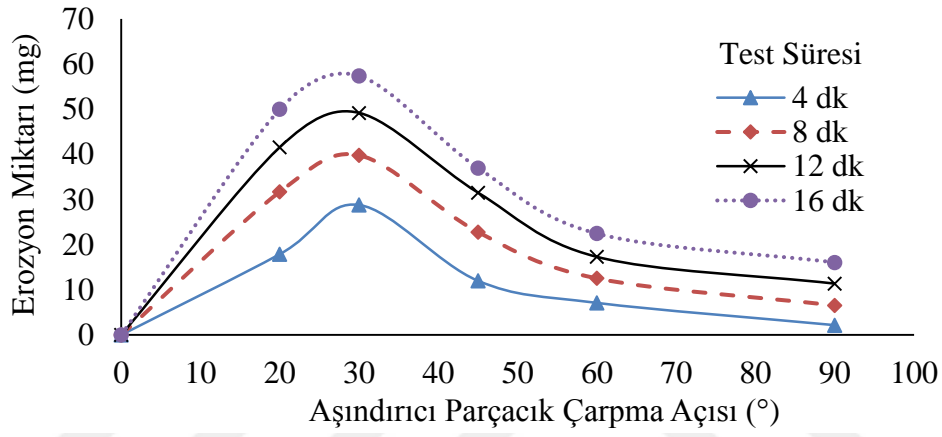
Tablo 25. Pleksiglas numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri

Test Süresi (mg)	20° Erozyon Miktarı (mg)	30° Erozyon Miktarı (mg)	45° Erozyon Miktarı (mg)	60° Erozyon Miktarı (mg)	90° Erozyon Miktarı (mg)
4	42.5	45.4	45.3	37.5	31.7
8	90.1	80.6	82.6	68.7	55.4
12	123.7	107.6	112.3	88.9 t=10 dk'da delindi	64.9 t=9,5 dk'da delindi
16	151.6	134.9	138.7		

3.4.2. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Değişimi

Şekil 51'de polikarbonat malzemede meydana gelen erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Grafikte her dört dakika sonunda çeşitli çarpma açılarında (20, 30, 45, 60 ve 90°) meydana gelen kütleli erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Polikarbonat malzemesi için test süresi artınca kütleli erozyon miktarı da artmaktadır. Grafikte 12 dakikadaki kütleli erozyon miktarı incelendiğinde; düşük kütleli erozyon miktarı 90°deki çarpma açısında yapılan testlerde meydana gelmektedir. Bu çarpma açısındaki erozyon miktarı 6.53 mg olarak ölçülmüştür. 60°deki

çarpma açısında yapılan testlerde erozyon miktarı 12.53 mg değere çıkmıştır. Çarpma açısı 45°'ye düştüğünde erozyon miktarı 22.8 mg değerine yükselmiştir. 30°'deki çarpma açısında yapılan testlerde kütleli erozyon miktarı en yüksek değeri gözlemlenmektedir. Bu açı için kütleli erozyon değeri ise 39.8 mg olarak ölçülmüştür. Bu çarpma açısının en düşük erozyon miktarına sahip olan 90°lik çarpma açısına göre 6 kat fazla olarak elde edilmiştir. Son olarak çarpma açısı 20°'ye düştüğünde kütleli erozyon miktarı hafif düşerek 31.7 mg değere inmiştir. Test sonuç değerleri Tablo 26'de verilmiştir.



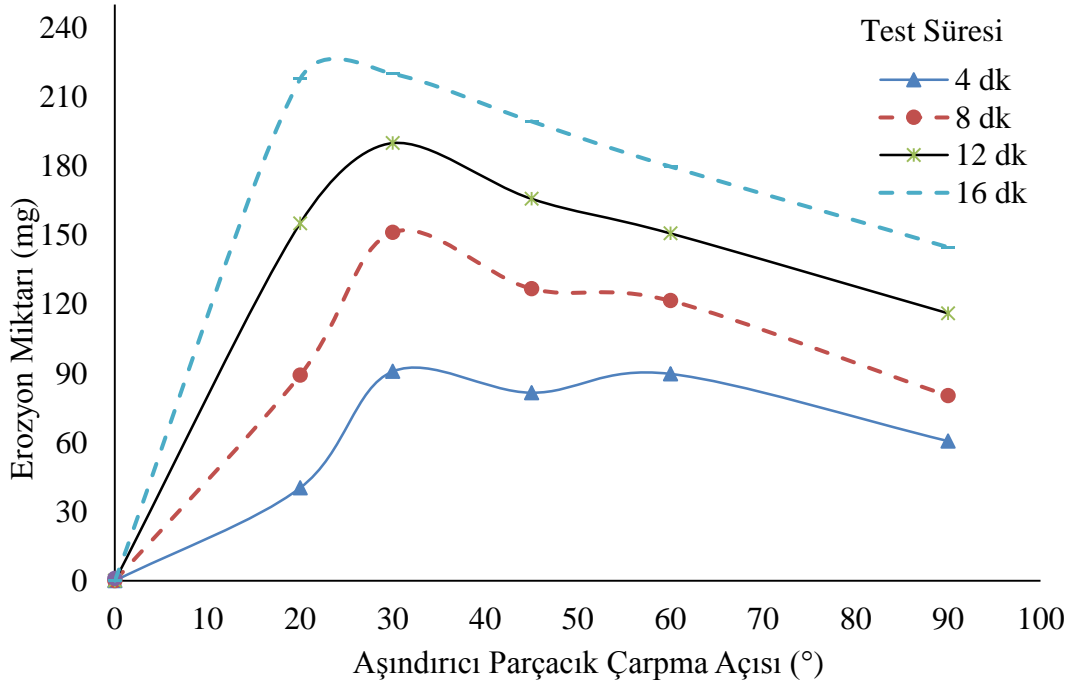
Şekil 51. Polikarbonat malzemesinde 2100 mbar (150 m/s) test basıncında elde edilen kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

Tablo 26. Polikarbonat numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	20° Erozyon Miktarı (mg)	30° Erozyon Miktarı (mg)	45° Erozyon Miktarı (mg)	60° Erozyon Miktarı (mg)	90° Erozyon Miktarı (mg)
4	17.9	28.8	12	7.1	2.1
8	31.7	39.8	22.8	12.5	6.5
12	41.6	49.2	31.5	17.3	11.3
16	50	57.4	37	22.4	16.0

3.4.3. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Renksiz Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Değişimi

Şekil 52’de renksiz lamine cam malzemesinde meydana gelen kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi gösterilmektedir. Grafikte her dört dakika sonunda farklı çarpma açılarında oluşan erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikte 12 dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 90°’deki çarpma açısında yapılan testlerde ölçülmüştür. Bu çarpma açısındaki erozyon miktarı 116.06 mg olarak hesaplanmıştır. 60°’deki çarpma açısında erozyon miktarı artarak 150.57 mg miktara çıkmıştır. Çarpma açısı 45°’ye düştüğünde erozyon miktarı 165.73 mg olarak ölçülmüştür. Bu malzeme için en yüksek erozyon miktarı 30° çarpma açısında meydana gelmiştir. Bu çarpma açısının erozyon miktarı ise 189.9 mg olarak ölçülmüştür. Son olarak çarpma açısı 20°’ye düştüğünde erozyon miktarı düşerek 155 mg değere inmiştir. Test değerleri Tablo 27’de ve test görüntüleri Şekil 62’de verilmiştir.



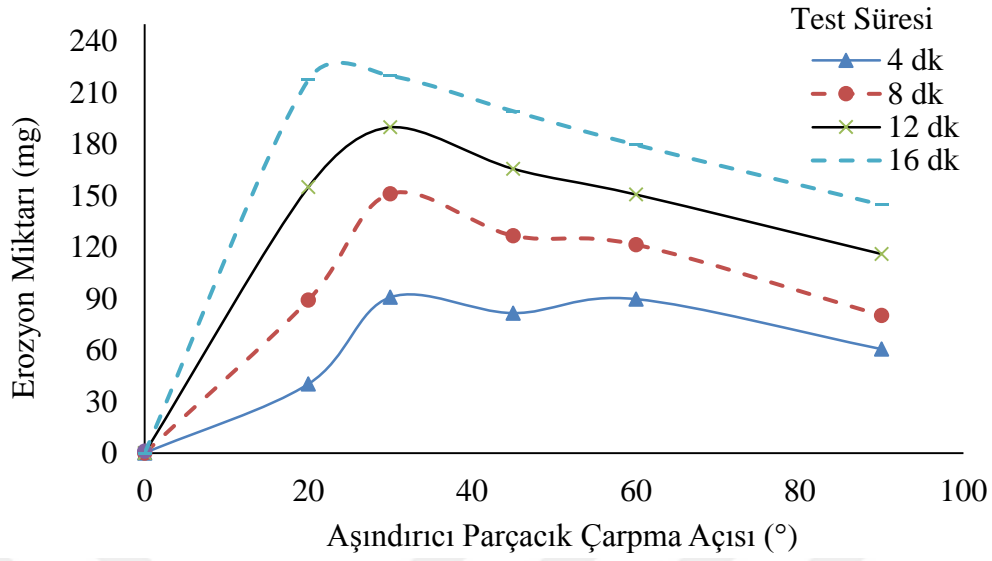
Şekil 52. Renksiz lamine cam malzemesinde 2100 mbar (150 m/s) basınçta oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

Tablo 27. Renksiz lamine cam numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	20° Erozyon Miktarı (mg)	30° Erozyon Miktarı (mg)	45° Erozyon Miktarı (mg)	60° Erozyon Miktarı (mg)	90° Erozyon Miktarı (mg)
4	40.2	90.8	81.6	89.7	60.6
8	89.1	151.1	126.7	121.5	80.2
12	155	189.9	165.7	150.7	116.0
16	217.6	219.9	199.3	179.7	144.7

3.4.4. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Siyah Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Değişimi

Şekil 53'te siyah lamine cam malzemesinde meydana gelen kütleli erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Daha önceki diğer malzemelerde olduğu gibi bu malzeme için de her dört dakika sonunda farklı çarpma açıları (20, 30, 45, 60 ve 90°) meydana gelen kütleli erozyon miktarları ayrı ayrı eğride gösterilmektedir. Grafikte 12 dakikadaki kütleli erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 90°'deki çarpma açısında yapılan testlerin sonucunda elde edilmiştir. Bu çarpma açısındaki erozyon değeri ise 101.27 mg olarak ölçülmüştür. Çarpma açısı 60°'ye düştüğünde erozyon miktarın artış göstermektedir. Kütleli erozyon değeri ise 149.13 mg olarak elde edilmiştir. 45°'deki çarpma açısında yapılan testlerde kütleli erozyon miktarı 166.2 mg erozyon değerine çıkmıştır. Bu malzemede en yüksek kütleli erozyon miktarı 30°'lik çarpma açısında meydana gelmiştir. Bu çarpma açısında erozyon değeri ise 188 mg olarak ölçülmüştür. Son olarak çarpma açısı 20°'ye düştüğünde erozyon miktarı düşerek 155.16 mg değere inmiştir. Test sonuç değerleri Tablo 28'de ve test görüntüleri Şekil 63'te verilmiştir.



Şekil 53. Siyah lamine cam malzemesinde 2100 mbar (150 m/s) basınçta oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimi

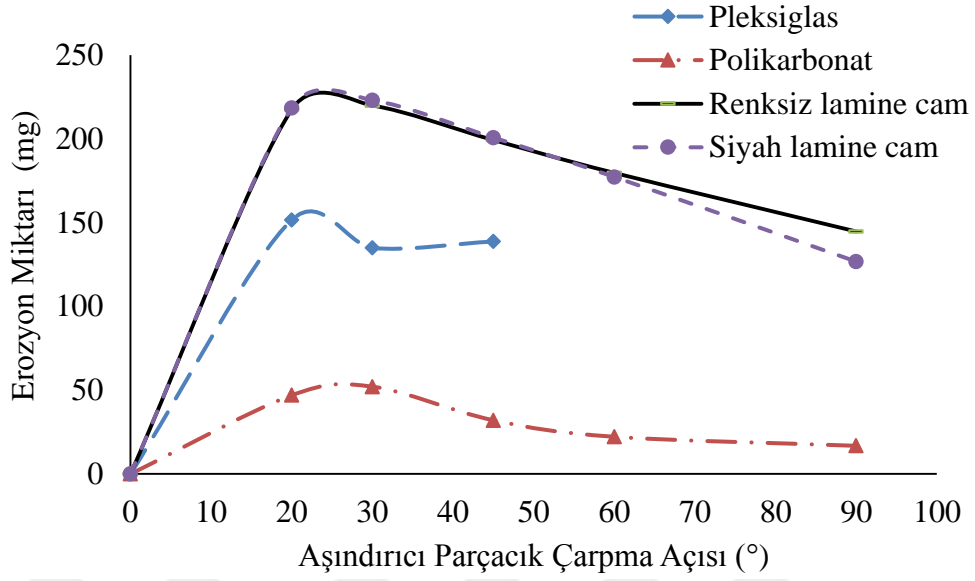
Tablo 28. Siyah lamine cam numunenin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	20° Erozyon Miktarı (mg)	30° Erozyon Miktarı (mg)	45° Erozyon Miktarı (mg)	60° Erozyon Miktarı (mg)	90° Erozyon Miktarı (mg)
4	41.6	82.7	84.6	87.7	59.2
8	95.7	145.8	128.4	119.2	78.8
12	155.1	188	166.2	149.1	101.2
16	218.5	223.0	200.8	177.3	126.7

3.4.5. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Tüm Malzemelerin Erozyonunun Değişimi

Şekil 54'te tüm malzemelerde 150 m/s çarpma hızında 16 dakika sonunda oluşan kütleli erozyon değerlerinin çarpma açısına göre değişimleri grafikte gösterilmiştir. Malzemelerin erozyon değerleri incelendiğinde en kötü erozyon davranışlarını Lamine cam malzemeleri sergilemektedir. Buna karşı polikarbonat malzemesi de en iyi erozyon davranışını sergilemektedir.

Siyah lamine cam malzemesinin 16 dakika sonundaki erozyon değeri 30°'lik çarpma açısında 223.3 mg olarak ölçülmüştür. Bu kütleli erozyon miktarı diğer malzemelere göre oldukça yüksek bir miktardır. Lamine cam malzemesi de siyah lamine cama benzer bir davranış sergilemektedir. Bu malzeme de 30°'lik çarpma açısında en kötü erozyon davranışını sergilemektedir. Kütleli erozyon değeri ise çok az bir düşüş ile 219.9 mg erozyon miktarı olarak ölçülmüştür. Katı parçacık erozyon testlerinde bu iki malzeme en kötü erozyon davranışını sergilemektedir. Katı parçacık erozyon testlerinde en çok aşınmaya maruz kalan üçüncü malzeme pleksiglas olmuştur. Bu malzemedeki 150 m/s hızda 16 dakika sonunda en yüksek kütleli erozyon miktarı 20°'lik çarpma açısında gözlemleyip erozyon değeri ise 151.66 mg olarak ölçülmüştür. Pleksiglas malzemesi lamine camlara göre yaklaşık %32 daha iyi bir erozyon dayanımı göstermektedir. Bu numune 90°'lik çarpma açısında, 9.5 dakika sonunda delinip katı parçacık erozyon testi sonlandırılmaktadır. Bu malzeme için yine 60°'lik çarpma açısında numune 10 dakika sonunda delinip test sonlandırılmaktadır. Son olarak polikarbonat malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarı incelendiğinde diğer malzemelere (siyah lamine cam, renksiz lamine cam, pleksiglas) göre en iyi erozyon dayanımını sergilemektedir. Bu malzeme için çarpma açısı düştüğünde erozyon miktarında artış gözlemlenmektedir. Polikarbonat malzemesi 30°'lik çarpma açısında en yüksek erozyon miktarını gerçekleştirmektedir. Bunun kütleli erozyon değeri ise 52.1 mg olarak ölçülmüştür. Malzemeler arasında en fazla aşınmaya maruz kalan siyah lamine camdaki aşınma değeri ile karşılaştırıldığında, polikarbonat malzemesinde yaklaşık %77 daha az aşınma olmuştur. Bu malzeme diğer malzemelerde meydana gelen kütleli erozyon miktarlarına oranla en az aşınmaya maruz kalmıştır. Test değerleri Tablo 29'de verilmiştir.



Şekil 54. Tüm malzemelerin 150 m/s (2100 mbar) hızında 16 dakika sonunda meydana gelen kütsel erozyon miktarının çarpma açısına göre değişimlerinin karşılaştırılması

Tablo 29. Tüm malzemelerin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) erozyon değerleri

Malzemeler	20° Erozyon Miktarı (mg)	30° Erozyon Miktarı (mg)	45° Erozyon Miktarı (mg)	60° Erozyon Miktarı (mg)	90° Erozyon Miktarı (mg)
Pleksiglas	151.6	134.9	138.7	t=10 dk'da delindi	t=9.5 dk'da delindi
Polikarbonat	47	52.1	32.0	22.2	16.8
Renksiz Lamine Cam	217.6	219.9	199.3	179.7	144.7
Siyah Lamine Cam	218.5	223.0	200.8	177.3	126.7

3.4.6. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Açısına Göre Tüm Malzemelerin Hacimsel Erozyonunun Değişimi

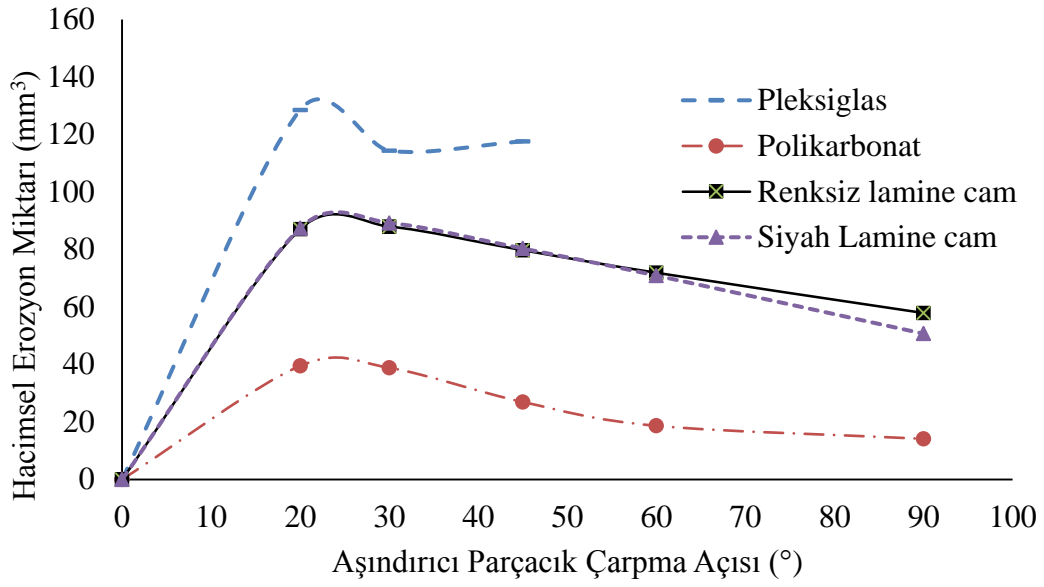
Şekil 55’te tüm malzemelerin 16. dakika sonunda oluşan hacimsel erozyon miktarlarının karşılaştırılması grafiksel olarak gösterilmektedir. Bu grafikteki eğrilerine bakıldığında; kütleli erozyon miktarı en kötü olan lamine camlar burada biraz daha iyi hacimsel erozyon miktarları sergilemektedir. Grafik eğrilerini incelediğimizde; en kötü hacimsel erozyon miktarı pleksiglas malzemesinde görülmektedir. Pleksiglas malzemesi ile lamine cam malzemesi karşılaştırıldığında; pleksiglas malzemesi lamine camlara göre daha iyi bir kütleli erozyon davranışı sergilemektedir. Lakin hacimsel erozyon değerleri incelendiğinde; en kötü erozyon miktarı pleksiglas malzemesinde oluşmaktadır. Bunun nedeni ise pleksiglas malzemesi diğer malzemelere göre en düşük yoğunluğa sahip olmaktadır. Bu malzemede en yüksek hacimsel erozyon miktarı 20°’lik çarpma açısında 128.53 mm³ olarak ölçülmüştür.

Lamine cam ve siyah lamine camı ele aldığımızda bu iki malzemenin hacimsel erozyon değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu iki malzeme arasında en yüksek hacimsel erozyon miktarı siyah lamine cam malzemesinde oluşmaktadır. Siyah lamine cam malzemesinde yapılan testlerin sonucunda 30°’lik çarpma açısında 89,21 mm³ hacimsel erozyon miktarı ölçülmüştür. Diğer lamine cam malzemesi ise hacimsel erozyon miktarında az bir düşüş sergileyip 30°’lik çarpma açısında 87.94 mm³ olarak hesaplanmıştır.

Son olarak diğer üç malzemeye göre tüm testlerde en iyi erozyon davranışını polikarbonat malzeme sergilemektedir. Kütleli erozyon miktarı dâhil olmak üzere hacimsel erozyon miktarında da en düşük aşınmaya bu malzeme maruz kalmıştır. Polikarbonat eğrisini incelediğimizde en yüksek hacimsel erozyon miktarını 20°’lik çarpma açısında 39.49 mm³ olarak ölçülmüştür. Hacimsel değerleri Denklem (1.3) kullanılmıştır. Test değerleri Tablo 30’de verilmiştir.

$$E_h = \frac{\text{Hedef malzeme kütle kaybı miktarı}}{\text{Hedef malzeme yoğunluğu}} \quad (1.3)$$

E_h : Hacimsel erozyon miktarı [mm³]



Şekil 55. Tüm malzemelerin 150 m/s (2100 mbar) hızında 16. dakika sonunda meydana gelen hacimsel erozyon miktarlarının çarpma açısına göre değişimlerinin karşılaştırılması

Tablo 30. Tüm Malzemelerin sabit çarpma hızındaki (150 m/s) hacimsel erozyon değerleri

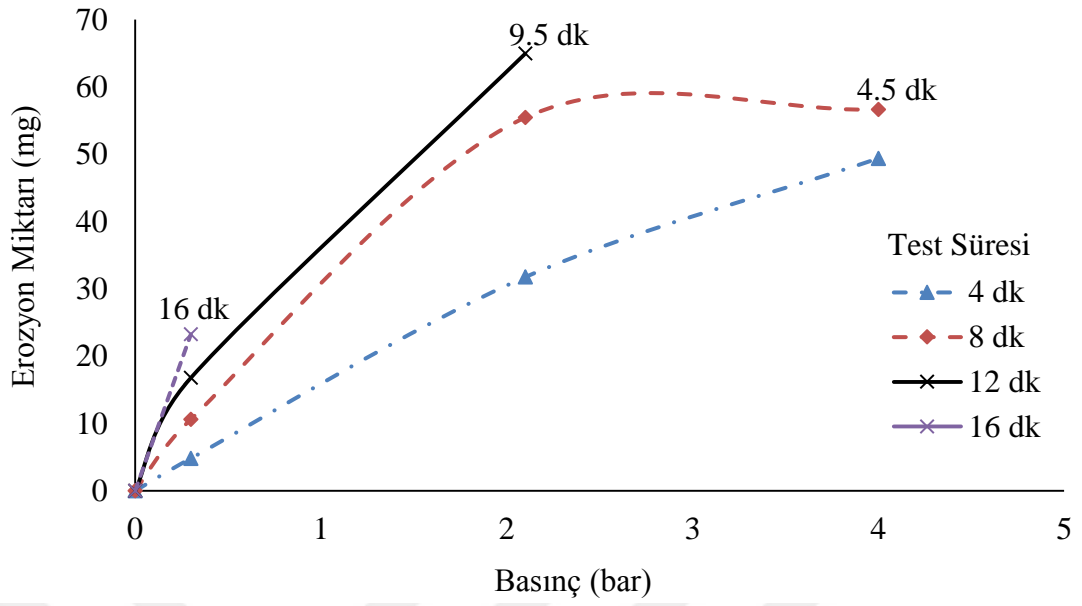
Malzemeler	20° Erozyon Miktarı (mm ³)	30° Erozyon Miktarı (mm ³)	45° Erozyon Miktarı (mm ³)	60° Erozyon Miktarı (mm ³)	90° Erozyon Miktarı (mm ³)
Pleksiglas	128.5	114.3	117.5		
Polikarbonat	39.4	38.8	26.9	18.6	14.1
Renksiz Lamine Cam	87.0	87.9	79.7	71.8	57.8
Siyah Lamine Cam	87.4	89.2	80.3	70.9	50.7

3.5. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Erozyon Miktarının Değişimi

3.5.1. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Pleksiglas Malzemenin Erozyonunun Değişimleri

Katı parçacık erozyonunu etkileyen en önemli faktörlerin arasında çarpma hızı da yer almaktadır. Testlerimizde çarpma hızı arttıkça malzemelerde meydana gelen erozyon miktarı da artmaktadır. Bu bölümde çarpma hızının (75, 150 ve 190 m/s) erozyon miktarına etkisini incelemek üzere yapılan testlerin sonuçları her malzeme türü için ayrı ayrı grafiklerde gösterilmiştir. Bütün malzemelerin katı parçacık erozyon testinde davranışlarını incelemek için 16 dakika sonunda meydana gelen kütleli erozyon değerleri birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu bölümün sonunda yine tüm malzemelerde 16. dakikada meydana gelen hacimsel erozyon değerleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 56'da pleksiglas malzemesinde 90°'lik sabit çarpma hızında oluşan kütleli erozyon değerleri grafiksel olarak sunulmuştur. Testte her 4 dakika sonunda farklı çarpma hızlarına (75, 150 ve 190 m/s) karşılık gelen basınç değerlerinde (300, 2100, 4000 mbar) yapılan testlerde kütleli erozyon miktarları ayrı ayrı sunulmuştur. Bu malzeme için yüksek çarpma hızlarında test süresi tamamlanmadan numune delinmiştir. Pleksiglas malzemesi 150 m/s (2100 mbar) hızında 9.5 dakika sonunda delinmiştir. Benzer şekilde, bu malzeme 190 m/s (4000 mbar) hızında 4.5 dakika sonunda delinmiştir. Grafikteki 8. Dakika sonundaki erozyon değerleri incelendiğinde, en düşük erozyon miktarı 300 mbar değerinde gerçekleşmiş olup 2100 mbar basınca kadar doğrusal bir eğri sergilemektedir. Bu zaman eğrisinde 2100 mbar basınç değeri 4000 mbar basınca kadar kütleli erozyon miktarında çok az bir artış meydana gelmektedir. Bunun sebebi ise malzemedeki oluşan deliğin içindeki hava-kum sirkülasyonu ve çarpma yüzeyinin lüleden uzaklaşmasıdır. Bu zaman eğrisi için 300, 2100 ve 4000 mbar basınca karşılık gelen kütleli erozyon miktarı sırasıyla 10.63, 55.46 ve 56.63 mg olarak ölçülmüştür. Katı parçacık erozyon test süresi arttıkça erozyon değerleri de artmaktadır. Bu malzeme türünde en yüksek kütleli erozyon miktarı 4 bar (190 m/s) basıncında meydana gelmektedir. Yapılan testlerde 4. ve 8. dakikalardaki kütleli erozyon değerleri sırasıyla 49.4 ve 56.63 mg olarak ölçülmüştür. Test sonuç değerleri Tablo 31'de verilmiştir.



Şekil 56. Pleksiglas malzemesinde 90°'lik sabit çarpma açısında meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının test basıncına göre değişimi

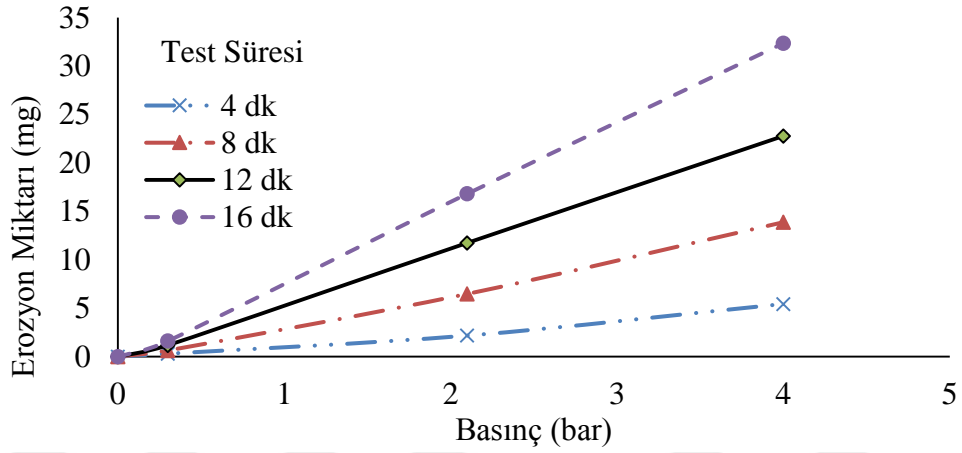
Tablo 31. Pleksiglas numunenin sabit açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	0.3 bar (75 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	2.1 bar (150 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	4 bar (190 m/s) Erozyon Miktarı (mg)
4	4.8	31.7	49.4
8	10.6	55.4	56.6
12	16.8	t= 9.5 dk'da delindi	t=4.5 dk'da delindi
16	23.2		

3.5.2. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Değişimi

Şekil 57'de polikarbonat malzemesinde meydana gelen kütleli erozyon miktarının çarpma hızlarına göre değişimleri grafiksel olarak sunulmuştur. Testlerde her 4 dakika sonunda 75, 150 ve 190 m/s hız değerlerine karşılık gelen basıncı sırasıyla 300, 2100 ve 4000 mbar değerlerinde yapılan testlerde kütleli erozyon miktarları ayrı ayrı sunulmuştur. Polikarbonat malzemesinde kütleli erozyon miktarının her dört dakika sonunda doğrusal olarak arttığı gözlemlenmektedir. Grafikteki 8. dakikadaki kütleli erozyon miktarlarını ele aldığımızda; en düşük kütleli erozyon miktarları 300 mbar değerinde 0,63 mg olarak

hesaplanmıştır. Basınç değeri arttıkça kütleli erozyon miktarı da doğrusal olarak artmaktadır. Bu zaman aralığı sırasıyla 2.1 ve 4 bar basınç değerlerinde 6.46 ve 13.86 mg erozyon miktarlarına ulaşmıştır. Bu malzeme için test süresi arttıkça erozyon miktarı da doğrusal olarak artmaktadır. Bu malzeme türünde en yüksek kütleli erozyon miktarı 4 bar basınç değerinde meydana gelmiştir. Kütleli erozyon değerleri ise 4, 12, 16. dakikalarda sırasıyla 5.43, 22.76 ve 32.33 mg olarak ölçülmüştür. Test sonuç değerleri Tablo 32’de verilmiştir.



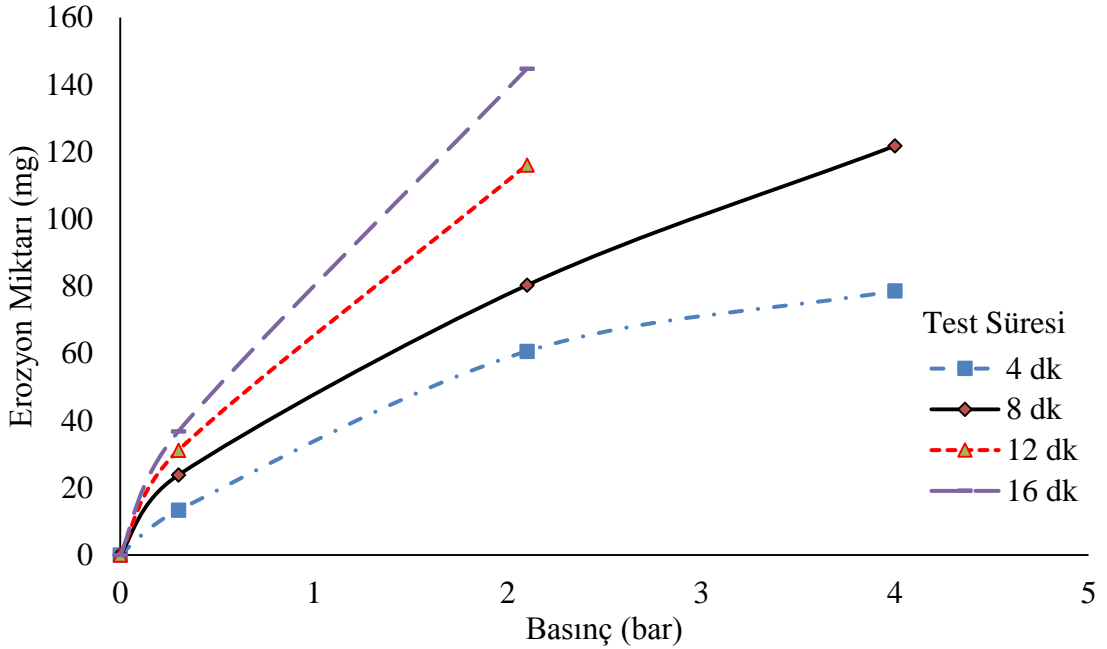
Şekil 57. Polikarbonat malzemesinde 90’lik sabit çarpma açısında meydana gelen kütleli erozyon değerlerinin test basıncına göre değişimi

Tablo 32. Polikarbonat numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	0.3 bar (75 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	2.1 bar (150 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	4 bar (190 m/s) Erozyon Miktarı (mg)
4	0.3	2.1	5.4
8	0.6	6.4	13.8
12	1.1	11.7	22.7
16	1.6	16.8	32.3

3.5.3. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Renksiz Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Değişimi

Şekil 58’de renksiz lamine cam malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma hızlarına göre değişimleri grafiksel olarak sunulmuştur. Testlerde de her dört dakika sonunda 75, 150 ve 190 m/s hız değerlerine karşılık gelen basınç sırasıyla 300, 2100 ve 4000 mbar değerlerinde yapılan testlerde kütleli erozyon miktarları ayrı ayrı sunulmuştur. Lamine cam malzemesinde erozyon miktarı her dört dakika sonunda doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Grafikteki 8. dakikadaki kütleli erozyon değerleri ele alındığında; en düşük erozyon miktarı de 300 mbar değerinde 23.76 mg olarak hesaplanmıştır. Basınç değeri arttıkça kütleli erozyon değeri de doğrusal olarak artmaktadır. Bu zaman aralığı için diğer basınç değerleri 2.1 ve 4 bar sırasıyla 80.26 ve 121.73 mg kütleli erozyon miktarlarına ulaşmaktadır. Bu malzeme için 4 bar test basıncında yapılan test süresi bitmeden 7. dakika sonunda delinmiştir. Son olarak bu malzemede en yüksek kütleli erozyon aşınma 4 bar test basıncında meydana gelmektedir. Test değerleri Tablo 33’de verilmiştir.



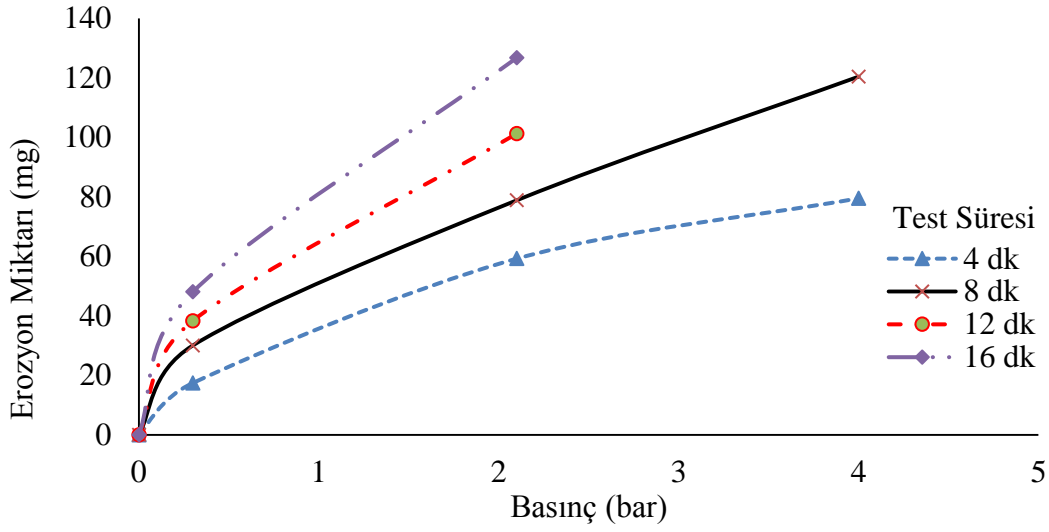
Şekil 58. Renksiz lamine cam malzemesinde 90°'lik sabit çarpma açısında meydana gelen kütleli erozyon değerlerinin test basıncına göre değişimi

Tablo 33. Renksiz lamine cam numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	0.3bar (75 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	2.1bar (150 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	4bar (190 m/s) Erozyon Miktarı (mg)
4	13.3	60.6	78.6
8	23.7	80.2	121.7 t= 7 dk'da delindi
12	31.1	116.0	
16	36.7	144.7	

3.5.4. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Siyah Lamine Cam Malzemenin Erozyonunun Değişimi

Şekil 59'de siyah lamine cam malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarlarının çarpma hızlarına göre değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Testlerde her dört dakika sonunda 75, 150 ve 190 m/s hız değerlerine karşılık gelen basınç sırasıyla 300, 2100 ve 4000 mbar miktarlarında yapılan testlerde kütleli erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmiştir. Siyah lamine cam malzeme türünde de erozyon miktarının her dört dakika sonunda doğrusal olarak arttığı gözlemlenmektedir. Grafikte 8 dakikadaki kütleli erozyon miktarları ele alındığında; en düşük erozyon miktarları 300 mbar değerinde 30.04 mbar olarak ölçülmüştür. Bu lamine camın basınç değeri arttıkça kütleli erozyon değerleri de artmaktadır. Bu zaman aralığı için diğer basınç değerleri 2.1 ve 4 bar sırasıyla 59.23 ve 120.46 mg erozyon miktarlarına çıkmıştır. Bu malzemede de 4 bar çarpma basınç için test süresi bitmeden numune 7 dakika sonunda delinmiştir. Son olarak bu malzeme için en yüksek kütleli erozyon miktarı 4 bar test basıncında meydana gelmiştir. Test sonuç değerleri Tablo 34'de verilmiştir.



Şekil 59. Siyah lamine cam malzemesinde 90°'lik çarpma açısında meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının test basıncına göre değişimi

Tablo 34. Siyah lamine cam numunenin sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	0.3 bar (75 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	2.1 bar (150 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	4 bar (190 m/s) Erozyon Miktarı (mg)
4	17.4	59.2	79.5
8	30.0	78.8	120.4 t=7 dk'da delindi
12	38.3	101.2	
16	48.0	126.7	

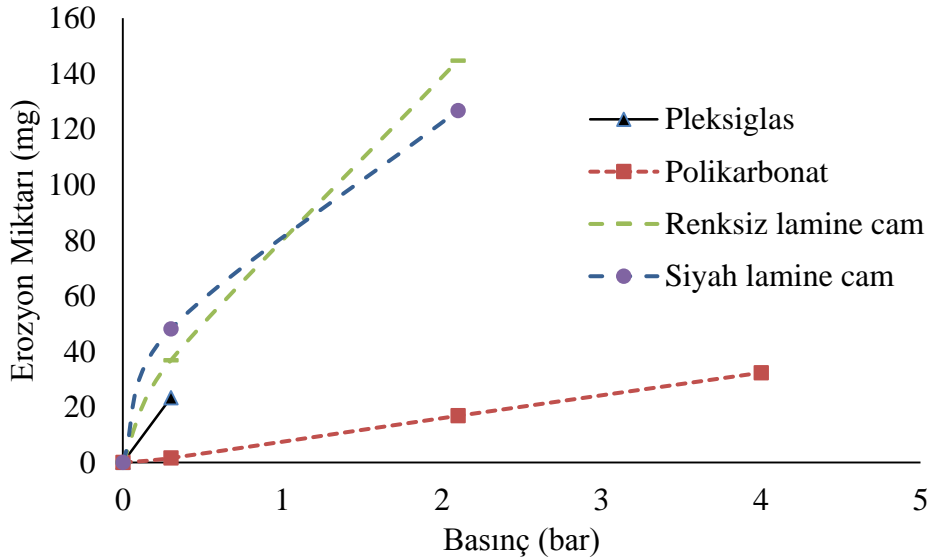
3.5.5. Tüm Malzemelerde Elde Edilen Erozyon Değerlerinin Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Değişimi

Şekil 60'da tüm malzemelerin sabit çarpma açısında 16 dakika sonunda oluşan kütleli erozyon değerleri grafiksel olarak bir arada gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek kütleli erozyon miktarı lamine camlarda görülmüştür. Siyah lamine cam malzemesinde 0.3 bar basıncında (75 m/s) en yüksek kütleli erozyon miktarı 48.04 mg olarak elde edilmiştir. Bu malzeme için erozyon miktarı 2.1 bar (150 m/s) basıncında 126.77 mg değere ulaşmış ve doğrusal olarak artış göstermiştir. Siyah lamine cam test süresi bitmeden 7 dakika sonunda

delinmiştir. En yüksek erozyon miktarına sahip ikinci malzeme ise renksiz lamine cam malzemesi olarak belirlenmiştir. Bu malzemede 0.3 bar (75 m/s) test basıncında kütleli erozyon miktarı 36.76 mg olarak ölçülmüştür. 2.1 bar (150 m/s) basıncında en yüksek kütleli erozyon miktarı elde edilmiştir (144.73 mg) Bu numunede test süresi bitmeden 7 dakika sonunda delinmiştir.

Pleksiglas malzemesi ise lamine camlara göre biraz daha iyi erozyon performansı sergilemiştir. Numunede, kütleli erozyon miktarı 0.3 bar test basıncında (75 m/s) 23.26 mg olarak ölçülmüştür. Pleksiglas numuneleri, test süreleri tamamlanamadan 2.1 ve 4 bar basınçlarda sırasıyla 9.5 ve 4.5 dakika sonunda delinmiştir.

Polikarbonat malzemesi diğer malzemelere göre oldukça düşük kütleli erozyon miktarı sergilemiştir. Bu malzemede, 0.3 bar test basıncında (75 m/s) en düşük erozyon miktarı 1.6 mg olarak ölçülmüştür. Polikarbonat malzemesi ile yapılan testlerde basınç değerleri arttıkça kütleli erozyon miktarı da doğrusal olarak artmaktadır. Diğer basınç değerleri olan 2.1 ve 4 bar için sırasıyla kütleli erozyon miktarları 16.8 ve 32.33 mg olarak ölçülmüştür. Test sonuçları Tablo 35’de verilmiştir.



Şekil 60. Tüm malzemelerin 90°'lik çarpma açısında 16 dakika sonunda oluşan kütleli erozyon değerlerinin test basıncına göre karşılaştırılması

Tablo 35. Tüm malzemelerin sabit çarpma açısındaki (90°) kütleli erozyon değerleri

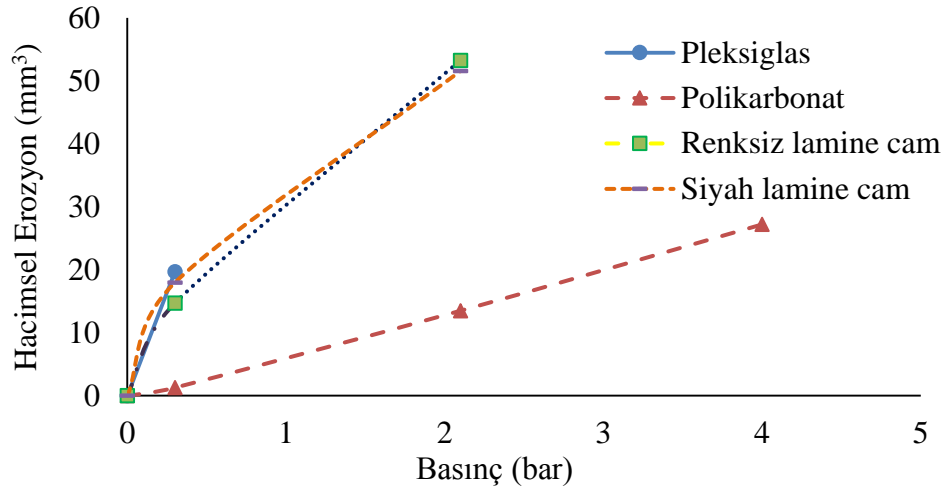
Malzemeler	0.3 bar (75 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	2.1 bar (150 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	4 bar (190 m/s) Erozyon Miktarı (mg)
Pleksiglas	23.2		
Polikarbonat	1.6	16.8	32.3
Renksiz Lamine Cam	36.7	144.7	
Siyah Lamine Cam	48.0	126.7	

3.5.6. Aşındırıcı Parçacık Çarpma Hızına Göre Tüm Malzemelerin Hacimsel Erozyonunun Değişimi

Şekil 61'de tüm malzemelerde 16 dakika sonunda meydana gelen hacimsel erozyon miktarları test basıncına (çarpma hızı) göre karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde hacimsel erozyon miktarı en yüksek olan malzeme pleksiglas malzemesi olarak gözükmektedir. Pleksiglas malzemesinde 300 mbar basınç değerinde 16. dakika sonunda hacimsel erozyon miktarı 19.71 mm³ olarak ölçülmüştür. Bu malzeme test süresi bitmeden 2100 ve 4000 mbar test basınçlarında için sırasıyla 9.5 ve 4.5. dakika sonunda delinmiştir.

Lamine camlar, pleksiglas malzemesine göre biraz daha iyi bir hacimsel erozyon performansı sergilemektedir. Bu iki malzemenin hacimsel erozyon değerleri birbirine oldukça yakın olarak elde edilmiştir. 300 mbar test basıncında siyah lamine ve renksiz lamine camlarda sırasıyla 17.97 ve 14.70 mm³ hacimsel erozyon miktarları hesaplanmıştır. Siyah lamine cam malzemesi, renksiz lamine cam malzemesine göre daha fazla erozyona maruz kalmıştır. 2100 mbar test basıncında ise siyah lamine cam ve renksiz lamine cam için hacimsel erozyon miktarları sırasıyla 51.53 ve 53.26 mm³ olarak ölçülmüş olup doğrusal karakteristiğe sahiptir. Son olarak polikarbonat malzemesi, diğer malzemelere göre hem kütleli erozyon miktarı hem de hacimsel erozyon miktarında en iyi erozyon performansı sergilemiştir. Bu malzemede aşındırıcı parçacıkların çarpma hızı arttıkça hacimsel erozyon miktarı da doğrusal olarak artış göstermiştir. 300 mbar basınç değerinde 16 dakika sonunda 1.28 mm³ hacimsel erozyon miktarı hesaplanmıştır. Diğer test basıncı değerleri olan 2100 ve 4000 mbar da ise hacimsel erozyon miktarları sırasıyla 13.50 ve 27.19 mm³ olarak elde

edilmiştir. Bu malzemede de en yüksek hacimsel erozyon miktarı 4000 mbar basıncında oluşmaktadır. 300 mbar basıncında en yüksek hacimsel erozyon miktarına sahip olan pleksiglas ile en düşük hacimsel erozyon miktarına sahip olan polikarbonat malzemesi karşılaştırıldığında; polikarbonat malzemesi yaklaşık %93 daha az erozyona maruz kalmıştır. Gerçekleştirilen test sonuçlarından hareketle polikarbonat malzemesinin en iyi erozyon dayanımı gösterdiği anlaşılmıştır. Test sonuçları Tablo 36’de verilmiştir.



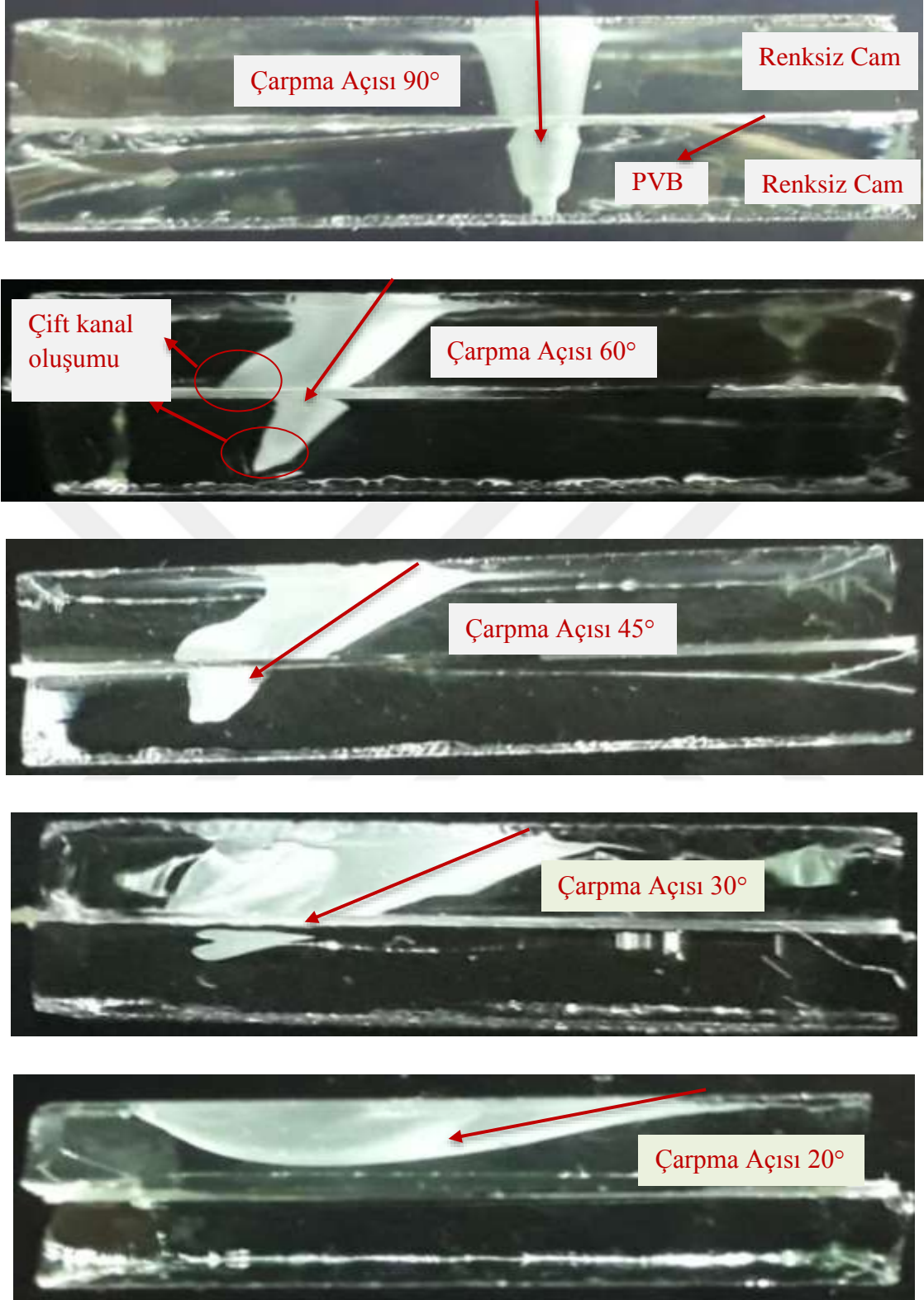
Şekil 61. Tüm malzemelerde 90°'lik sabit çarpma açısında oluşan hacimsel erozyon miktarının basınca (çarpma hızına) göre karşılaştırılması

Tablo 36. Tüm malzemelerin sabit çarpma açısındaki (90°) hacimsel erozyon değerleri

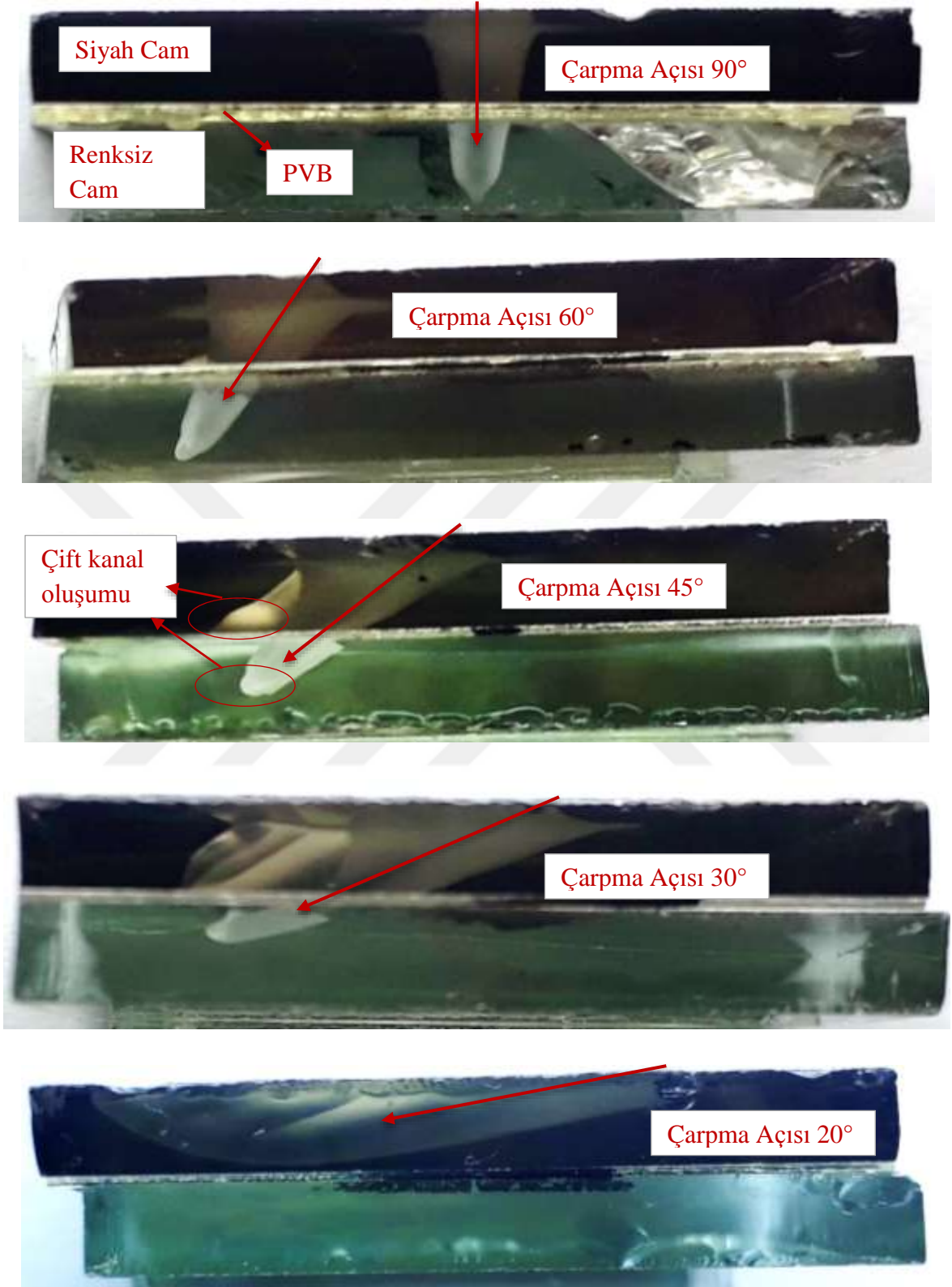
Malzemeler	0.3 bar (75 m/s) Erozyon Miktarı (mm ³)	2.1 bar (150 m/s) Erozyon Miktarı (mm ³)	4 bar (190 m/s) Erozyon Miktarı (mm ³)
Pleksiglas	19.7	t=9.5 dk' da delindi	t=4.5 dk' da delindi
Polikarbonat	1.2	13.5	27.1
Renksiz Lamine Cam	14.7	53.2	t=7 dk' da delindi
Siyah Lamine Cam	17.9	51.5	t=7 dk' da delindi

Şekil 62’de renksiz lamine cam malzemelerde sabit çarpma hızının (150 m/s) farklı aşındırıcı parçacık çarpma açılarındaki etkileri yan taraflarından gösterilmiştir. 90° çarpma açısında oluşan kanalın çapının lamine camda ara katman malzemesi olarak kullanılan polivinil butiralin etkisiyle ikinci tabakadan sonra giderek küçüldüğü görülmektedir. 60°, 45° ve 30° çarpma açılarında PVB’nin etkisiyle iki akış kanalının olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, 30° çarpma açısında daha fazla aşınma söz konusudur. 20° çarpma açısında ise ilk 4 dk’yı kapsayan test süresinde çok az aşınma meydana gelmiş olup, 4 dakikadan sonra erozyon aşınmasında artan bir trend oluşmuştur. Bu durum, diğer malzemelerden daha sert olan lamine cam malzemenin yüzeyinin küçük çarpma açılarındaki aşındırıcı parçacıkların yüzeyle etkileşimi için geçen sürenin başlangıçta az iken yüzeyde aşınma arttıkça temas etkileşim süresinin artmasından kaynaklanmıştır.

Şekil 63’te siyah lamine cam malzemelerde sabit aşındırıcı parçacık çarpma hızının (150 m/s) farklı aşındırıcı parçacık çarpma açılarındaki etkileri numunelerin yan tarafından alınan görüntüler ile gösterilmiştir. Bu malzemeler renksiz lamine cam malzemelere benzer erozyon davranışı sergilemiştir. 90° çarpma açısı etkisi altındaki siyah lamine camda erozyon aşınmasının cam yüzeyinden başlayarak daralan bir kanal oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 62. Renksiz lamine cam malzemelerde sabit aşındırıcı parçacık hızının ($v=150$ m/s) farklı çarpma açılarındaki (90° , 60° , 45° , 30° , 20°) etkilerini gösteren kesit fotoğrafları



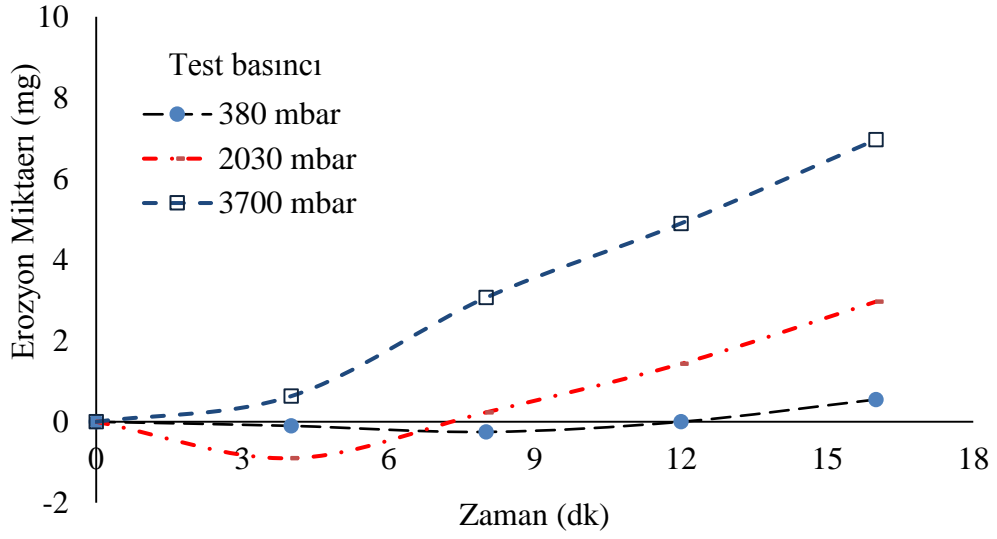
Şekil 63. Siyah lamine cam malzemelerde sabit aşındırıcı parçacık hızının ($V=150$ m/s) farklı çarpma açılarındaki (90° , 60° , 45° , 30° , 20°) etkilerini gösteren fotoğraflar

3.6. Aşındırıcı Parçacık Boyutunun Polikarbonat Malzemesinin Katı Parçacık Erozyonuna Etkilerinin İncelenmesi

Alümina oksit (Al_2O_3) aşındırıcı parçacığının kullanıldığı katı parçacık erozyon testlerinde, en yüksek erozyon dayanımı polikarbonat malzemeler tarafından sergilenmiştir. Bu malzemede farklı aşındırıcı parçacıkların etkilerini incelemek üzere daha büyük boyutlu iki farklı silika kumu (SiC-220 grit ve SiC-60 grit) ile testler gerçekleştirilmiştir.

3.6.1. Silika (SiC-220 grit) Aşındırıcı Parçacık için Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi

Şekil 64'te Silika kumun sabit çarpma açısı için çeşitli çarpma hızlarında polikarbonat malzemesinde oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimleri verilmiştir. 380 mbar (70 m/s) test basıncında ilk sekiz dakika sonunda polikarbonat malzemesinde kütleli erozyon aşınması tespit edilememiş aksine numune kütleli artış meydana gelmiştir. Daha önce de açıklandığı gibi aşındırıcı parçacıklar bu süreç zarfında polikarbonat malzeme yüzeyine yapışmıştır. Bu olay inkübasyon süreci olarak tanımlanmaktadır. Test basıncında 4 ve 12. dakika arasında inkübasyon süreci meydana gelmiştir. Testin devamında 12 dakika sonunda inkübasyon süresi aşılmış ve erozyon miktarı 0.55 mg değerine ulaşmıştır. 2030 mbar (150 m/s) test basıncında yapılan testlerde, malzemede 7. dakika sonuna kadar bir inkübasyon süresi meydana gelmektedir. Testin devamında inkübasyon süresi aşılmış ve 8. dakikadan sonra aşınmada bir hızlanma gözlemlenmiştir. Kütleli erozyon miktarları, 12 ve 16. dakika sonlarında sırasıyla 1.43 ve 2.96 mg olarak elde edilmiştir. 3700 mbar (200 m/s) test basıncında 4 dakika sonunda erozyon miktarı 0.63 mg olarak ölçülmüştür. Silika kumun (SiC-220 grit) 4 dakika sonunda polikarbonat malzemesinde sebep olduğu kütleli erozyon miktarı ile alümina (Al_2O_3 -240 grit) ve silika (SiC-60 grit) kumlarının aynı malzemede sebep oldukları erozyon miktarları karşılaştırıldığında; alümina oksit, silika kuma (SiC-220 grit) göre %88 ve SiC-60 grit kuma göre %90 daha az miktarda erozyona neden olmuştur. Bu kum için 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 3.06, 4.9 ve 6.96 mg kütleli erozyon miktarları elde edilmiş olup, doğrusal bir artış söz konusudur. Test değerleri Tablo 37'de verilmiştir.



Şekil 64. Silika (SiC-220 grit) kum sabit çarpma açısı (90°) için polikarbonat malzemesinde çeşitli çarpma hızlarında meydana gelen kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimleri

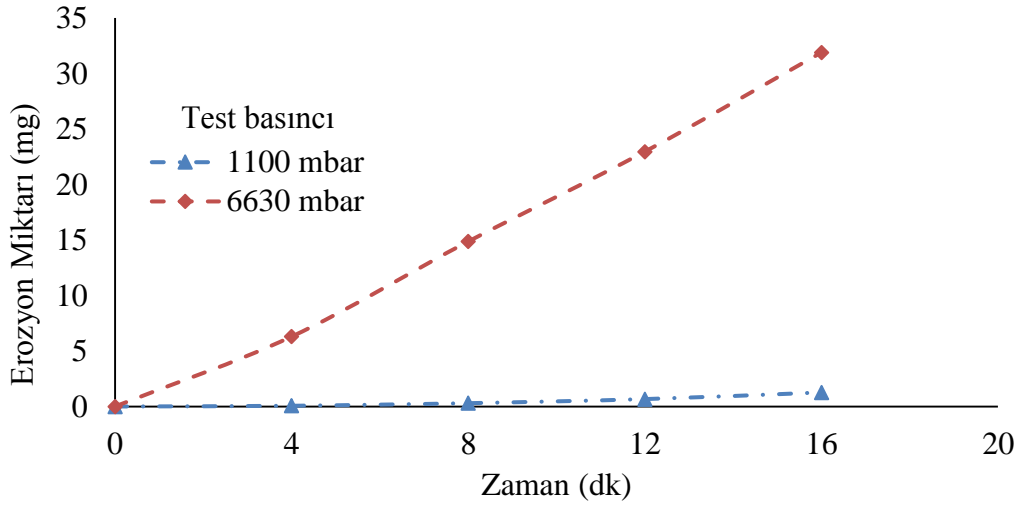
Tablo 37. Silik (SiC-220 grit) sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

Test Süresi (dk)	380 mbar (70 m/s) Erozyon Miktarı (dk)	2030 mbar (150 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	3700 mbar (200 m/s) Erozyon Miktarı (mg)
4	-0.1	-0.9	0.63
8	-0.25	0.23	3.06
12	5E-05	1.43	4.9
16	0.55	2.96	6.96

3.6.2. Silika (SiC-60 grit) Aşındırıcı Parçacık İçin Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Değişimi

Şekil 65'te SiC-60 grit kumun sabit çarpma açısı için polikarbonat malzemesinde çeşitli çarpma hızlarında meydana gelen erozyon miktarlarının zamana göre değişimleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Bu aşındırıcı parçacık, diğer parçacıklara göre polikarbonat malzemesini en fazla kütleli erozyon aşınmasına uğratmıştır. 1100 mbar (70 m/s) test basıncında 4, 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 0.06, 0.3, 0.66 ve 1.26 mg kütleli erozyon miktarı elde edilmektedir. 6630 mbar (150 m/s) çarpma basınç için yapılan testlerin sonucunda polikarbonat malzemesinde meydana gelen kütleli erozyon miktarları 4, 8, 12

ve 16 dakika sonunda sırasıyla 6.3, 14.86, 22.96 ve 31.9 mg değerlerine ulaşmış ve doğrusal olarak artmaktadır. Aşındırıcı parçacık çarpma hızının artmasıyla birlikte kütleli erozyon aşınmada oldukça hızlı bir artış meydana gelmektedir. Son olarak malzemede, 16 dakika sonunda 6630 mbar aşındırıcı parçacık test basıncı, 1100 mbar çarpma basınca göre yaklaşık 25 kat daha fazla kütleli erozyona neden olmuştur. Test sonuçları Tablo 38’de verilmiştir.



Şekil 65. Silika (SiC-60 grit) kum sabit çarpma açısı (90°) için polikarbonat malzemesinde farklı çarpma hızlarında oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Tablo 38. Silika (SiC- 60 grit) sabit çarpma açısındaki (90°) erozyon değerleri

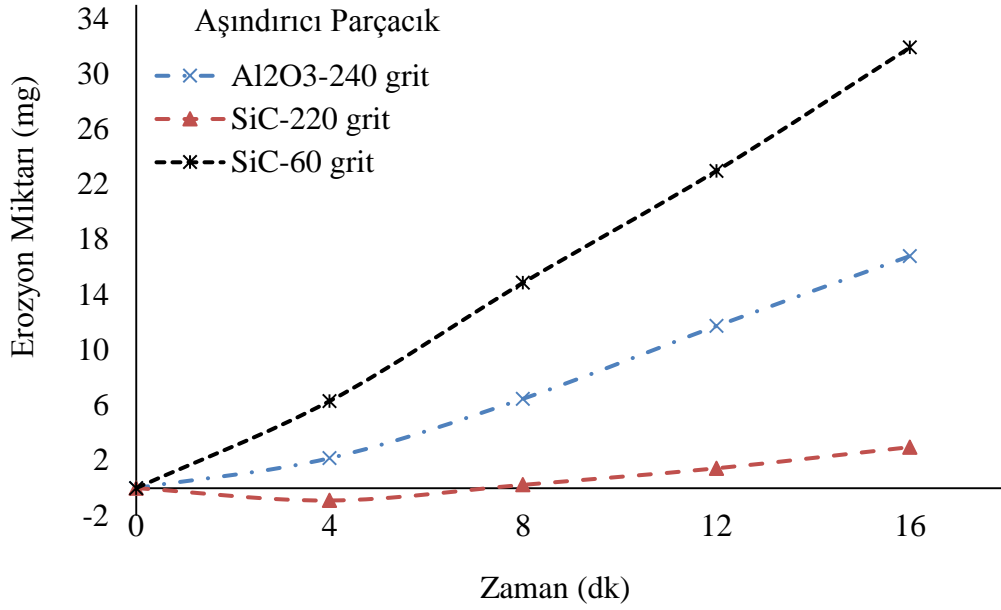
Test Süresi (dk)	1100 mbar (70 m/s) Erozyon Miktarı (mg)	6630 mbar (150 m/s) Erozyon Miktarı (mg)
4	0.06	6.3
8	0.3	14.86
12	0.66	22.96
16	1.26	31.9

3.6.3. Kullanılan Aşındırıcı Parçacıklar İçin Polikarbonat Malzemenin Erozyonunun Zamana Göre Karşılaştırılması

Şekil 66'da katı parçacık erozyon testlerinde polikarbonat malzemesinde kullanılan tüm aşındırıcı parçacıkların sabit çarpma açısı (90°) ve 150 m/s çarpma hızında oluşan kütleli erozyon miktarları grafiksel olarak sunulmaktadır. Polikarbonat malzemesini en fazla kütleli erozyon aşınmaya uğratan aşındırıcı parçacık SiC-60 grit silika kum olarak gözlemlenmiştir. Bunun en önemli sebebi bu aşındırıcı parçacığın daha büyük boyutlu ve dolayısıyla daha yüksek kinetik enerjili oluşudur..

Silika kum(SiC-60 grit) için 4 dakika sonundaki erozyon miktarı 6.3 mg olarak ölçülmüştür. Bu kum, devam eden test sürecinde (8, 12 ve 16 dk) için sırasıyla 14.86, 22.96 ve 31.9 mg erozyon kaybına sebep olmuştur. Polikarbonat malzemesini en fazla erozyon aşınmaya uğratan ikinci kum ise alümina oksit (Al_2O_3 -240 grit: 52 μm) olarak tespit edilmiştir. Kütleli erozyon değerleri ise 4, 8, 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 2.16, 6.46, 11.76 ve 16.8 mg olarak ölçülüp doğrusal olarak artmıştır.

Son olarak polikarbonat malzemesini en az erozyona uğratan aşındırıcı, Silika kumu (SiC-240 grit: 71 μm) olarak gözlemlenmiştir. Bu aşındırıcı parçacık için ilk sekiz dakikada malzemede inkübasyon sürecine sebep olmuştur. Katı parçacık testinin devam etmesi sonucunda 7 dakika sonunda inkübasyon süresi aşılmış ve erozyon aşınması doğrusal olarak artış sergilemeye başlamıştır. Bu aşındırıcı parçacık için 12 ve 16 dakika sonunda sırasıyla 1.43 ve 2.96 mg kütleli erozyon miktarı ölçülmüştür. Test değerleri Tablo 39'de verilmiştir.



Şekil 66. Farklı aşındırıcı parçacıkların sabit çarpma açısı 90° ve çarpma hızı 150 m/s etkisi altında polikarbonat malzemede oluşturduğu erozyon miktarının zamana göre değişimi

Tablo 39. Tüm aşındırıcı parçacık çarpma açısı (90°) ve hızındaki (150 m/s) erozyon değerlerinin karşılaştırılması

Test Süresi (dk)	Al ₂ O ₃ -240 (52 µm) Erozyon Miktarı (mg)	SiC-220 (71 µm) Erozyon Miktarı (mg)	SiC-60 (348 µm) Erozyon Miktarı (mg)
4	2.16	-0.9	6.3
8	6.46	0.23	14.86
12	11.73	1.43	22.96
16	16.8	2.96	31.9

4. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında mühendislik ve mimarlık alanlarında yaygın olarak kullanılan plastik ve cam esaslı dört farklı şeffaf malzemenin (pleksiglas, polikarbonat, siyah lamine ve renksiz lamine cam) katı parçacık erozyon davranışları testsel olarak incelenmiştir. Yapılan testler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Erozyon miktarları test süresi ile paralel olarak doğrusal artış göstermektedir.
- Aşındırıcı parçacık çarpma açısının değiştirilmesi, malzemelerin kütleli erozyon miktarında farklılaşmaya sebep olmuştur. Pleksiglas malzemesi için en fazla kütleli erozyon kaybı 20°'lik çarpma açısında oluşmakta, çarpma açısı arttıkça erozyon miktarında azalma meydana gelmektedir. Polikarbonat ve lamine camlar ise 30°'lik çarpma açısında maksimum kütleli erozyon kaybı sergilemektedir; çarpma açısı arttıkça erozyon kaybı da azaltmaktadır.
- Aşındırıcı parçacık çarpma hızı arttıkça kütleli erozyon miktarı da artmaktadır.
- Lamine camlarda ara malzeme olarak kullanılan polivinil butiral malzemesi erozyon aşınmasını bir süreliğine (delinene kadar) yavaşlatmakta ve sonrasında da aşınma eğrisinin karakteristiğini değiştirmektedir.
- Cam, gevrek bir malzeme olmasına rağmen tez çalışması kapsamında kullanılan lamine camlar, 52 µm boyutlu alümina aşındırıcı parçacık karşısında sünek malzeme davranışı sergilemiştir.
- Kütleli erozyon miktarı açısından değerlendirildiğinde, en düşük erozyon miktarı polikarbonat malzemesinde gerçekleşmiş olup, en fazla erozyon lamine camlarda elde edilmiştir.
- Hacimsel erozyon miktarı acısan değerlendirilme yapıldığında ise en fazla erozyon pleksiglas malzemesinde ve en düşük olarak da polikarbonat malzemesinde gerçekleşmiştir.
- Aşındırıcı parçacıkların boyutunun artması, malzemelerin erozyon miktarlarının artmasına sebep olmaktadır.

5. ÖNERİLER

Tez çalışmasında yapılan değerlendirmeler neticesinde bundan sonraki çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunmaktadır:

- Bu çalışma endüstrinin birçok dalında kullanılan şeffaf malzemelerin katı parçacık erozyon davranışını incelenmiştir. Bazı belirli uygulamalarda karşılaşılan katı parçacık erozyon koşulları dikkate alınarak spesifik ve amaca yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Lamine cam malzemeler için ortalama boyutu 52 μm olan Al_2O_3 katı parçacık kullanılmıştır. Bu test çalışması kapsamında kullanılan ve diğer başka malzemeler için farklı boyutlu aşındırıcı parçacıkların erozyon davranışları incelenebilir.
- Katı parçacık erozyon testlerine tabi tutulan şeffaf malzemelere ışık geçirgenlik testi uygulanıp malzemelerin ışık geçirgenliğini incelenebilir.
- Polikarbonat ve pleksiglas malzemesi cam malzemelere göre daha yumuşak yüzeye sahiptir ve kolayca çizilebilir. Yüzey kaplama yöntemleri ile bu malzemelerin hem çizilmeleri hem de aşınma davranışları iyileştirilebilir. Bu yöntemlerin katı parçacık erozyon performansına yönelik etkileri incelenebilir.
- Bu çalışma kapsamında el alınmamış olsa da, incelenen malzeme türlerine ait aşınma davranışlarının sayısal modellemeleri yapılabilir.
- Lamine cam numunelerde ara katman malzemesi olarak 0.38 mm kalınlıklı polivinil butiral (PVB) kullanılmıştır. Bu ara katman malzemesi erozyon aşınmasının ilerlemesini belli bir süre yavaşlatmakta ve daha sonrasında aşınma eğrisinin eğimini azaltma yönünde değiştirmektedir. Bu nedenle farklı kalınlıktaki PVB katmanlarının ve farklı ara katman yapıştırıcıların erozyon performansları incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Amirhaghi, S., Reehal, H.S., Wood, R.J.K. ve Weeler, D.W., 2001. Diamond Coating on Tungsten Carbide and Thier Erosive Wear Properties, Surface and Technology, 135, 126-138.
- Arjula, S, Hrsha, A. A., Ghosh, M. K., 2008. Solid-Particle erosion Behavior of High-Performance Thermoplastic Polymers, Journal of Materials Science, 43:1757-1768.
- Arjula, S., Harsha, A.P. ve Ghosh, M.K., 2008. Solid-Particle Ersion of High-Performance Thermoplastic Polymers, Journal of Materials Science, 43, 1757-1768.
- Anand, K. ve Hovis, S.K., 1987. Flux Effects in Solid Particle Erosion, Wear, 118, 243-257.
- Amirhaghi, S., Reehal, H.S., Wood, R.J.K. ve Weeler, D.W., 2001. Diamond Coating on Tungsten Carbide and Thier Erosive Wear Properties, Surface and Technology, 135, 126-138.
- Ally, S., 2010. Abrasive Jet Micro-Machining of Metals, Master Thesis, Ryerson University, Canada.
- Acar, D., Meriç, D., Budur, A.B., Gümruk, R., Sofuoğlu, H., Gedikli, H. ve Cora, Ö. N., 2017. Experimental Investigation on Particle Erosion Behavior of AA 6061 Alloy, 9th Ankara International Aerospace Conference, METU, Ankara, Türkiye.
- Avcu, E., Fidan, S., Yıldiran, Y. ve Sınmazçelik, T., 2013. Solid Particle Erosion Behavior of Ti-6Al-4V alloy, Tribology, 7, 201-210.
- ASTM G76-13, 2013. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets, ASTM International, West Conshohocken.
- Ay, İ., Sakin, R, 1998. Miller ve akslarda gözlenen hasarlar, Makina Dergisi, 22.
- Abouel-Kasem, A. ,Abd-elrhman, Y. M., Emara, K.M. ve Ahmed, S.M., 2010. Design and Performance of Slurry Erosion Tester, ASME Journal of Tribology, 132, 21601-10.
- Ay, İ., Sakin, R.1995. ‘Cıvatalı bağlantılarda gözlenen hatalar’, Mühendis ve Makina Dergisi, 17-20.

- Basu, B. ve Ghosh, S., 2017. Biomaterials for musculoskeletal regeneration, Springer, Singapor.
- Batchelor, A. W., Stachowiak, G.W., 1993. Engineering Tribology, 657-681, Amsterdam.
- Bayındır, M.K., 2009. Katı Parçacık Erozyon Aşınmasının Alüminyum Alaşımları Üzerindeki Etkisinin Deneysel olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Bağci, M., 2010. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Konya.
- Babu, B.G., Karthikeyan, P.N., Siva, K. ve Sabarinathan, C., 2016. Study of Erosion Characteristics of MWCNT'S-Alumina Hybrid Epoxy Nanocomposites Under the Influence of Solid Particles, Digital Journal of Nanomaterials and Biostructures, 11, No.4, 1367-1373.
- Bahadur, S. ve Badruddin,, R., 1990. Erdonet Particle Characterization and the Effect of Particle Size and Shape on Erosion, Wear, 138, 189-208.
- Barkoula, N.M. ve Karger-Kocsis, J., 2002. Review Processes and Influencing Parameters of the Solid Particle Erosion of Polymers and Their Compoistes, Journal of Materials Science, 37, 3807-3820.
- Bayramoğlu, G., 2005. Pleksiğlas Türü Malzemelerin UV Işınları ile Sertleşebilen Sol-Jel Tekniği Kullanarak Yüzey Özelliklerinin Modifiye Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, İstanbul.
- Bitter, J.G.A., 1963. A Study of Erosion Phenomena Part 2, Wear, 6, 169-190.
- Bitter, J.G.A., 1963. A Study of Erosion Phonemena Part 1, Wear, 6, 5-21.
- Bousser E., Martinu, L. Ve Klemberg- Sapieha, J.E., 2014. Solid Particle Erosion Mechanisms of Protective Coating for Aerospace Applications, Surface & Coating Technology, 257, 165-181.
- Buckley, D. H., 1981. Surface Effects in Adhesion, Friction, wear, and Lubrication, 5, 428-429, Elsevier Scientific Publishing Company, Netherlands.
- Bircan, B., 2014. Inconel 718 Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Budur, A. İ., 2018. Katı Parçacıkların Yüksek Hızlarda Oluşturduğu Erozyonun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon.
- Dodiya, V.K. ve Parmar, J., 2016. A study of various wear mechanism and its reduction method, International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 2:09, 242-248.
- Eyre. T. S., 1978. The Mechanisms of Wear, Tribology International, 1, 2, 91-96.
- Elleuch, K., Mezlini, S., Gueermazi, N., Kapsa, Ph., 2006. Abrasive wear of aluminium alloys rubbed against sand, Wear, 261, 1316-1321.
- Erorta, E. A., 2002. Determination of Mechanical Properties of Soda-Lime Glass by Various Mechanical Tests, Yüksek Lisans Tezi, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul.
- Fischer, A. ve Bobzin, K., 2009. Friction, Wear and Wear Protection, John Wiley & Sons.
- Finnie, I., 1995. Some Reflection on the Past and Future of Erosion, Wear, 186, 1-10.
- Finnie, I., 1958. The Mechanism of Erosion of Ductile Metals, Proc. 3rd U.S. National Congress of Applied Mechanics, 527-532.
- Fowler, G., Shipway, P.H. ve Pashby, I.R., 2005. Abrasive Water –Jet Controlled Depth Milling of Ti-6Al-4V Alloy- an Investigation of the Role of Jet-Workpiece Traverse Speed and Abrasive Grit Size on the Characteristics of the Milled Material, Journal of Materials Processing Technology, 161, 407-414.
- Garg, N. K., 2007. Guidelines For Use of Glass in Buildings, Handbook, New Age International Ltd., Publishers, New Delhi, India.
- Hosseini, P., Radziszewski, P., 2011. Combined stuedy of wear and abrasive fragmentation using steel Weel Abrasion Test, Wear, 271, 689-696.
- Hutchings, I. M., 2000. Solid Particle Erosive Wear Testings, ASM Handbook, 8, 338-345.
- Hutchings, I.M., 1987. Wear by Particulates, Chemical Engineering Science, 42, No. 4, 869-878.
- Kaplan, M., Uyaner, M., Avcu, E., Yildiran Avcu, E. Ve Karaoglanli, A. C., 2018. Solid Particle Erosion Behavior of Thermal Barrier Coatings Produced by Atmospheric Plasma Spray Technique, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 0, No. 0, 1-7.

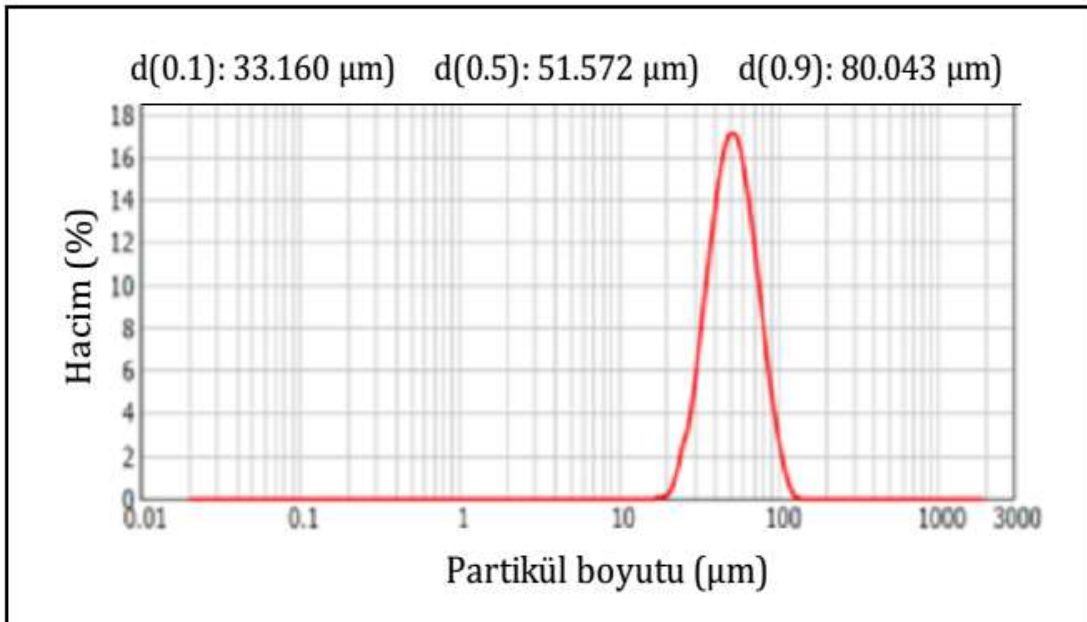
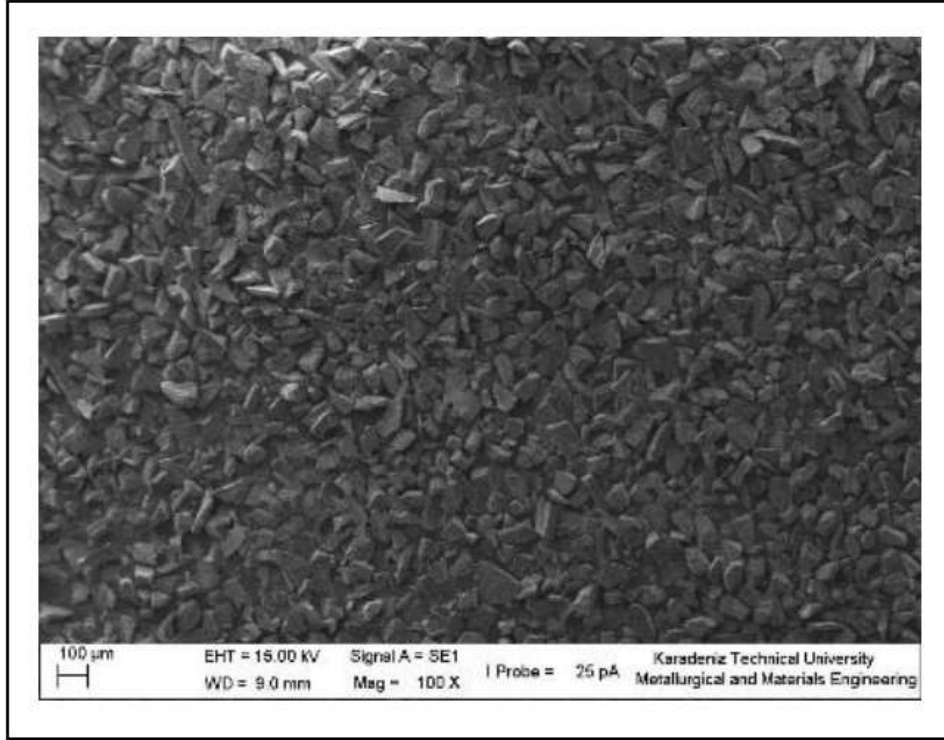
- Kaçkar, U., 2008. Otomotiv Camlarının Tepelenmesi ve Şekillendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Nâmik Kemal Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Tekirdağ.
- Khoddami, A., Salimi-Majd, D., Mohammadi, B., 2009. Finite Element and Experimental Investigation of Multiple Solid Particle Erosion on Ti-6Al-4V Titanium Alloy Coated by Multilayer Wear-Resistant Coating, Surface & Coating Technology.
- Kosa, E., 2016. Çeliklerin Erozif-Abrazif Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünü Aşınma Direncine Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Kaunda, R., Patnaik, A. ve Staphy, A., 2012. Solid Particle Erosion of Short Glass Fiber Reinforced Polyester Composite, American Journal of Materials Science, 2 (2), 22-27.
- Lin, N., Arabnejad, H., Shirazi, S.A., Mclaury, B.S. ve Lan, H., 2018. Experimental Study of Particle Size, Shape and Particle Flow Rate on Erosion of Stainless Steel, Power Technology, 336, 70-79.
- Ludema, K.C., 1996. Friction, Wear, Lubrication, A Textbook in Tribology, USA.
- Morrison, C.T. ve Scattergood, R.O., 1986. Erosion of 304 Stainless Steel, Wear, 111, 1-13.
- Tabakoff, W. ve Vittal, B.R., 1983. High Temperature Erosion Study of INCO 600 Metal, Wear, 86, 89-99.
- Monga, A, Gumber, S ve Grover, H, 2018. Study of Abrasion Wear and Factors Affecting Wear Rate, Internationa Journal of Advance Research in Science and Engineering, 7, 6, 113-120.
- Miyazaki, N. ve Takeda, N., 1993. Solid Particle Erosion of Fiber Reinforced Plastics, Journal of Composite Materials, 27, 21-31.
- MIL STD 3033, 2010. Particle/Sand Erosion Testing of Rotor Blade Protective Materials, U.S. Army Research Laboratory, Weapon and Materials Research Directorate, Materials Manufacturing Technology Branch, Specification and Standard Office, Aberdeen.
- Nilkar, K. M., Runwal, A. S., Bhole, N.S., Jaagtap, P. R., ve Nandre, B. D., 2017. Experimental Study and Analysis of Slurry Erosion Wear of SS304L Material, 6th National Conference RDME, 29-34, Pune, India.

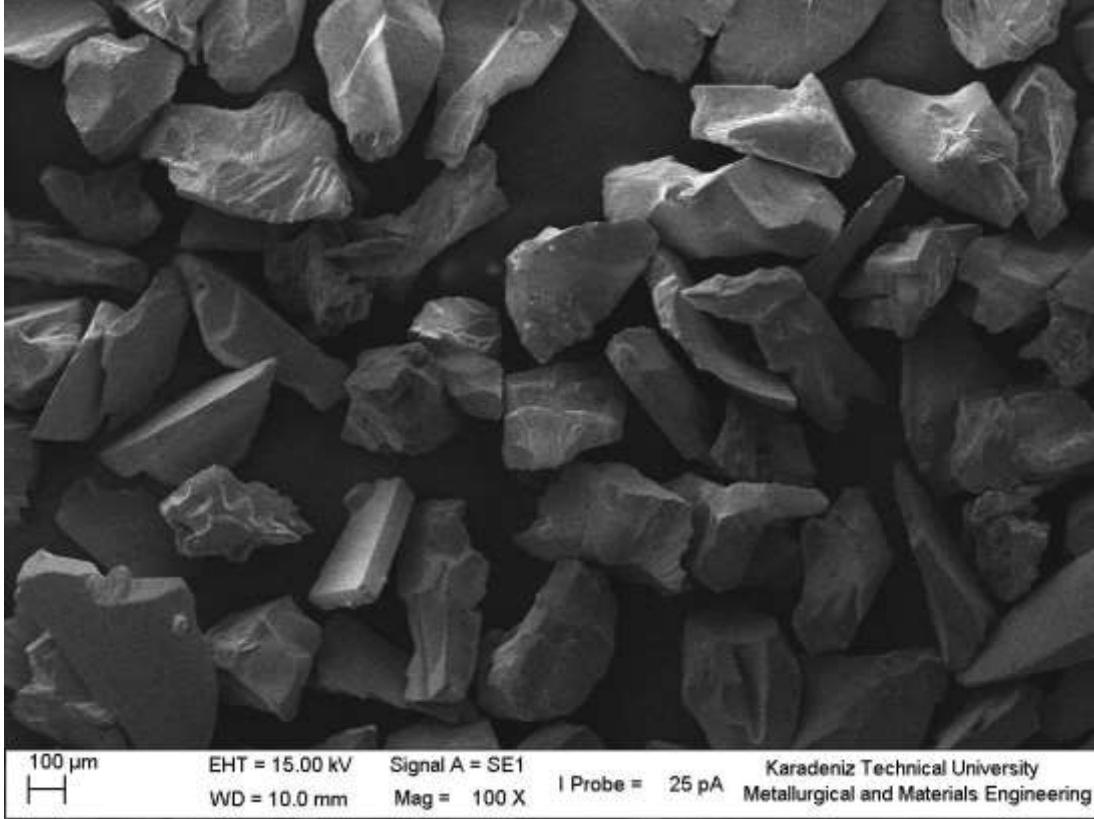
- O'Flynn, D.J., Bingley, M.S., Bradley, M.S.A. ve Burnett, A.J., 2001. A Model to Predict the Solid Particle Erosion Rate of Metals and its Assessment Using heat-Treated Steels, Wear, 248, 162-177.
- Oka, Y.I., Okamura, K. ve Yoshida, T., 2005. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact Part 1: Effects of Impact Parameters on a Predictive Equation, Wear, 259, 95-101.
- O'Regan, C., 2015 Structural use of Glass in Buildings (Second Edition), Handbook, The Institution of Structural Engineers, United Kingdom.
- Öndürücü, A. ve Kanbir, Ö., 2017. Bir Greyderin Dişli Rotunun Hasar Analizi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Dergisi, 10.
- Öndürücü, A., Kanbir, Ö., 2017. Bir greyderin dişli rotunu hasar analizi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Journal of Natural and Applied sciences, 21, 2, 599-606.
- Parsi, M., Najmi, K., Najafifard, F. ve Hassani, S., 2014. A Comprehensive Review of Solid Particle Erosion Modeling for Oil and Gas Wells and Pipelines Applications, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 21, 850-873.
- Pieters, R., Liu, S., 2001. Shortlisted Particle Erosion Resistance of Laser Nitrided Ti-6Al-4V, Surface Engineering, 17:2, 159-162.
- Ruff, A.W. ve Ives, L.K., 1975. Measurement of Solid Particle Velocity in Erosive Wear, Wear, 35, 195-199.
- Routbort, J.L. ve Scattergood, R.O., 1992. Solid Particle Erosion of Ceramics and Ceramic Composites, Key Engineering Materials, 71, 23-50.
- Batchelor, A, Stachowiak, 2005. Engineering Tribology, Third Edition, United States of America.
- Sheldon, G., Finnie, I., 1966. On the Ductile Behavior of Nominally Brittle Materials During Erosive Cutting, Journal of Engineering for Industry, 88, 387-392.
- Stachowiak, G. W., 2006. Wear-Materials, Mechanisms and Practice, England.
- Sinmazcelik, T. ve Sari, N. Y., 2010. Erodent Size Effect on the Erosion of Polyphenylene Sulfide Composite, Polymer Composites, 31, 985-994.
- Sundarajan, G. ve Roy, M., 1997. Solid Particle Erosion Behavior of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, Tribology International, 30, No. 5, 339-359.

- URL-1, Prof. Dr. Akgün Alsaran ders notları <https://docplayer.biz.tr/1841294-Hasar-analizi-prof-dr-akgun-alsaran.html> .29.Haziran 2019.
- URL-2, <https://www.polikarbonat.com/polikarbonat-nedir/> .13 Aralık 2019.
- URL-3, <http://kisi.deu.edu.tr/huseyin.yigiter/YM-I%20%2313%20CAMLAR.pdf> .16 Aralık 2019.
- URL-4, <https://www.sabic.com/en/products/polymers> . 19 Aralık 2019.
- URL-5, <http://plexi-form.com/pleksiglas-nedir-tanimi/> .19 Aralık 2019.
- URL-6, <http://www.sisecam.com.tr/tr> 20 Aralık 2019.
- Weeler, D.W. ve Wood, R.J.K., 2005. The Erosion of CVD Diamond by Diamond Particles, *Philosophical Magazine Letters*, 85:7, 367-375.
- Wright, K. H. R, 1969. The basic mechanisms of wear, *Tribology*, pp. 152-161.
- Yıldıran, Y., Avcu, E., Şahin, A.E., Fıdan, S., Yetiştiren, H. ve Sınmazçelik, T., 2013. Effect of Particle Impact Angle, Erodent Particle Size Acceleration Pressure on the Solid Particle Erosion Behavior of 3003 Aluminum Alloy, Proceedings of the 3rd International congress, Antalya, Türkiye.
- Yıldıran, Y., 2013. 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Zhou, J. ve Bahadır, S., 1995. Erosion- Corrosion of Ti-6Al-4V in Elevated Temperature Air Environment, *Wear*, 186-187, 332-339.
- Zum Gahr, K. H., 1987. Microstructure and Wear of Materials, 1st Edition, Elsevier, 10, 84-87, Amsterdam.

7. EKLER

Ek-1. Alümina Oksit Aşındırıcı Parçacık Metalografik ve Boyut Dağılımı

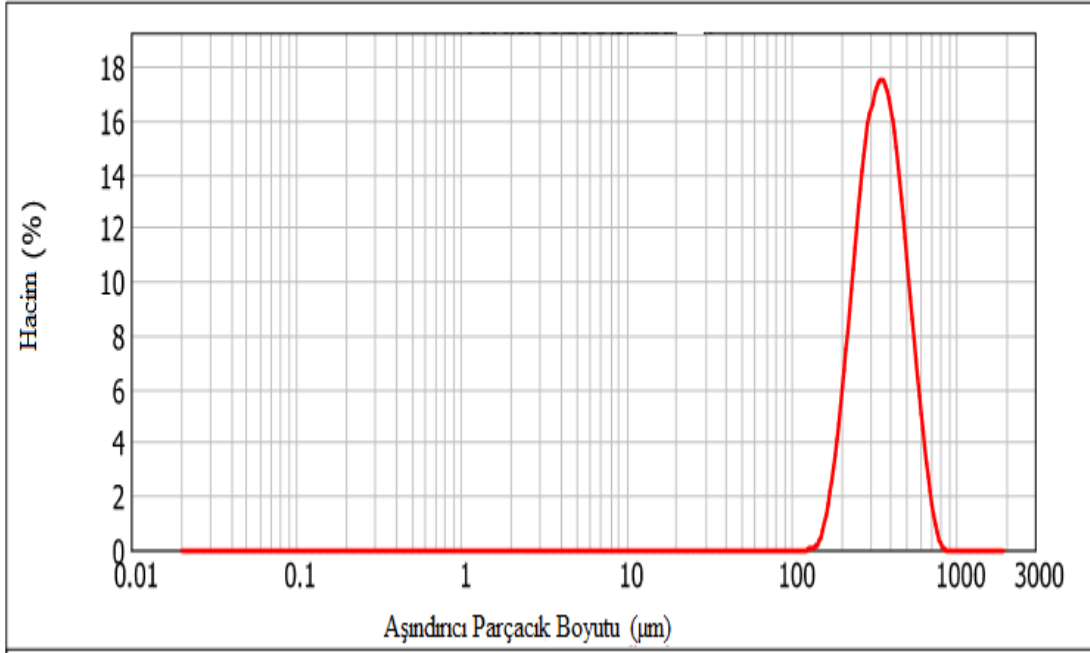


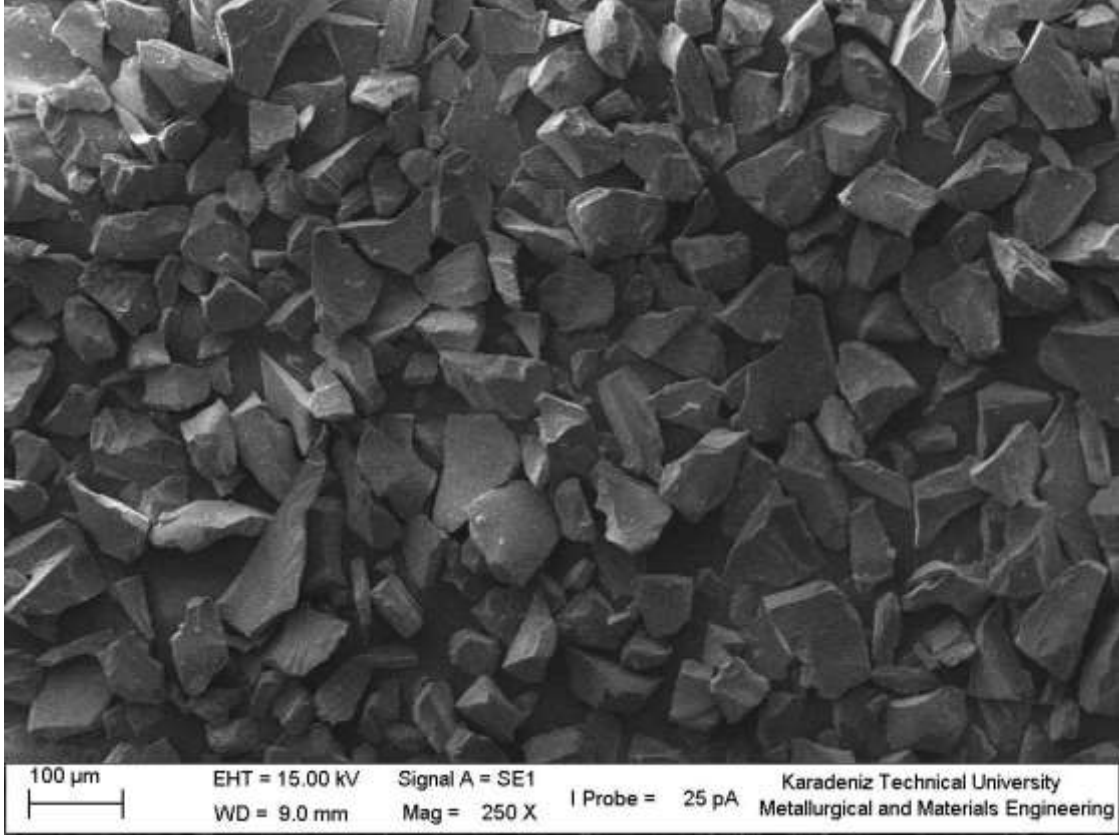
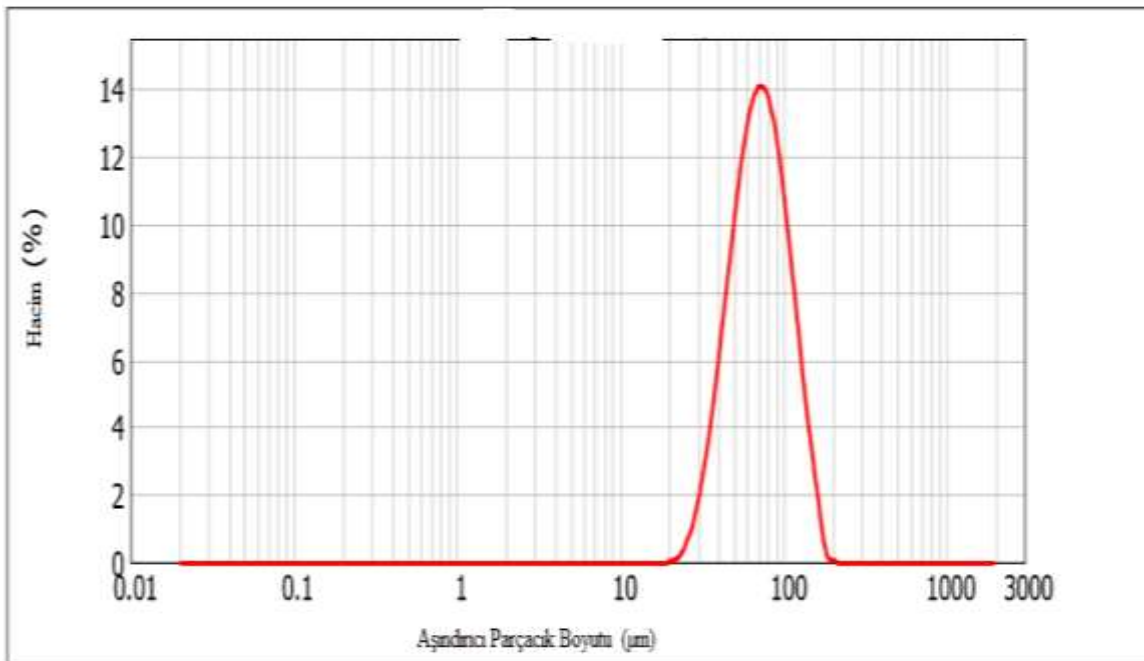
Ek-2. Silika (SiC-60 grit) Aşındırıcı Parçacık Metalografik ve Boyut Dağılımı

d(0.1): 226.988 µm

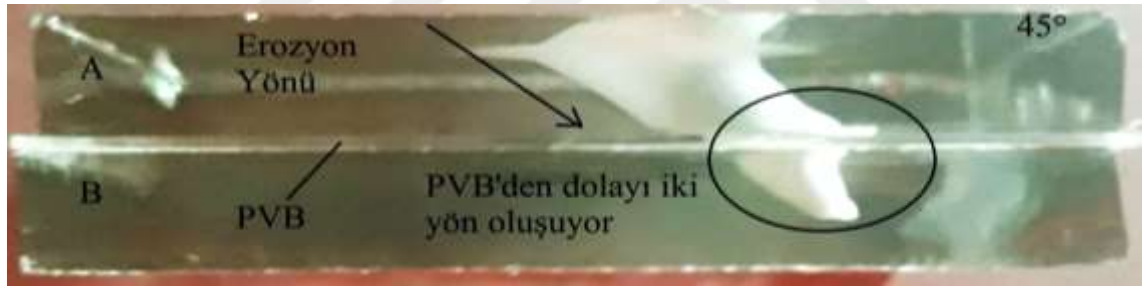
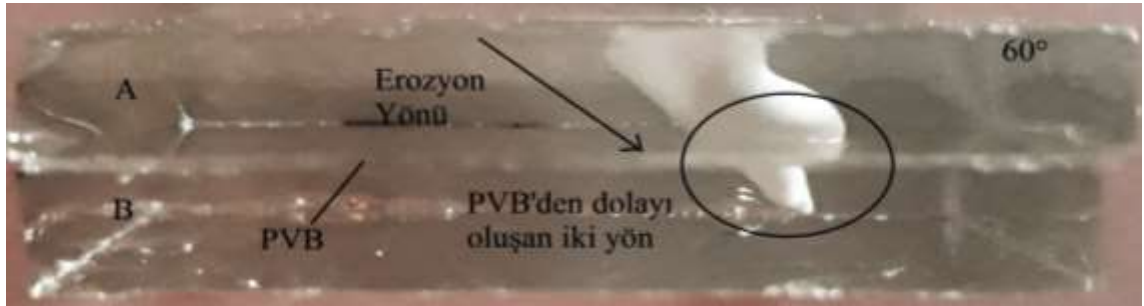
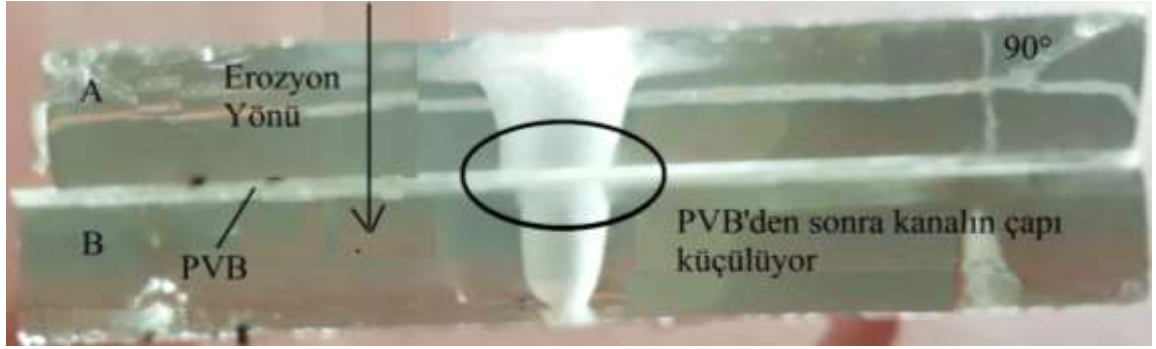
d(0.5): 348.068 µm

d(0.9): 532.874 µm

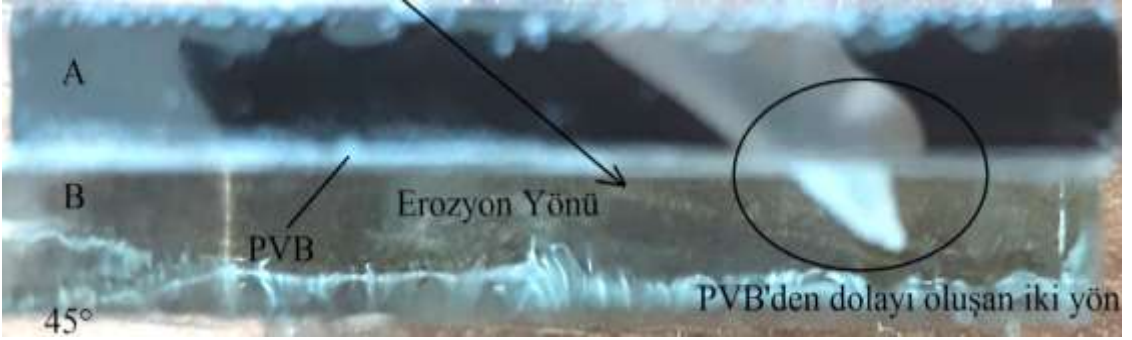
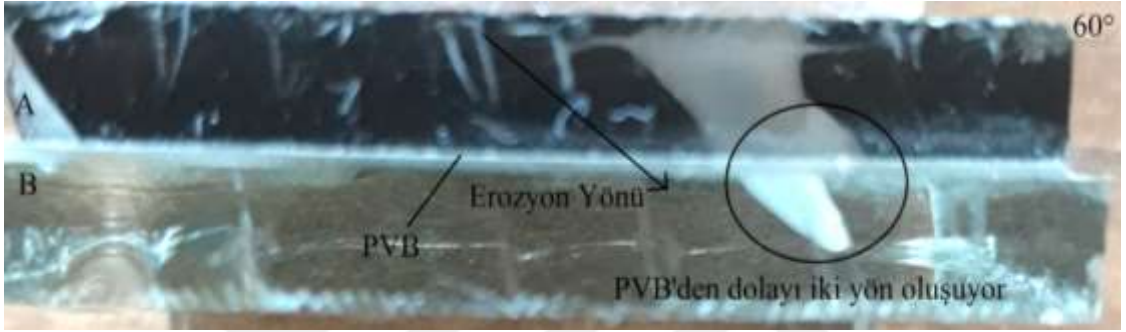
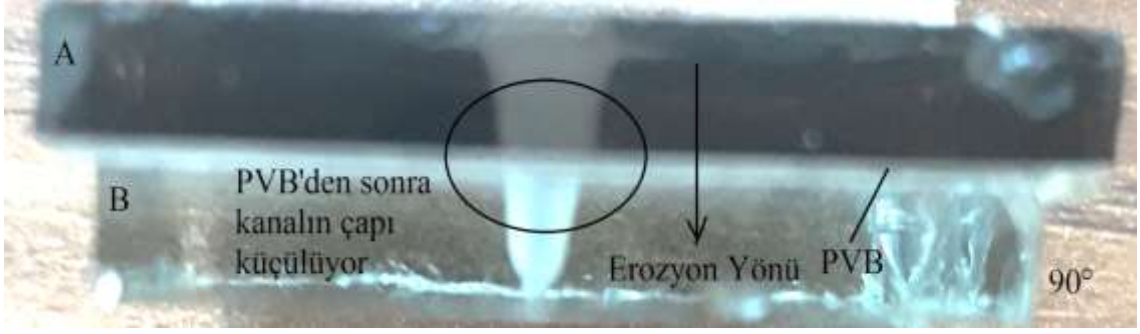


Ek-3. Silika (SiC-220 grit)Aşındırıcı Parçacık Metalografik ve Boyut Dağılımı $d(0.1)$: 41.497 μm $d(0.5)$: 71.554 μm $d(0.9)$: 120.131 μm 

Ek-4. Renksiz Lamine Cam Malzemenin Görüntüleri



Ek-5. Siyah Lamine Cam Malzemenin Görüntüleri

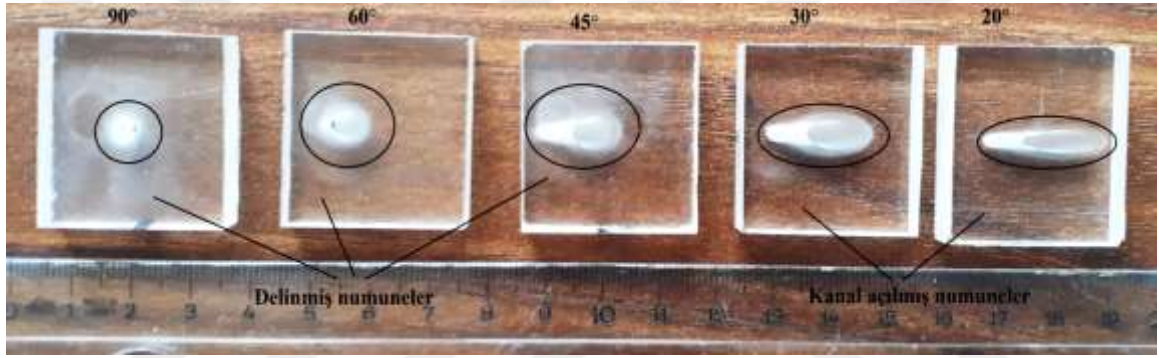


Ek-6. Numunelerin Aşınma Yüzeyinden Görüntüleri

Polikarbonat (Polycarbonate Solid Sheet) Malzemenin Görüntüleri



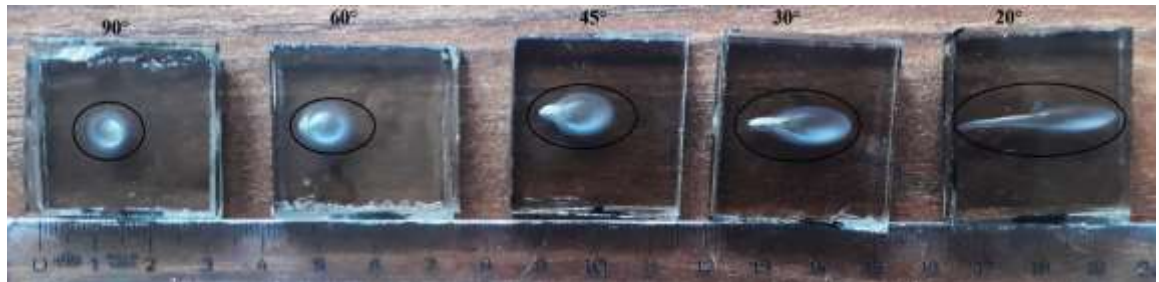
Pleksiglas (Polymethylmethacrylate) Malzemenin Görüntüleri



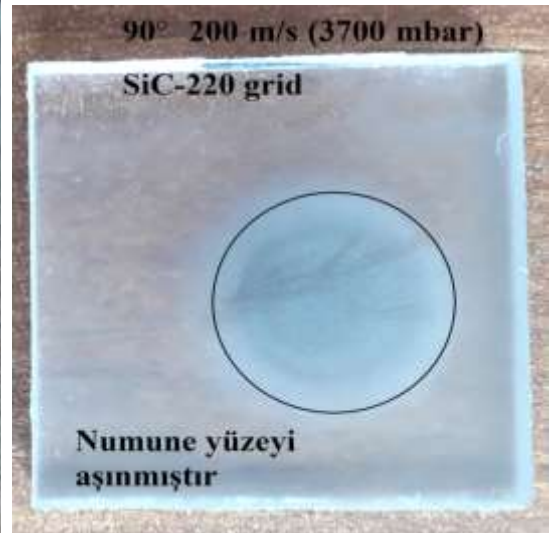
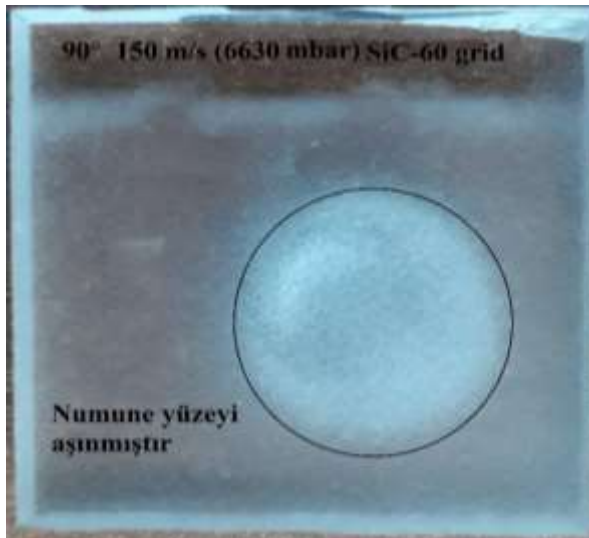
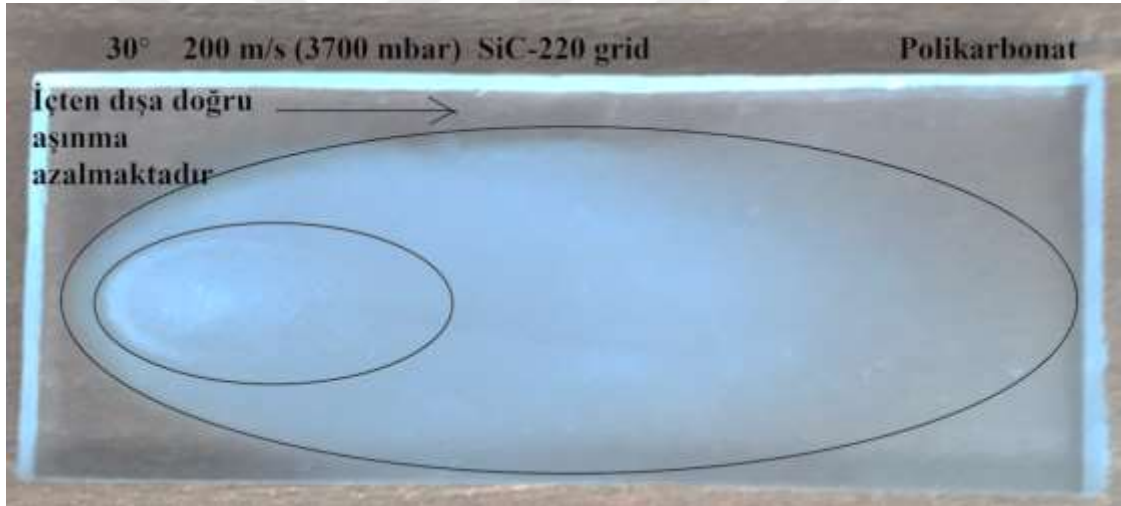
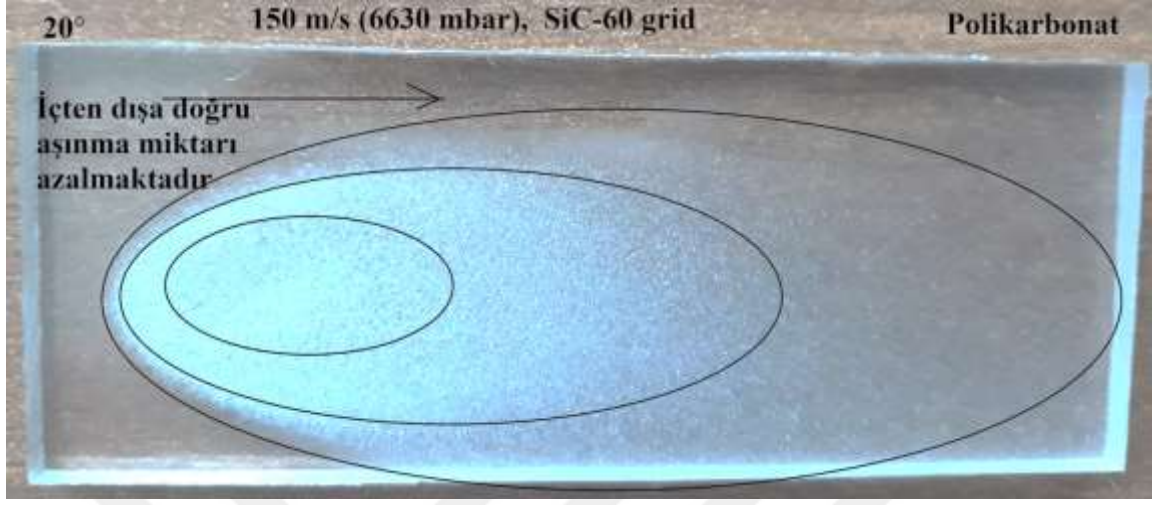
Renksiz Lamine Cam Malzemenin Görüntüleri

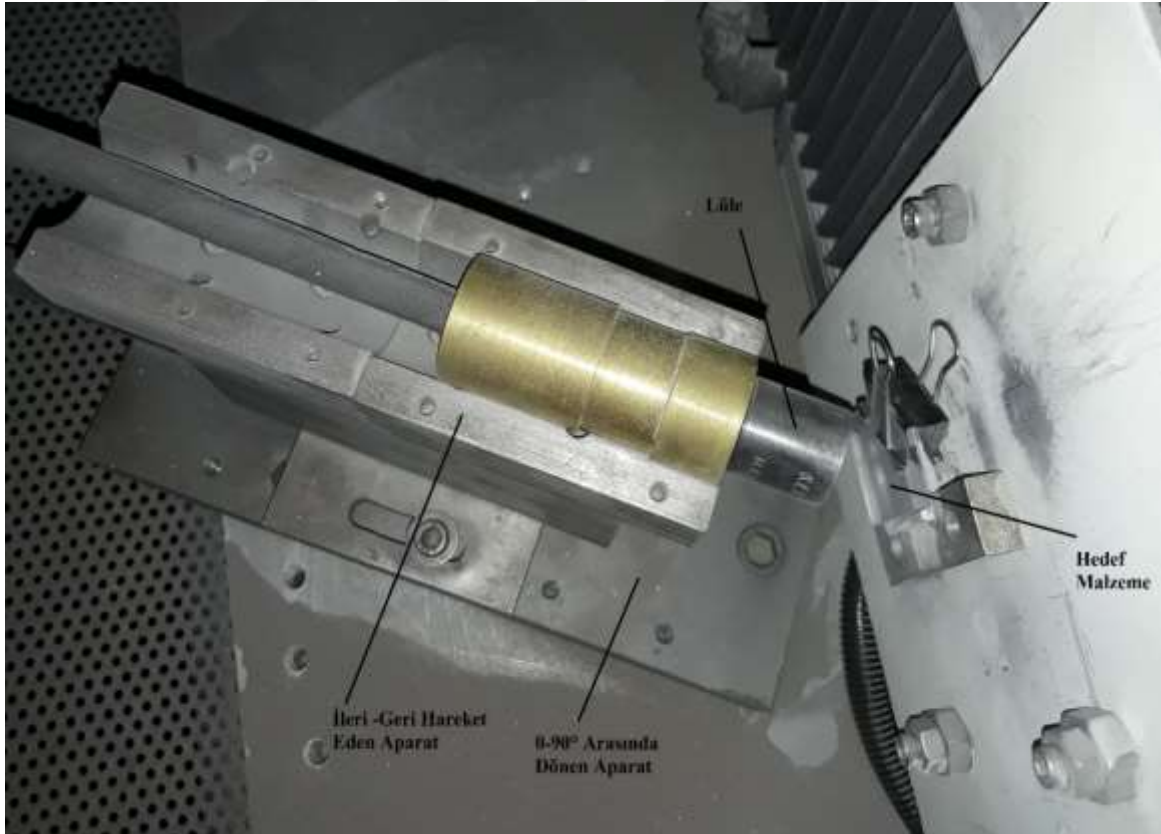


Siyah Lamine Cam Malzemenin Görüntüleri



Ek-7. Polikarbonat (Polycarbonate Solid Sheet) Farklı Boyutlu Aşındırıcı Parçacık Erozyon Davranışlarının Görüntüleri



Ek-8. Aşındırıcı Parçacıkların Görüntüleri**Test Esnasından Bir Görüntü**

ÖZGEÇMİŞ

Mohammad Hussain Danesh, 28 Mart 1991 Afganistan'de doğdu. Orta öğretimini İran'da tamamlamıştır. 2011 yılında T.C. Bursu kazanmış ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başlamıştır. 2016 yılında mezun olduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsünde Mekanik Anabilimdalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2019 yılından beri Nizip Artı Fen/Anadolu Koleji'nde İngilizce öğretmeni olarak çalışmaktadır. Anadili Farsça olup, iyi derece Türkçe ve İngilizce bilmektedir.

