

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KESTAMİD VE KOMPOZİTLERİNİN EROZİF AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

SEDEN EZGİ AKPINAR

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KESTAMİD VE KOMPOZİTLERİNİN EROZİF AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

SEDEN EZGİ AKPINAR

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof. Dr. Adalet ZEREN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Cihan KABOĞLU
Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışması herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Seden Ezgi Akpınar

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma iznini Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

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

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Seden Ezgi Akpınar

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde otomotiv, havacılık ve birçok sektörde önem arz eden katı partikül erozyonu yüzey pürüzlendirme, yüzey temizleme gibi fayda sağlayan uygulamalarda kullanılırken malzemelerin çalışma ortamlarında çevreden kaynaklandığında şiddetli erozyon aşınması meydana getirerek parçaların hasara uğramasına, hesaplanmış ömürlerinden daha kısa sürelerde ömrünü tamamlamasına dolayısıyla da parça değişimi, iş ve zaman kaybı, enerji kaybı gibi büyük maddi kayıplara yol açtığı ve önlenmediği takdirde can kayıplarına sebep olabildiğinden istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle katı partikül erozyonuna etki eden operasyon parametreleri, aşındırıcı partikül özellikleri, hedef malzemenin özellikleri ve ortam koşullarının malzemenin katı partikül erozyonu davranışına etkisi iyi bilindiği takdirde hem bu gibi olumsuz durumlardan nasıl kaçınılabileceği hem de istenilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilebilmesi ve yüzey temizleme gibi fayda sağlayan işlemler için hangi koşul ve parametreler altında kullanılması gerektiği bilinmiş olur. Bu çalışmada yukarıda ifade edilen amaçlar doğrultusunda saf kestamid ve kompozitlerinin eroziv aşınma davranışları incelenmiştir.

Yüksek Lisans Tez çalışmam boyunca değerli fikirlerinden yararlandığım, sahip olduğu bilgi birikimi ile bana yol gösteren, yardım ve desteklerini eksik etmeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince yardımcı olan Arş. Gör. Orkan Baran KORKUSUZ ve Arş. Gör. Pelin ÖZZAİM'e, hayatım boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen anne ve babama, hep yanımda olan ve bana cesaret veren kardeşim İrem Özge AKPINAR'a çok teşekkür ederim.

Haziran – 2022

Seden Ezgi AKPINAR

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
ÖZET	xx
ABSTRACT	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. KATI PARTİKÜL EROZYONU	3
2.1. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Parametreler	5
2.1.1. Hedef Malzeme Özellikleri	6
2.1.1.1. Katı Partikül Erozyonuna Göre Malzemelerin Sınıflandırılması	6
2.1.2. Aşındırıcı Partikül Özellikleri	12
2.1.2.1. Partikül Şekli	13
2.1.2.2. Partikül Türü ve Sertliği	15
2.1.3. Partikül Çarpma Açısı	18
2.1.4. Püskürtme Basıncı ve Partikül Hızı.....	27
2.1.4.1. Döner Disk Metodu ile Partikül Çarpma Hızı Ölçümü	37
2.1.5. Partikül Boyutu.....	39
2.1.6. Partiküllerin Kütlesel Debisi	46
2.1.7. Maruz Kalma Süresi	48
2.1.8. Püskürtme Mesafesi.....	50
2.1.9. Nozul Tasarımı	52
2.1.10. Sıcaklık ve Nem.....	57
3. POLİMER MALZEME	59
3.1. Polimerlerde Katı Partikül Erozyonu	67
3.2. Poliamid (PA) Malzeme	90
3.2.1. Poliamid Malzemelerde Katı Partikül Erozyonu.....	93
3.2.2. Kestamid Malzeme	97
3.2.3. Kestoil Malzeme.....	99
3.2.4. Kestlub Malzeme	101
3.2.5. Literatürde Kestamid, Kestoil ve Kestlub Malzemeye İlgili Yapılan Çalışmalar	102
4. KOMPOZİT MALZEME	110
4.1. Kompozit Malzemelerde Katı Partikül Erozyonu	112
5. MALZEME VE YÖNTEM	155
5.1. Malzeme Seçimi	155
5.2. DeneySEL Kurulum.....	157
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	162
6.1. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debi ve Erozyon Oranlarının Hesaplanması	162
6.2. Çarpma Açısına Bağlı Olarak Erozyon Oranları	163
6.3. Basınca Bağlı Olarak Erozyon Oranları	167

6.4. Maruz Kalma Süresine Bağlı Olarak Erozyon Oranları	170
6.5. Mekanik Özelliklere Bağlı Olarak Erozyon Oranları	172
6.6. Numunelerin Topografya Görüntüleri	172
6.7. Numunelerin Pürüzlülük Değerleri	175
7. SONUÇLAR	181
KAYNAKLAR	183
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	190
ÖZGEÇMİŞ	191



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Katı partikül erozyonu düzeneği	3
Şekil 2.2.	CF/PC kompozitlerinin 2 dakikalık katı partikül erozyonundan önce ve sonra a) çekme özelliği, b) eğilme özelliği değişimi	5
Şekil 2.3.	Katı partikül erozyonuna etkisi olan parametreler	5
Şekil 2.4.	Sünek ve gevrek malzemelerde katı partikül erozyonu karakteristikleri	7
Şekil 2.5.	Şematik olarak malzemeye göre erozyondaki tipik davranışlar a) çarpma süresinin ağırlık kaybına etkisi, b) çarpma açısının ağırlık kaybına etkisi	9
Şekil 2.6.	Aşındırıcı partiküllerin gevrek malzeme üzerine çarpması nedeniyle meydana gelen erozyonun şeması	9
Şekil 2.7.	PDMS polimer malzemesine aşındırıcı partiküllerin gömüldüğünü gösteren SEM görüntüsü	10
Şekil 2.8.	AISI 316 numunesinin erozyon testlerinden önce ve sonra X-ışını kırınım sonuçları	11
Şekil 2.9.	Erozyon sonrası Ti-6Al-4V alaşımının optik mikroskop görüntüleri	11
Şekil 2.10.	Ti-6Al-4V, AA6061 ve SS304 malzemelerinin çarpma açısına bağlı erozyon oranları	12
Şekil 2.11.	Katı partikül erozyonunda kullanılan bazı aşındırıcı çeşitleri a) Çelik grit, b) Cam küre, c) Garnet, d) Alüminyum oksit beyaz	13
Şekil 2.12.	Aşındırıcı partiküllerin SEM fotoğrafları a) köşeli silisyum karbür (SiC), b) çelik yuvarlak kum (SRG), c) SiO ₂ (silika kumu) ve d) garnet	14
Şekil 2.13.	AISI D2 malzemesinde köşeli silisyum karbür ve çelik yuvarlak kum olmak üzere iki farklı aşındırıcı kullanılarak hedef malzemede zamana bağlı olarak meydana gelen malzeme kaybı grafiği a) 30°, b) 90° çarpma açısında	15
Şekil 2.14.	AISI 1020 çeliğinin aşınan yüzeyleri a) kalsit (CaCO ₃), b) apatit (Ca ₅ (PO ₄) ₃) (V= 80 m/s, α= 30°)	17
Şekil 2.15.	Beş tür aşındırıcı parçacık kullanılarak 30° ve 90° çarpma açılarında AISI 1020 çeliğinin erozyon oranları (Δ, α= 30°; ○, α= 90°)	17
Şekil 2.16.	Aşındırılmış AISI 1020 çeliği için artan erozyon oranı eğrisi a) apatit (Ca ₅ (PO ₄) ₃) partikülleriyle (parçacık boyutu= 180 µm, α= 90°, V= 80 m/s, T= 25°C), b) alümina (Al ₂ O ₃) partikülleriyle (parçacık boyutu= 250 µm, α= 90°, V= 80 m/s, T= 25°C)	18
Şekil 2.17.	AISI 1020 çeliğinin aşınan yüzeyleri a) çelik kum ile (ER= 5,3 x 10 ⁻⁴ g/g), b) çelik bilya ile (ER= 1,4 x 10 ⁻⁴ g/g) (V= 80 m/s, α= 30°)	18
Şekil 2.18.	Katı partikül erozyonunda çarpma açısı (α) şematik gösterimi	19
Şekil 2.19.	Çarpma açısının hedef malzeme erozyonuna etkisi a) küçük açı, b) büyük açı	19
Şekil 2.20.	Hedef malzemeyle temasta bulunan aşındırıcı partiküllere etki eden kuvvetler	20
Şekil 2.21.	Paralel ve normal yönlerdeki çarpma hızı bileşenleri	21

Şekil 2.22.	AA6061 alaşımı için 74 m/s çarpma hızında, farklı çarpma açılarında elde edilen test edilmiş numuneler üzerinde erozyon krateri ve izleri	22
Şekil 2.23.	AA6061 alaşımı için farklı çarpma açılarında test numunesi yüzeylerinden elde edilen optik mikrograflar a) 20°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 90°	23
Şekil 2.24.	AA6061 alaşımı için 74 m/s çarpma hızında, farklı çarpma açıları ve maruz kalma sürelerine bağlı olarak elde edilen erozyon oranları	23
Şekil 2.25.	İki farklı aşındırıcıyla aşınan AISI D2 malzemesinin çarpma açısına bağlı olarak toplam erozyon oranı grafiği.....	24
Şekil 2.26.	SS304 malzemesi için 100 m/s çarpma hızında ve farklı çarpma açılarında maruz kalma süresine bağlı olarak erozyon miktarları	25
Şekil 2.27.	CFRP-metal tel hibrit takviyeli kompozitin çarpma açısına bağlı olarak a) erozyon oranları, b) erozyon krater hacimleri.....	26
Şekil 2.28.	Farklı çarpma açılarında aşınmış CFRP-metal tel hibrit takviyeli kompozitin 3D yüzey pürüzlülük haritaları a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°	27
Şekil 2.29.	60° çarpma açısında çarpma hızının PEEK polimer malzeme ve çeşitli polimer matrisli kompozit malzemelerin kararlı durum erozyon oranına etkisi	29
Şekil 2.30.	Çarpma hızının bir fonksiyonu olarak çeşitli polimerlerin kararlı durum erozyon oranları	30
Şekil 2.31.	Farklı parçacık boyutu ve çarpma açılarındaki katı partikül erozyonunda çarpma hızının erozyon oranına etkisi a) 30°, b) 60°, c) 90° çarpma açısında	31
Şekil 2.32.	Ti-6Al-4V alaşımının 90° çarpma açısında, farklı maruz kalma sürelerinde çarpma hızına bağlı olarak erozyon miktarları.....	31
Şekil 2.33.	90° çarpma açısında, farklı çarpma hızları için numunelerde meydana gelen krater görüntüleri a) AA6061, b) SS304, c) Ti-6Al-4V.....	32
Şekil 2.34.	30° çarpma açısı için çarpma hızının erozyon oranına etkisi a) N66 ve onun kompozitleri, b) ABS ve onun kompozitleri	32
Şekil 2.35.	Çarpma hızının kompozitlerin erozyon oranına etkisi	33
Şekil 2.36.	Farklı basınçlarda maruz kalma süresinin bir fonksiyonu olarak GFRP kompozitin ağırlık kaybı (60° çarpma açısında)	34
Şekil 2.37.	15° çarpma açısında aşınmış yüzeylerin SEM mikrografları a) 20 m/s, b) 60 m/s.....	34
Şekil 2.38.	Farklı çarpma hızları için çarpma açılarının bir fonksiyonu olarak PPS kompozitinin erozyon oranları	35
Şekil 2.39.	Farklı çarpma hızları ve 30° çarpma açısında aşındırıcı parçacığın kümülatif ağırlığının bir fonksiyonu olarak PEKK için erozyon oranları	35
Şekil 2.40.	AA6061 alaşımı için farklı çarpma hızlarında erozyon oranları (300 mbar= 74 m/s, 680 mbar= 100 m/s, 2100 mbar= 150 m/s, 4000 mbar= 195 m/s)	36

Şekil 2.41.	90° çarpma açısında farklı çarpma hızlarına bağlı olarak erozyon kraterinde meydana gelen maksimum derinlik değerleri (300 mbar= 74 m/s, 680 mbar= 100 m/s, 2100 mbar= 150 m/s, 4000 mbar= 195 m/s)	37
Şekil 2.42.	a) Döner disk partikül hızı ölçme sistemi, b) Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler.....	38
Şekil 2.43.	Partikül hız ölçümü için kullanılan metodolojinin şematik diyagramı.....	38
Şekil 2.44.	Alümina aşındırıcı partiküllerinin SEM fotoğrafları a) 60 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh	39
Şekil 2.45.	Farklı boyutlardaki köşeli Al ₂ O ₃ aşındırıcı partikülleri tarafından aşındırılan bismaleimid (BMI) polimerinin aşındırıcı miktarına bağlı olarak erozyon oranları (○): 42 µm, (●): 63 µm, (△): 143 µm, (▲): 390 µm	40
Şekil 2.46.	Farklı çarpma hızlarında partikül boyutunun Teflonun erozyon oranına etkisi (çarpma açısı= 30°)	41
Şekil 2.47.	Çalışmada kullandıkları aşındırıcıların morfolojisi a) 45–75 µm, b) 150–212 µm, c) 300–425 µm.....	42
Şekil 2.48.	Farklı çarpma açılarındaki aşındırıcı boyutuna bağlı olarak numunelerin aşınma oranları (maruz kalma süresi= 1 saat).....	42
Şekil 2.49.	Aşındırıcı partikül boyutu ile erozif aşınmanın değişimi.....	43
Şekil 2.50.	Farklı aşındırıcı boyutlarının nozul içindeki hızları.....	44
Şekil 2.51.	Farklı partikül boyutlarında çarpma açısına göre numunelerin erozyon oranları a) 1,5 bar, b) 3 bar	45
Şekil 2.52.	45° çarpma açısı, 3 bar püskürtme basıncında yüzey dokusunun izometrik görünümü a) 60 mesh aşındırıcı parçacık, b) 120 mesh aşındırıcı parçacık	46
Şekil 2.53.	1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında pürüzlülük ortalaması ile çarpma açısı arasındaki ilişki a) 120 mesh, b) 60 mesh.....	46
Şekil 2.54.	Çalışmada kullanılan kompozitlerin maruz kalma süresine bağlı olarak erozyon oranları (aşındırıcı boyutu= 72 µm, çarpma açısı= 90°, çarpma hızı= 100 m/s)	49
Şekil 2.55.	Maruz kalma süresine bağlı olarak AA6061 alaşımının 74 m/s çarpma hızında erozyon oranları	49
Şekil 2.56.	Farklı maruz kalma sürelerinde çarpma açısının bir fonksiyonu olarak GFRP kompozitin ağırlık kaybı (3,5 bar çarpma basıncında)	50
Şekil 2.57.	Çeşitli püskürtme mesafeleri altında nozul girişinden hedef malzemeye gelen gaz ve partikül hız konturları (partikül boyutu= 206 µm, ivmelenen basınç= 3 bar)	51
Şekil 2.58.	Farklı partikül boyutlarında nozul ve hedef malzeme arasındaki mesafeye bağlı olarak erozyon oranları (30° çarpma açısı, 50 m/s çarpma hızında)	52
Şekil 2.59.	Nozul çapının kütle akış oranı (aşındırıcı/hava) ve partikül hızına etkisi	53
Şekil 2.60.	Çalışmada kullanılan çeşitli nozul geometrileri	54
Şekil 2.61.	Farklı nozul geometrilerinin partikül çarpma hızına etkisi	55
Şekil 2.62.	Çalışmada kullandıkları nozulların geometri ve ölçüleri	56

Şekil 2.63.	Farklı geometriye sahip nozulların a) partikül hızları, b) erozyon oranları	56
Şekil 2.64.	Farklı çıkış çapına sahip nozullar kullanılarak numune yüzeylerinden elde edilen hasar kraterlerinin topografyaları a) 5-3 nozulu, b) 5-5 nozulu	56
Şekil 2.65.	Test sıcaklığının bir fonksiyonu olarak malzemelerin Vickers sertliği a) SUS403 için, b) SUS630 için.....	58
Şekil 2.66.	Yüksek sıcaklıkta malzemelerin çekme testi sonuçları a) SUS403 için, b) SUS630 için.....	58
Şekil 2.67.	Çeşitli test sıcaklıklarında çarpma açısının bir fonksiyonu olarak erozyon oranı a) SUS403 için, b) SUS630 için.....	58
Şekil 3.1.	Mühendislikte malzeme sınıflandırılması	59
Şekil 3.2.	Çelik malzemeye göre termoplastik, alüminyum ve seramiklerin özelliklerinin kıyaslanması.....	60
Şekil 3.3.	Polimerlerin kimyasal mimarisi a) doğrusal, b) dallanmış, c) çapraz, d) ağ	62
Şekil 3.4.	Polimer ve kompozitlerin erozif aşınma performansına etki eden parametreler	68
Şekil 3.5.	Katı partikül erozyonunun olası mekanizmaları a) düşük çarpma açılarında aşınma, b) düşük hız, yüksek çarpma açısı sırasında yüzey yorulması, c) orta hız, yüksek çarpma açısı sırasında çoklu plastik deformasyon veya gevrek kırılma, d) yüksek çarpma hızlarında yüzey erimesi, e) ikincil etkileri olan makroskopik erozyon	71
Şekil 3.6.	Polimerlerin çarpan aşındırıcı partiküllerin kümülatif ağırlığına bağlı olarak tipik erozyon davranışları.....	72
Şekil 3.7.	Çeşitli çapraz bağ derecelerine sahip PE numuneleri için çarpma açısının bir fonksiyonu olarak erozyon oranları.....	73
Şekil 3.8.	EP/HD-PUR sistemleri için çapraz bağ yoğunluğunun (v) bir fonksiyonu olarak erozyon oranları	74
Şekil 3.9.	HD-PUR ile modifiye edilmiş EP malzemeleri için a) Mc'nin bir fonksiyonu olarak kırılma enerjisinin (G_{IC}) değişimi, b) G_{IC} 'nin bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybının değişimi	75
Şekil 3.10.	Çeşitli oranlarda HD-PUR ile modifiye edilmiş EP malzemelerin çarpma açısına bağlı ağırlık kayıpları	76
Şekil 3.11.	Çeşitli polimerlerin farklı çarpma açıları ve çarpma hızlarında kararlı durum erozyon oranları ile çeşitli özellikleri arasındaki ilişki a) sertlik (HV) ile, b) kırılma tokluğu (H/K_{IC}) ile, c) kırılma enerjisi (H/G_{IC}) ile, d) camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ile	78
Şekil 3.12.	Polimerler ve polimer kompozitlere karşılık gelen rejimleri gösteren sertlik-erozyon verimliliği haritası	80
Şekil 3.13.	Malzemelerin farklı çarpma açılarında kümülatif aşındırıcı ağırlığına bağlı olarak erozyon oranları a) 15° , b) 30° , c) 90°	84
Şekil 3.14.	Çarpma açısının çeşitli polimerlerin erozyon oranına etkisi.....	85
Şekil 3.15.	Farklı çarpma hızları ve çarpma açılarında çeşitli polimerlerin kararlı durum erozyon oranını gösteren histogramlar a) 30° çarpma açısında, b) 90° çarpma açısında	85

Şekil 3.16.	Farklı partikül boyutunda çarpma açısı ve çarpma hızına bağlı olarak erozyon oranları a) 500–600 µm, b) 355–500 µm, c) 300–355 µm	86
Şekil 3.17.	PAEK matrislerinin 39 m/s çarpma hızında çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları (A malzemesi: PEEK, F malzemesi: PEK, J malzemesi: PEKK)	87
Şekil 3.18.	30° ve 90° çarpma açılarındaki NR için çarpma açısı ve hızına bağlı olarak erozyon oranındaki değişim	88
Şekil 3.19.	30° ve 90° çarpma açılarındaki NR ve ENR50 için aşındırıcı kütlelerine bağlı olarak ağırlık kaybındaki değişim	89
Şekil 3.20.	30° çarpma açısı ve 100 m/s çarpma hızında aşınmış bir NR numunesinin aşınmış alanından bir kesitin SEM mikrografı (erozyon yönü sağdan)	89
Şekil 3.21.	90° çarpma açısında ve 100 m/s çarpma hızında erozyon sırasında çeşitli aşamalarda NR numunelerinin yüzeyinin SEM mikrografları a) 0,1 g sonra, b) 0,5 g sonra, c) 5 g sonra, d) 200 g sonra (kararlı hal)	90
Şekil 3.22.	Poliamid dişli	91
Şekil 3.23.	PA 6 ve PA 6.6 düz ve cam fiber takviyeli tiplerinin nem doyma oranları	93
Şekil 3.24.	80 m/s çarpma hızında aşındırıcının kümülatif ağırlığının bir fonksiyonu olarak erozyon oranları (A= PA 6, B= PA 11, C= PA 12 (L 16), D= PA 12 (L 20), E= PA 66, F= PA 66/610 ve G= aromatik PA) a) 15°, b) 30°, c) 60°, d) 90° çarpma açısında.....	95
Şekil 3.25.	80 m/s çarpma hızında çarpma açısının bir fonksiyonu olarak kararlı durum erozyon oranları (A= PA 6, B= PA 11, C= PA 12 (L 16), D= PA 12 (L 20), E= PA 66, F= PA 66/610 ve G= aromatik PA)	96
Şekil 3.26.	Saf N66 poliamid malzemesinin ve takviyeli kompozitlerinin çarpma açısına bağlı erozyon oranları.....	96
Şekil 3.27.	Kestamid malzeme kullanım alanları a) hadde yatak ve kızaklarında, b) makara ve kasnaklarda, c) çeşitli makine parçalarında, d) yatak ve burçlarda, e) dişli çarklarda	99
Şekil 3.28.	Kestoil malzeme	100
Şekil 3.29.	Kestlub malzeme	101
Şekil 3.30.	Kuru numune ile 1 gün farklı ortamlarda bekletilen numunelerin darbe dirençlerinin karşılaştırılması a) kestamid malzeme, b) kestoil malzeme	105
Şekil 3.31.	Kestamid malzeme yüzey SEM görüntüleri a) konvansiyonel AWJT, b) su altı AWJT	106
Şekil 3.32.	Aşınma testlerinde numunelerin kayma mesafesi ve yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı değişimi a) standart PA 6, b) PA6G+Yağlayıcı, c) PA6G+Isıya Dayanıklı.....	107
Şekil 3.33.	Aşınma testinden sonra elde edilen aşınmış yüzeylerin dijital fotoğrafları a) özel katı yağlayıcı dolgulu PA 6, b) MoS ₂ dolgulu PA 6, c) doğal PA 6	108

Şekil 3.34.	Aşınma testleri sırasında her malzeme için ölçülen a) ortalama sürtünme katsayısı, b) ağırlık kaybı	109
Şekil 4.1.	Kompozitlerin sınıflandırılması a) fiber takviyeli, b) partikül takviyeli, c) tabakalı	110
Şekil 4.2.	Fiber takviyeli kompozitlerde fiber dizilimleri a) örgülü fiber takviyesi, b) sürekli fiber takviyesi, c) yönlenmiş süreksiz fiber takviyesi, d) rastgele dağılmış süreksiz fiber takviyesi	111
Şekil 4.3.	Partikül takviyeli kompozit yapısını gösteren şematik görünüm	111
Şekil 4.4.	CF/PC kompozitinde çarpma açısına bağlı olarak meydana gelen ağırlık kayıpları	114
Şekil 4.5.	Farklı çarpma açılarındaki erozyon süresinin bir fonksiyonu olarak PPS kompozitinin ağırlık kaybı ($v = 60$ m/s).....	115
Şekil 4.6.	60° çarpma açısında, karbon fiber takviyeli PEEK (CF/PEEK) kompozit numunesinin matrisin kaldırıldığı erozyon hasarının SEM görüntüsü	116
Şekil 4.7.	15° çarpma açısında, x500 büyütmede karbon fiber epoksi kompozit numunesinin fiberlerin açığa çıktığı erozyon hasarının SEM görüntüsü	117
Şekil 4.8.	90° çarpma açısında, karbon fiber takviyeli PEKK (CF/PEKK) kompozit numunesinin fiberlerin açığa çıktığı erozyon hasarının SEM görüntüsü	117
Şekil 4.9.	60° çarpma açısında, cam fiber takviyeli PEEK (GF/PEEK) kompozit numunesinde açıkta kalan fiberlerin kırılarak ortamdan uzaklaştırıldığı ve lokal olarak çıkarıldığı erozyon hasarının SEM görüntüsü	117
Şekil 4.10.	Karbon fiber epoksi kompozit numunesinin erozyon hasarının SEM görüntüsü a) 45° çarpma açısında, x500 büyütmede b) 45° çarpma açısında, x1000 büyütmede	118
Şekil 4.11.	15° çarpma açısında, x200 büyütmede karbon fiber epoksi kompozit numunesinin erozyon hasarının SEM görüntüsü	119
Şekil 4.12.	Fiber yüzeylerinin işlenmemiş (N6/GF FRP: A) ve işlenmiş (N6/GF FRP: B) olduğu durumda N6/GF kompozitlerinin çarpma açısına bağlı erozyon oranları.....	120
Şekil 4.13.	Fiber yüzeylerinin işlenme durumu ve fiber ağırlık içeriğine bağlı olarak UP termoset reçinesi ve onun kompozitlerinin çarpma açısına göre erozyon oranları	120
Şekil 4.14.	ABS termoplastik polimer ve onun takviyeli kompozitlerinin çarpma açısına bağlı erozyon oranları.....	122
Şekil 4.15.	Saf PEEK ve çeşitli polimer matrisli kompozitlerin çarpma açısına göre kararlı durum erozyon oranları (0° fiber oryantasyonu, 66 m/s çarpma hızı)	125
Şekil 4.16.	Çeşitli çarpma açılarındaki aşındırıcı miktarının bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı	126
Şekil 4.17.	Malzeme W'nin (FRP) SEM görüntüsü (çarpma hızı= 24 m/s, çarpma açısı= 60°)	128
Şekil 4.18.	90 m/s çarpma hızı ve 30° çarpma açısında kararlı durum erozyonu ile mekanik özellikler arasındaki ilişki.....	130

Şekil 4.19.	Çalışmada kullandıkları kompozitlerin çekme mukavemetini, Charpy darbe dayanımını ve tabakalar arası kayma mukavemetini gösteren çubuk diyagramlar a) çekme dayanımı (MPa), b) Charpy darbe dayanımı (kg/m^2), c) tabakalar arası kesme mukavemeti (MPa).....	131
Şekil 4.20.	İki farklı çarpma açısı (30° ve 90°) ve çarpma hızında (38 ve 45 m/s) çeşitli kompozitlerin erozyon direncini gösteren bir histogram.....	131
Şekil 4.21.	Çeşitli dolgu maddelerinin tepe erozyon açısı	133
Şekil 4.22.	Çarpma açısına bağlı olarak farklı uçucu kül dolgu içeriğine sahip cam-epoksi kompozitlerin erozyon oranları	134
Şekil 4.23.	Sertleştirilmiş ham polyester ve farklı miktarlarda mermer tozu dolgulu polyester kompozitlerin çarpma açısına göre erozyon oranları	135
Şekil 4.24.	Çarpma açısı ve dolgu içeriğinin kompozitlerin erozyon oranına etkisi	136
Şekil 4.25.	Çarpma açısına bağlı olarak kompozitlerin UHMWPE dolgu içeriğinin erozyon oranına etkisi.....	137
Şekil 4.26.	Çarpma açısına bağlı olarak kompozitlerin alümina dolgu içeriğinin erozyon oranına etkisi.....	138
Şekil 4.27.	Farklı partikül dolgulu cam fiber takviyeli polyester kompozit için çarpma açısına bağlı erozyon oranları a) ağırlıkça %10, b) ağırlıkça %20	140
Şekil 4.28.	Çalışmada kullandıkları kompozitlerin erozyon oranına çarpma açısının etkisi (aşındırıcı boyutu= $175\ \mu\text{m}$, çarpma hızı= 100 m/s, maruz kalma süresi= 180 s)	142
Şekil 4.29.	9,5 m/s çarpma hızı için çarpma açısına bağlı olarak farklı sentetik yağ dolgu içeriğine sahip epoksi reçinelerin ağırlık kayıpları.....	143
Şekil 4.30.	Dolgunsuz ve farklı grafit partikül dolgu içeriğine sahip karbon/epoksi kompozitlerin çarpma açısına bağlı erozyon oranları	144
Şekil 4.31.	0° ve 45° fiber oryantasyonunda dolgunsuz ve borik asit dolgulu GF/EP kompozitlerinin çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları (çarpma hızı= 23 m/s, ortalama partikül boyutu= $200\ \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$)	145
Şekil 4.32.	39 m/s çarpma hızında PAEK'lerin ve kompozitlerinin çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları.....	148
Şekil 4.33.	Farklı çarpma hızları ve 30° çarpma açısında çeşitli kompozitlerin kararlı durum erozyon oranları	148
Şekil 4.34.	PEI ve kompozitlerinin çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları	150
Şekil 4.35.	PEI ve kompozitlerinin çarpma açısına bağlı erozyon verimleri	152
Şekil 4.36.	30° ve 90° çarpma açısında numunelerin ortalama hacimsel erozyon oranları (çarpma hızı= 50 m/s).....	153
Şekil 4.37.	30° çarpma açısında malzemelerdeki baskın aşınma mekanizmaları a) GF-PI, b) BF+MoS ₂ - PI, c) CF- PTFE.....	154

Şekil 5.1.	Çalışmada kullanılan malzemeler a) kestamid malzeme, b) kestoil malzeme, c) kestlub malzeme, d) numune boyutları.....	156
Şekil 5.2.	60 mesh boyutundaki garnetin stereo mikroskop görüntüsü.....	157
Şekil 5.3.	Mevcut çalışmada kullanılan test düzeneğinin şematik görüntüsü.....	158
Şekil 5.4.	Mevcut çalışmada kullanılan a) katı partikül erozyonu uygulama kabini, b) test düzeneği fotoğrafı.....	159
Şekil 5.5.	Mevcut çalışmada kullanılan numunelerin ağırlık ölçümünün yapıldığı 0,1 mg hassasiyetteki elektronik terazi	160
Şekil 5.6.	Erozyon testlerine tabi tutulan kestamid polimer malzeme ve onun kompozitleri olan kestlub ve kestoil malzemelerin fotoğrafı.....	160
Şekil 5.7.	Mevcut çalışmada aşınmış numune yüzeyi topografyalarının elde edilmesi için kullanılan temassız 3D optik profilometre (Nanovea PS50, USA)	161
Şekil 6.1.	Numunelerin 1 bar püskürtme basıncı ve 20 s maruz kalma süresinde çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları a) kestamid, b) kestoil, c) kestlub.....	164
Şekil 6.2.	Numunelerin 1 bar basınçta çarpma açısına bağlı erozyon oranları a) 10 s maruz kalma süresinde, b) 20 s maruz kalma süresinde, c) 30 s maruz kalma süresinde	165
Şekil 6.3.	Numunelerin 2 bar basınçta çarpma açısına bağlı erozyon oranları a) 10 s maruz kalma süresinde, b) 20 s maruz kalma süresinde.....	165
Şekil 6.4.	30° çarpma açısı ve 20 s maruz kalma süresinde numunelerin basınca bağlı olarak erozyon oranları a) kestamid, b) kestoil, c) kestlub	168
Şekil 6.5.	Numunelerin 30° çarpma açısında 1 bar ve 2 bar basınca bağlı erozyon oranları a) 10 s maruz kalma süresinde, b) 20 s maruz kalma süresinde	168
Şekil 6.6.	1 bar ve 2 bar basınçta basınç ve çarpma açısına bağlı olarak numunelerin erozyon oranları a) kestamid, 10 s maruz kalma süresi, b) kestamid, 20 s maruz kalma süresi, c) kestoil, 10 s maruz kalma süresi, d) kestoil, 20 s maruz kalma süresi, e) kestlub, 10 s maruz kalma süresi, f) kestlub, 20 s maruz kalma süresi.....	169
Şekil 6.7.	Numunelerin 1 bar püskürtme basıncı ve 30° çarpma açısında çarpma süresine bağlı erozyon oranları a) kestamid, b) kestoil, c) kestlub	171
Şekil 6.8.	Numunelerin 30° çarpma açısında çarpma süresine bağlı erozyon oranları a) 1 bar basınç ve 10 s, 20 s, 30 s maruz kalma süresinde, b) 2 bar basınç ve 10 s, 20 s maruz kalma süresinde.....	171
Şekil 6.9.	Kestamid malzemenin 1 bar, 20 s maruz kalma süresindeki yüzey topografyaları a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 90°	174
Şekil 6.10.	Kestoil malzemenin 1 bar, 20 s maruz kalma süresindeki yüzey topografyaları a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 90°	174

Şekil 6.11.	Kestlub malzemenin 1 bar, 20 s maruz kalma süresindeki yüzey topografyaları a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 90°	175
Şekil 6.12.	Bazı malzemelerin pürüzlülüğünün çıkarılacağı profilin gösterimi a) 1 bar, 45° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için kestlubun yatay profili, b) 1 bar, 45° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için kestlubun dikey profili, c) 1 bar, 30° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için kestamidin yatay profili, d) 1 bar, 30° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için kestamidin dikey profili	176
Şekil 6.13.	1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Ra pürüzlülük değerleri a) yatay, b) dikey	177
Şekil 6.14.	1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Rt pürüzlülük değerleri a) yatay, b) dikey	177
Şekil 6.15.	1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Sa pürüzlülük değerleri	178
Şekil 6.16.	1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Sq pürüzlülük değerleri	178
Şekil 6.17.	1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Pt pürüzlülük değerleri a) yatay, b) dikey	179
Şekil 6.18.	Erozyon testlerinden sonra kestlub malzemesinin yüzey pürüzlülük merkez profilleri a) 30°- yatay, b) 30°- dikey, c) 90°- yatay, d) 90°- dikey (1 bar, 20 s için).....	180

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Malzemelerin katı partikül erozyonu davranışları	7
Tablo 2.2.	Çalışmada kullanılan aşındırıcı partiküller ve AISI 1020 çeliğinin erozyon oranları	17
Tablo 2.3.	Numunelerin detaylı bileşimi ve tanımlamaları	48
Tablo 3.1.	Bazı yaygın polimerlerin kullanım alanları	66
Tablo 3.2.	Literatürde çalışılan bazı polimerlerin aşınma mekanizmaları	81
Tablo 3.3.	Çalışmada kullandıkları polimerlerin fiziksel, termal ve mekanik özellikleri.....	83
Tablo 3.4.	Kullanılan poliamidlerin özellikleri	94
Tablo 3.5.	PA 6 ve mevcut çalışmada kullanılan kestamid, kestoil ve kestlub döküm poliamid malzemelerin teknik değerleri.....	102
Tablo 4.1.	Çalışmada kullanılan farklı fiber yüzey işlemlerine sahip UP/GF kompozitlerinin özellikleri.....	120
Tablo 4.2.	Polimerlerin ve polimerik kompozitlerin erozyon oranlarına ilişkin bazı veriler.....	123
Tablo 4.3.	Literatürde bildirilen bazı kompozitlerin malzeme kaldırma mekanizmaları	124
Tablo 4.4.	Metalik olmayan numunelerin özellikleri	126
Tablo 4.5.	Numunelerin 36 m/s hız ve 30° çarpma açısındaki katı partikül erozyonu testi sonuçları.....	127
Tablo 4.6.	PEEK, PEK ve PEKK polimerleri ile kompozitlerinin mekanik özellikleri.....	129
Tablo 4.7.	Cam fiber takviyeli epoksi kompozit ve çeşitli miktarlarda granit dolgulu hallerinin mekanik özellikleri	136
Tablo 4.8.	Aramid kumaş takviyeli epoksi kompozit ve çeşitli miktarlarda UHMWPE dolgulu hallerinin mekanik özellikleri	137
Tablo 4.9.	Cam fiber takviyeli epoksi kompozit ve çeşitli miktarlarda alümina dolgulu hallerinin mekanik özellikleri	138
Tablo 4.10.	Cam fiber takviyeli polyester kompozit ve çeşitli dolgulu hallerinin mekanik özellikleri	139
Tablo 4.11.	Numunelerin detaylı bileşimi ve tanımlamaları.....	141
Tablo 4.12.	Çalışmada kullanılan numunelerin özellikleri	145
Tablo 4.13.	Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri.....	146
Tablo 4.14.	Çalışmada kullandıkları malzemelerin içeriği	147
Tablo 4.15.	Numunelerin özellikleri	149
Tablo 4.16.	Çalışmada kullanılan polimer ve onların kompozitlerinin tanımlamaları.....	153
Tablo 5.1.	Çalışmada kullanılan malzemelerin teknik değerleri (tedarikçinin verilerine göre)	155
Tablo 5.2.	Deneyde kullanılan test parametreleri.....	158
Tablo 6.1.	Farklı basınçlarda püskürtülen 60 mesh garnet aşındırıcılarının hesaplanan partikül besleme hızı değerleri	162
Tablo 6.2.	Erozyon oranının hesaplanması için kullanılan parametreler ve malzemelerin bazı hesaplanan erozyon oranları	163

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit veya alümina
bar	: Basınç birimi
CaCO ₃	: Kalsit
Ca ₅ (PO ₄) ₃	: Apatit
cm ³	: Santimetreküp
D	: Çap
dk.	: Dakika
dm	: Ağırlık değişimi
dm ³	: Desimetreküp
dN	: Nozul çapı
dt	: Zaman farkı
e	: Kopmada çekme uzaması (%)
E	: Elastiklik modülü (MPa)
E	: Erozyon oranı
E _k	: Kinetik enerji
F _n	: Normal kuvvet
F _t	: Teğetsel kuvvet
g.	: Gram
G _{ic}	: Kırılma enerjisi
h.	: Saat
H	: Sertlik
inç	: Uzunluk birimi
J.	: Joule
°K	: Kelvin
kg.	: Kilogram
K _{IC}	: Kırılma tokluğu
kJ.	: Kilojoule
km.	: Kilometre
kPa	: Kilopascal (Kilopaskal)
L	: Uzaklık
m	: Kütle
m.	: Metre
m ²	: Metrekare
m ³	: Metreküp
mbar	: Milibar
M _c	: Ortalama moleküler ağırlık
mg.	: Miligram
mm.	: Milimetre
MoS ₂	: Molibden disülfid
MPa	: Megapascal (Megapaskal)
n	: Devir hızı (rpm)
n	: Hız üssü
N	: Newton
nm.	: Nanometre
psi	: Basınç birimi

Pt	: Erozyon kraterinin en derin noktası ile malzeme yüzeyinin en üst noktası arasındaki mesafe (μm)
r	: Yarıçap
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (μm)
Rt	: Pürüzlülük profilinin en büyük yüksekliği (μm)
s.	: Saniye
S	: Çekme dayanımı (MPa)
Sa	: Ortalam alansal pürüzlülük (μm)
Si	: Silisyum
SiC	: Silicon carbide (Silisyum karbür)
SiO ₂	: Silisyum dioksit veya silika veya silis kumu
Sq	: Pürüzlülük yüksekliklerinin kareleri toplamının karekök ortalaması (μm)
t	: Süre
T	: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
Tg	: Camı geçiş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
Ti	: Titanyum
Tm	: Erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
v	: Hız
v	: Çapraz bağ yoğunluğu
V	: Vanadyum
V _p	: Partikül hızı (m/s)
z	: Uzunluk
ZnO	: Çinko oksit
μm .	: Mikrometre
ρ	: Yoğunluk
η	: Verim
($^{\circ}$)	: Derece
α	: Açı ($^{\circ}$)
($^{\circ}\text{C}$)	: Santigrad derece
θ	: Açısal yer değiştirme ($^{\circ}$)
$\emptyset$	: Çap
%	: Yüzde

Kısaltmalar

AA	: Alüminyum alaşımı
ABS	: Acrylonitrile Butadiene Styrene (Akrilonitril Bütadien Stiren)
ABS/CF	: Karbon Fiber Takviyeli Akrilonitril Bütadien Stiren
ABS/GF	: Cam Fiber Takviyeli Akrilonitril Bütadien Stiren
AF	: Aramid Fiber
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerika Test Etme ve Malzeme Topluluğu)
AWJT	: Abrasive Water Jet Turning (Aşındırıcı Su Jeti Tornalama)
BF	: Basalt Fiber (Bazalt fiber)
BMI	: Polybismaleimide (Bismaleimid)
CBPD	: Cement By-Pass Dust (Baypas tozu)
CF	: Carbon fiber (Karbon fiber)

CF/PEEK	: Karbon Fiber Takviyeli Polietereterketon
CF/PEKK	: Karbon Fiber Takviyeli Polieterketonketon
CFRP	: Carbon Fibre Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer)
COF	: Coefficient of friction (Sürtünme katsayısı)
EP	: Epoxy (Epoksi)
ER	: Erosion Rate (Erozyon oranı)
FRP	: Fiber Reinforced Polymer (Fiber Takviyeli Polimer)
GF	: Glass Fiber (Cam fiber)
GF/EP	: Cam Fiber Takviyeli Epoksi Reçine
GF/PEEK	: Cam Fiber Takviyeli Polietereterketon
GF/PEKK	: Cam Fiber Takviyeli Polieterketonketon
GFRP	: Glass Fibre Reinforced Polymer (Cam Fiber Takviyeli Polimer)
HB	: Hardness Brinell (Brinell sertliği)
HDPE	: High density polyethylene (Yüksek yoğunluklu polietilen)
HD-PUR	: Higrotermal olarak ayrılmış polyester-üretan
HV	: Hardness Vickers (Vickers sertliği)
LDPE	: Low density polyethylene (Düşük yoğunluklu polietilen)
N6	: Nylon 6 (Naylon 6)
N66	: Nylon 66 (Naylon 66)
N66/CF	: Karbon Fiber Takviyeli Naylon 66
N6/GF	: Cam Fiber Takviyeli Naylon 6
N66/GF	: Cam Fiber Takviyeli Naylon 66
NR	: Natural rubber (Doğal kauçuk)
PA	: Polyamide (Poliamid)
PAEK	: Polyaryletherketone (Poliarileterketon)
PC	: Polycarbonate (Polikarbonat)
PDMS	: Polidimetilsiloksan
PE	: Polyethylene (Polietilen)
PEEK	: Polyetheretherketone (Polietereterketon)
PEI	: Polyetherimide (Polieterimit)
PEK	: Polyetherketone (Polieterketon)
PEKK	: Polyetherketoneketone (Polieterketonketon)
PES	: Polyethersulfone (Polietersülfon)
PF	: Phenol formaldehyde (Fenol formaldehit)
PI	: Polyimide (Poliimid)
PMMA	: Polymethyl methacrylate (Polimetilmetakrilat)
PP	: Polypropylene (Polipropilen)
PPS	: Polyphenylene Sulfide (Polifenilen sülfid)
PS	: Polystyrene (Polistiren)
PSU	: Polysulfone (Polisülfon)
PTFE	: Polytetrafluoroethylene (Politetrafloroetilen)
rpm	: Revolutions per minute (Dakikadaki devir sayısı)
RT	: Room Temperature (Oda sıcaklığı)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SRG	: Steel Round Grit (Çelik yuvarlak kum)
SS	: Stainless steel (Paslanmaz çelik)
UHMWPE	: Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen)

UP : Unsaturated Polyester (Doymamış polyester)
3D : 3 Dimension (3 boyutlu)
XRD : X-Ray Diffraction (X-ışını kırınım)



KESTAMİD VE KOMPOZİTLERİNİN EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Katı partikül erozyonu, gaz veya sıvı bir akışkan tarafından taşınan belirli boyut ve şekildeki aşındırıcı parçacıkların belirli bir çarpma açısı ve hızla tekrarlı olarak hedef malzemeye gönderilerek malzeme yüzeyinde aşınmanın meydana geldiği bir işlemdir. Bu çalışmanın amacı üstün mekanik, fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri olan, karıştırıcı pervanesi, makara, döner ve kayar hareketli makine parçaları, kayar kapı sistemlerinde kremayer dişliler, hadde yatakları ve kızaklar gibi çeşitli parçalar ve tüm sanayi kollarında kullanılan bir mühendislik plastiği olan kestamid polimer malzeme, yağlayıcı katkılı kestamid olan kestlub ve yağlayıcı katkılı partikül takviyeli kestamid olan kestoil malzemelerin katı partikül erozyonu ile erozif aşınma davranışlarını incelemektir. Katı partikül erozyonu testleri ortam (oda) sıcaklığında, nozul ile hedef malzeme arası 20 mm mesafe sabit tutularak, farklı hava basınçları altında (1 bar ve 2 bar), çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°), maruz kalma test sürelerinde (10, 20 ve 30 s) ve 60 Mesh (200-600 µm) boyutunda garnet aşındırıcı parçacıkları kullanılarak ASTM G76 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, çalışma koşulları sabit tutularak yapılan katı partikül erozyonu testlerinde bütün malzemeler için en yüksek erozyon oranının 30° çarpma açısında meydana geldiğini, malzemelerin hepsinde inkübasyon periyodu ile ağırlık artışı görülürken maruz kalma sürelerinin artmasıyla ağırlıklarında azalma meydana geldiğini göstermiştir. Mekanik özellikler ile erozyon oranları arasında bir ilişki bulunamamış olup en az erozif aşınma direncinin kestlub malzemesinde meydana geldiği görülmüştür, buna bağlı olarak yağlayıcı katkıları bulunan kestlubun erozyon oranının diğer malzemelere göre daha yüksek olması sebebiyle yağlayıcı katkıların erozif aşınmayı artırıcı etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eroziyon Aşınma, Katı Partikül Erozyonu, Kestamid, Yüzey Topografyası.

INVESTIGATION OF THE EROSION WEAR BEHAVIOR OF CASTAMIDE AND ITS COMPOSITES

ABSTRACT

Solid particle erosion is a process in which abrasion occurs on the material surface by repeatedly sending abrasive particles of certain size and shape, carried by a gas or liquid fluid, to the target material at a certain impact angle and speed. The aim of this study is to investigate the solid particle erosion and erosive wear behaviors of the materials such as castamide polymer material, which is an engineering plastic used in various parts such as mixing propeller, roller, rotating and sliding moving machine parts, rack gears in sliding door systems, rolling bearings and slides and lubricant doped kestlub and kestoil materials with lubricant doped and particle reinforcement. Solid particle erosion tests are carried out at ambient (room) temperature, stand of distance of 20 mm between the nozzle and the target material constant, under different air pressures (1 bar and 2 bar), at impact angles (15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°), exposure test times (10, 20 and 30 sec) and 60 Mesh (200-600 μm) size garnet abrasive particles according to ASTM G76. Experimental results showed that in solid particle erosion tests performed by keeping the working conditions constant, the highest erosion rate was observed at 30° impact angle for all materials, while mass increase was observed in all materials with the incubation period, their masses decreased with the increase of exposure times. No relationship was found between mechanical properties and erosion rates and the least erosive wear resistance was observed in kestlub material. Accordingly, it has been observed that lubricating additives have an erosive wear-increasing effect due to the fact that the erosion rate of kestlub with lubricant additives is higher than other materials.

Keywords: Erosive Wear, Solid Particle Erosion, Castamide, Surface Topography.

1. GİRİŞ

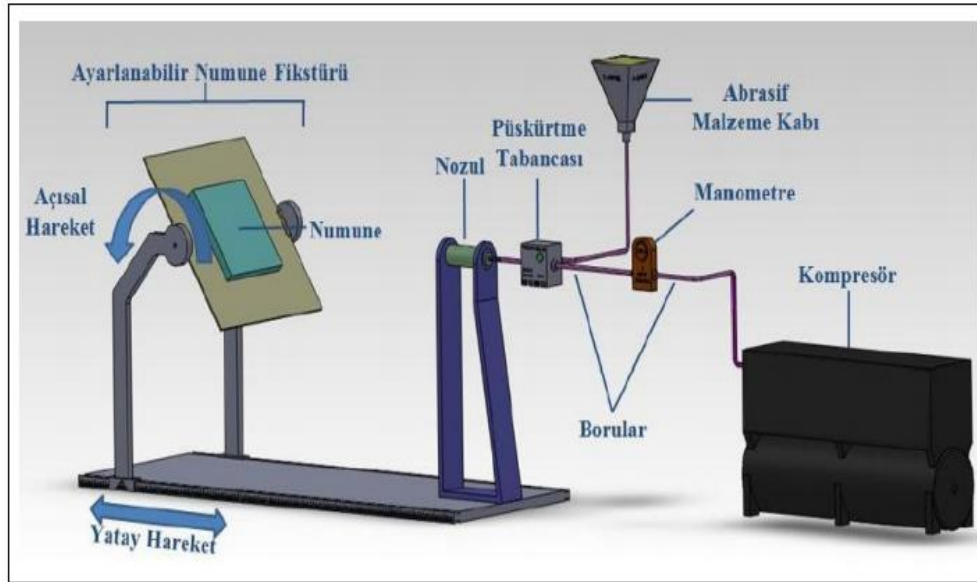
Katı partikül erozyonu, bir akışkan tarafından taşınan, farklı boyut ve şekillerde olabilen, farklı çarpma hızı ve çarpma açısı ile malzemeye tekrarlı olarak çarpan aşındırıcı partiküllerin malzemede aşınma meydana getirmesidir. Bu işlem endüstride yüzey temizleme, biyomedikal, otomotiv ve havacılık gibi uygulama alanlarında yapıştırma, boyama ve kaplama uygulamalarından önce malzeme yüzeyinin istenilen pürüzlülük değerlerine getirilebilmesi amacıyla yüzey pürüzlendirme gibi işlemler için malzeme yüzeyine püskürtülen aşındırıcıların mikron mertebesinde yarıklar oluşturarak kaplama malzemesinin ana malzemeye daha iyi tutunmasını ve kaplamanın ömrü ve kalitesini yüksek tutmasını sağlamak amacıyla sıkça kullanılmaktadır.

Katı partikül erozyonu, kumlama ve yüksek hızlı su jeti ile kesme gibi işlemlerde fayda sağlarken malzemelerin çalışma ortamlarında çevreden kaynaklandığında örneğin uzay ve havacılık uygulamalarında alçak irtifalarda ve çöl ortamında, yüksek hızlı araçlarda, toz bulutundan geçen uçak pervanesi, kompresör ve türbin kanatlarında, helikopter rotor kanatlarında, jet motorlarında, uçak radom ve kanat hücum kenarları gibi hava akımı ve içerisindeki partiküller ile ilk temasta bulunan yüzeylerde, kum, bulamaç gibi partikül madde taşıyan boru hatlarında, petrol arıtmada çamurlar, uçucu küle maruz kalan kazan borularında farklı boyut, şekil, çarpma hızı ve çarpma açısındaki yabancı partiküllerin malzeme yüzeyine çarparak şiddetli erozyon aşınması meydana getirdiğinden katı partikül erozyonuna maruz kalmış bu parçaların hasara uğrayarak hesaplanmış ömürlerinden daha az sürelerde ömrünü tamamlamasına dolayısıyla da parça değişimi, iş ve zaman kaybı, enerji kaybı gibi büyük maddi kayıplara yol açtığı ve önlenmediği takdirde can kayıplarına sebep olabildiğinden istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle katı partikül erozyonuna etki eden parametreler olan partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül çarpma hızı gibi operasyon parametreleri; aşındırıcı partiküllerin boyutu, şekli gibi aşındırıcı partikül özellikleri; hedef malzemenin özellikleri ve sıcaklık, nem gibi ortam koşullarının malzemenin katı partikül erozyonu davranışına etkisi iyi bilindiği takdirde hem bu gibi olumsuz durumlardan nasıl kaçınılabileceği hem de yüzey pürüzlendirme ve yüzey temizleme gibi fayda sağlayan işlemler için nasıl kullanılabileceği bilinmiş olur.

Polimer ve katkı polimer malzemeler ise endüstride sıkça kullanılan oldukça çeşitli malzeme sınıflarıdır. Literatürde çeşitli metal, polimer ve kompozit malzemelerin katı partikül erozyonu ile ilgili birçok çalışma mevcut olmasına rağmen kestamid polimer malzeme ve onun katkılı kompozitleri olan kestlub ve kestoil malzeme ile ilgili katı partikül erozyonu çalışması bulunmadığından literatürdeki bu boşluk doldurulmaya çalışılmıştır. Kestamid ve onun katkılı kompozitleri olan kestlub ve kestoil malzemeye yüzey temizleme ve pürüzlendirme işlemleri uygulanmak istendiğinde katı partikül erozyonu kullanılabilirken bu malzemelerden üretilen bir yapısal bileşen servis süresi boyunca katı parçacıkların çarpması dolayısıyla da katı partikül erozyona maruz kalabilir. Bu sebeple bu malzemelerin katı partikül erozyonuna maruz kaldığı durumdaki davranışlarını bilmek önemlidir. Mevcut çalışmada havacılıktan tekstil sanayine kadar birçok endüstri uygulamasında yaygın bir kullanım alanına sahip olan, hadde yatak ve kızaklar, makara ve kasnaklar, çeşitli makine parçaları, yatak ve burçlar, dişli çarklar gibi uygulamalarda kullanılan, mekanik dayanım değerlerinin iyi olması, yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve düşük sürtünme katsayısına sahip olması sebebiyle yağlamaya ihtiyaç duymadan darbesiz çalışma imkanı sunması, metal malzemelerle sürtünme durumunda bile yüksek aşınma dayanımı sergilemesi, yorulma, darbe ve korozyon dayanımının iyi olması, takım tezgâhlarında kolay işlenebilmesi, sessiz çalışabilmesi, su emme özelliği sebebiyle su ile temasta bulunan ortamlarda tercih edilmeyen poliamidlere göre daha az nem absorbe etmesi dolayısıyla ölçü stabilitesi bakımından daha iyi olması gibi üstün mekanik, fiziksel, kimyasal ve elektriksel özelliklere sahip, döküm poliamid olan kestamid malzeme ve onun kompozitleri olan, üretilirken kestamidin bünyesine çeşitli yağlayıcı, darbe ve aşınma dayanımını artırıcı katkılar eklenen kestoil ve farklı proseslerle katkı maddeleri eklenmesi ile elde edilen kestlub malzemelere katı partikül erozyonu testleri uygulanarak olası katı partikül erozyonu ortamına maruz kalması durumunda nasıl bir erozif aşınma davranışı sergileyecekleri incelenmiştir.

2. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Aşınma, malzeme yüzeyinde ufak parçaların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen malzeme kayıpları olup farklı boyut, şekil ve kimyasal yapıdaki maddeler tarafından meydana gelebildiğinden aşınmaya birçok parametre etki edebilmektedir ve malzemelerin performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Arslan, 2017; Khalfan, 2008; Sezer, 2017). Katı partikül erozyonu, gaz veya sıvı bir akışkan tarafından taşınan çeşitli geometrik şekil ve boyuttaki katı parçacıkların malzeme yüzeyine belirli bir açı ve hızla tekrarlı olarak çarparak malzemede erozif aşınma olarak adlandırılan aşınmaya yol açan ve malzeme kaybının gerçekleştiği bir prosestir. Katı partikül erozyonuyla yüzey pürüzlendirme, yüzey temizleme gibi işlemler kompresör vasıtasıyla basınçlandırılan havanın oluşturduğu vakum etkisiyle partiküller hareketlendirilip nozuldan hedef malzemeye püskürtülerek gerçekleştirilir. İstenilen hedef malzeme ile nozul mesafesi tutucunun yatay ekseninde yaptığı hareketle gerçekleştirilirken numune de istenilen açıda ayarlanarak işlem gerçekleştirilir. Şekil 2.1’de katı partikül erozyonu düzeneği gösterilmektedir.



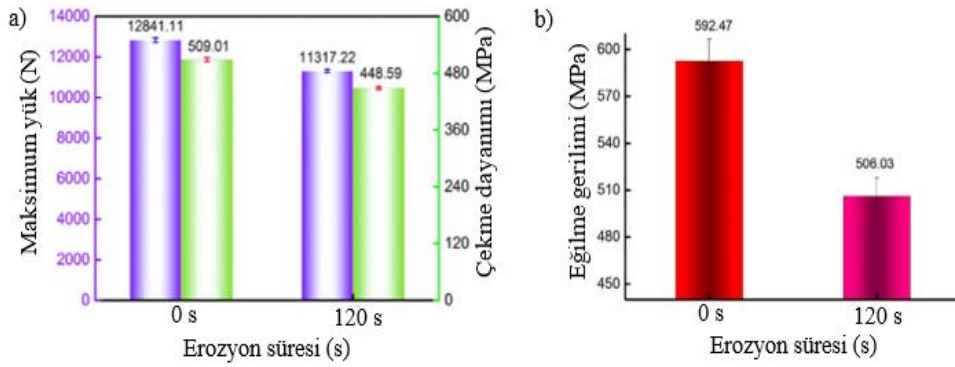
Şekil 2.1. Katı partikül erozyonu düzeneği (Yıldiran, 2013)

Malzeme yüzeyinin istenen pürüzlülüğe getirilmesi katı partikül erozyonu uygulamasının temel amaçlarından biridir. Biyomedikal, otomotiv ve havacılık gibi uygulama alanlarında malzemelerin yüzeyleri katı partikül erozyonu ile yapıştırma, boyama ve kaplama uygulamalarından önce pürüzlendirilmektedir.

Katı partikül erozyonunda aşındırıcı parçacıklar genellikle boyut ve şekillerine de bağlı olarak malzemeye püskürtüldüğünde yüzeyde mikron mertebesinde yarıklar oluşturmakta, bir kaplama işlemi uygulandığı durumda da açılan bu yarıklar sayesinde ana malzemeye daha iyi tutunan kaplama malzemesi kaplamanın ömrü ve kalitesini yüksek tutmaktadır (Önen, 2016).

Katı partikül erozyonu, kumlama ve yüksek hızlı su jeti ile kesme gibi işlemlerde fayda sağlarken aşınma miktarının fazla olması sebebiyle malzemelerin çalışma ortamlarında çevreden kaynaklı olduğunda istenmeyen bir durumdur. Hava kaynaklı katı partikül erozyonu uzay ve havacılık uygulamalarında alçak irtifalarda ve çöl ortamında, yüksek hızlı araçlarda çalışma gerçekleştirilirken, toz bulutundan geçen uçak pervanesi, kompresör ve türbin kanatlarında, helikopter rotor kanatlarında, jet motorlarında, uçak radom ve kanat hücum kenarları gibi hava akımı ve içerisindeki partiküller ile ilk temasta bulunan yüzeylerde, kum, bulamaç gibi partikül madde taşıyan boru hatlarında, petrol arıtmada çamurlar, uçucu küle maruz kalan kazan borularında farklı hız, açı, boyut ve atmosfer koşullarında yabancı parçacıkların yüzeye çarparak şiddetli erozyon aşınması meydana getirmesine sıkça rastlanmaktadır. Bu durum katı partikül erozyonuna maruz kalan parçaların hasara uğrayarak hesaplanmış ömürlerinden daha az sürelerde ömrünü tamamlamasına dolayısıyla da parça değişimi gerektirmesi, iş ve zaman kaybı, enerji kaybı gibi büyük maddi kayıplar ve önlenmediği takdirde can kayıplarına sebep olabilmektedir (Arslan, 2017; Cai ve diğ., 2015; Khalfan, 2008; Nayak ve diğ., 2021; Önen, 2016; Patnaik ve diğ., 2010; Sezer, 2017; Yıldırım, 2013). Katı partikül erozyonunun karbon fiber takviyeli polikarbonat kompozitlerin (CF/PC) mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada (Fang ve diğ, 2020) Şekil 2.2’de gösterildiği üzere 2 dakika maruz kalma süresindeki katı partikül erozyonu uygulaması ile sürekli olarak aşındırıcı partiküllere maruz kalan hedef malzemede fiber kırılması meydana geldiğinden malzemenin çekme ve eğilme özelliklerinde belirgin bir şekilde azalma meydana geldiği dolayısıyla malzemenin dayanım değerlerinde düşüş gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

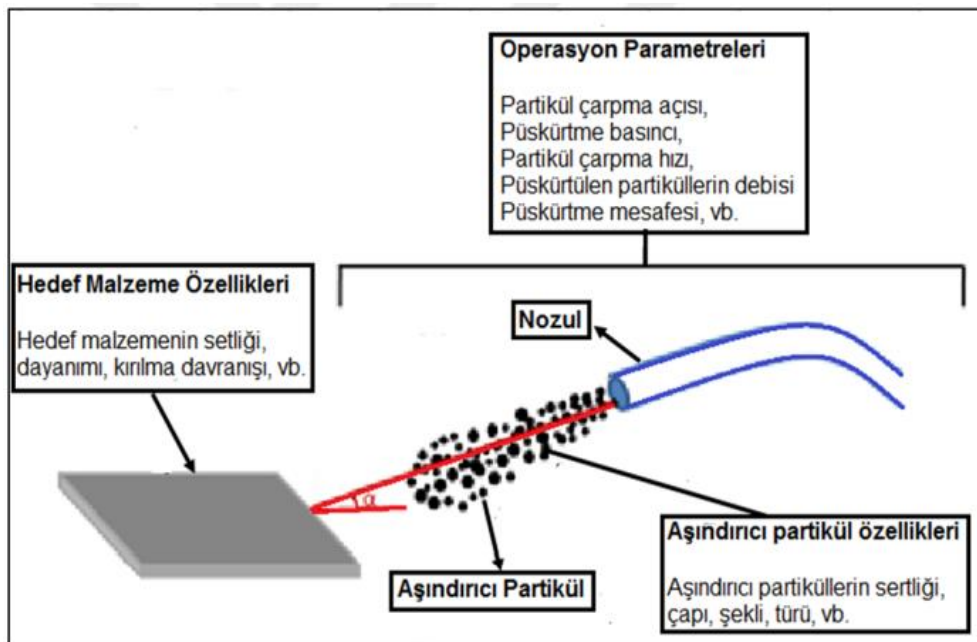
Bu sebeple aşınmaya etki eden faktörler iyi bilinirse bu gibi olumsuz durumlardan nasıl kaçınılabileceği veya yüzey pürüzlendirme, temizleme gibi işe yarayabilecek işlemlerin istendiği durumlarda nasıl kullanılması gerektiği bilinmiş olur.



Şekil 2.2. CF/PC kompozitlerinin 2 dakikalık katı partikül erozyonundan önce ve sonra a) çekme özelliği, b) eğilme özelliği değişimi (Fang ve diğ, 2020)

2.1. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Parametreler

Katı partikül erozyonu da başka tribolojik süreçlerde olduğu gibi karmaşıktır, meydana gelen değişimler birçok parametreye göre farklılık göstermektedir (Yıldıran, 2013). Malzemelerin aşındırıcı katı parçacıkların çarpmasına karşı gösterdikleri tepki parçacık çarpma açısı, püskürtme basıncı, parçacık çarpma hızı gibi operasyon parametreleri; aşındırıcı parçacıkların boyutu, şekli gibi aşındırıcı parçacık özellikleri; hedef malzemenin özellikleri ve sıcaklık, nem gibi ortam koşullarına bağlı olarak ciddi anlamda değişiklik göstermektedir. Katı partikül erozyonuna etki eden bu parametreler Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Katı partikül erozyonuna etkisi olan parametreler (Önen, 2016)

Katı partikül erozyonunda çeşitli parametrelerin etkileri erozyon davranışı üzerinde birbiriyle ilişkili olup tek bir parametrenin etkisini ayırt etmek kolay değildir (Barkoula ve Kocsis, 2002).

2.1.1. Hedef Malzeme Özellikleri

Katı partikül erozyonunda hedef malzemenin sertliği, dayanıklılığı ve kırılma davranışları gibi karakteristik özellikler erozyon oranını ve erozyon mekanizmalarını etkileyen önemli bir parametredir, malzemenin kırılma davranışı aşınma mekanizmalarının belirlenmesinde aktif rol oynar (Arslan, 2017; Sezer, 2017).

Aşındırıcı partiküllerin hedef malzemelerin sert ve sağlam olması durumunda malzeme yüzeyinde bir etki yapamadığı bilinirken hedef malzemenin oldukça elastik olması durumunda ise kinetik enerjisi malzeme yüzeyinde zararsız bir biçimde dağıtılır (Barkoula ve Kocsis, 2002). Diğer tüm parametreler aynı olduğu durumda bile hedef malzemenin sünek veya gevrek olması farklı aşınma karakteristiği göstermesine sebep olup katı partikül erozyonunu önemli ölçüde etkilemektedir (Arslan, 2017).

2.1.1.1. Katı Partikül Erozyonuna Göre Malzemelerin Sınıflandırılması

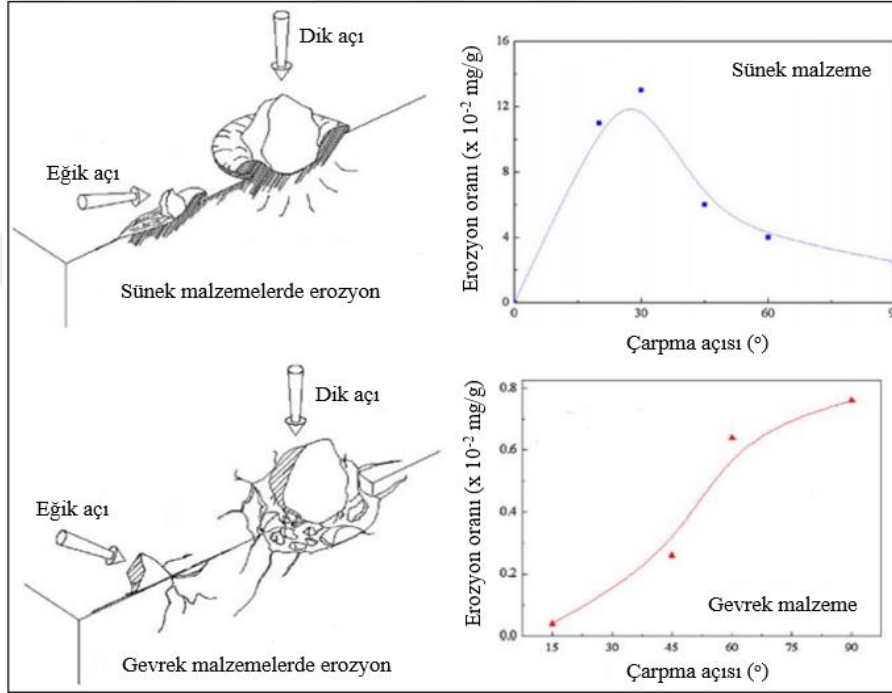
Katı partikül erozyonunda çarpma açısına da bağlı olarak malzemenin kesme ve sürme hareketi nedeniyle çıkarıldığı, plastik deformasyonun gözlemlendiği sünek; malzeme yüzeyinde çatlak ve kırılmaların oluşmasıyla karakterize edilen gevrek kırılma olmak üzere iki tür davranış gözlemlenir.

Katı partikül erozyonu uygulanan malzemenin türüne göre erozyon davranışları farklılık göstermektedir. Cam, seramik ve gevrek polimerlerde çatlak oluşumu ve gevrek kırılma; kauçuk malzemelerde yırtılma ve yorulma; sünek metal ve polimerlerde ise mikro kesme ve mikro sürme gibi talaş oluşumu yoluyla çeşitli erozyon davranışları gözlenmektedir (Barkoula ve Kocsis, 2002; Sezer, 2017). Malzemelerin erozyon davranışları Tablo 2.1’de gösterilmektedir.

Sünek malzemelerde maksimum malzeme kaybının düşük çarpma açılarında ($\alpha \approx 30^\circ$) meydana geldiği, gevrek malzemelerde ise yüksek çarpma açılarında meydana geldiği Şekil 2.4 ve Şekil 2.5b’de ifade edilmektedir (Sezer, 2017).

Tablo 2.1. Malzemelerin katı partikül erozyonu davranışları (Arslan, 2017)

Malzeme Türü	Erozyon Davranışı
Cam, seramik, gevrek polimer	Çatlak oluşumu, gevrek kırılma
Polimer, sünek metaller, fiber takviyeli polimerler (FRP)	Kesme ve sürülme
Kauçuk, plastik esaslı	Yorulma, yırtılma



Şekil 2.4. Sünek ve gevrek malzemelerde katı partikül erozyonu karakteristikleri (Önen, 2016)

Şekil 2.5 çarpma süresinin ve çarpma açısının bir fonksiyonu olarak tipik erozyon diyagramlarını göstermektedir. Gevrek ve sünek malzemeler ağırlık kayıplarının zamana göre değişiminde farklı davranış sergiler.

Şekil 2.5a'da gösterilen çarpma süresi ile malzeme kaybının değişimiyle ilgili olarak gevrek erozyon davranışında lineer olarak artış gözlenir, gevrek malzemelerdeki erozyonun katı partikül erozyonunun başlangıcından itibaren hedef malzemede ağırlık kaybına sebep olan kararlı bir erozyon davranışı gösterdiği görülürken sünek erozyon davranışında ilk zamanlarda aşındırıcı parçacıkların sünek malzemeye gömülerek ağırlık artışının olması nedeniyle ağırlık kaybı eksi (-) tarafa geçer. Bu sebeple sünek erozyon modunda kararlı bir duruma gelmeden önce hedef malzeme ağırlığının öncelikle arttığı

kuluçka olarak da adlandırılan, malzemede ağırlık kaybı olması beklenirken aksine ağırlık kazancının olduğu, düşük çarpma açısıyla daha az ilişkili, yüksek çarpma açıları ile daha belirgin hale gelme eğiliminde olan inkübasyon periyodunun varlığı söz konusu olabilmektedir.

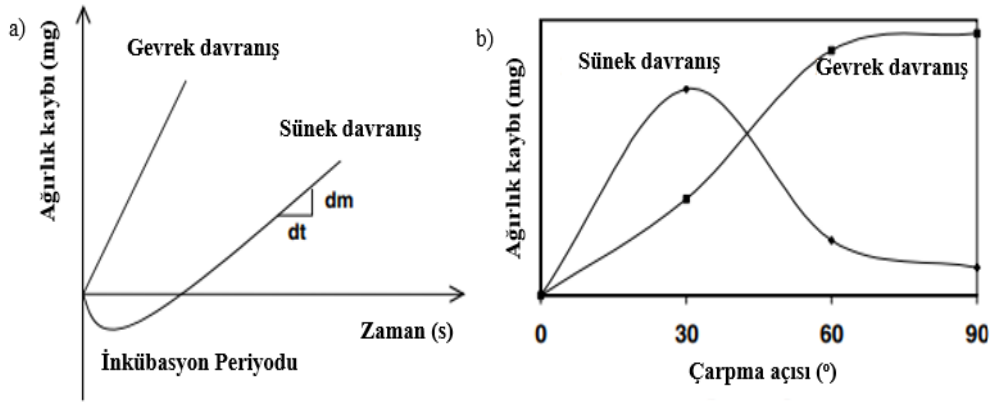
Sünek malzemelerdeki inkübasyon periyodu aşındırıcı parçacıkların malzemeye gömülmesiyle gerçekleşir. Aşındırıcı parçacıkların malzeme yüzeyine tekrarlı olarak gönderilmeye devam etmesiyle bu gömülü parçacıklar hedef malzeme yüzeyinden uzaklaştırılır ve inkübasyon periyodu sonrasında sünek malzemelerde de gevrek malzemelerde olduğu gibi lineer bir ağırlık kaybı görülerek kararlı erozyon davranışı gözlemlenir (Arslan, 2017; Khalfan, 2008; Sezer, 2017).

Aşındırıcı parçacıkların darbe enerjisi hedef malzeme yüzeyinde dağıtılır ve polimer malzemeler basma ve çekme gerilmeleri altında yüksek derecede plastik deformasyona uğrar, hedef malzemeden küçük parçalar uzağa itilirken küçük yüzey tümsekleri oluşarak malzeme pürüzlendirilir (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Düşük arpma açılarında gevrek malzemeler sünek malzemelere göre daha az ağırlık kaybına uğrarken çarpma açısı arttıkça gevrek malzemelerin ağırlık kaybı sünek malzemelere göre daha fazla olur (Arslan, 2017).

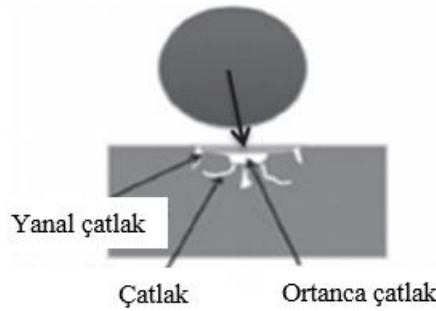
Şekil 2.5b’de sünek erozyon modunda maksimum malzeme kaybının düşük çarpma açılarında, gevrek malzemelerde ise yüksek çarpma açılarında gerçekleştiği ve sünek erozyon davranışına göre daha yüksek ağırlık kayıpları elde edildiği ifade edilmiştir (Barkoula ve Kocsis, 2002; Cai ve diğ., 2015).

Sünek erozyon modunda düşük, gevrek erozyon modunda yüksek çarpma açılarında maksimum malzeme kaybının meydana gelmesi eğik açılarda partikülün sürme ve kesme davranışından sorumlu olan yatay hız bileşeninin baskın olması ve sünek malzemelerde mikro kesme ve mikro sürme erozyon mekanizmalarıyla malzeme kaldırma gerçekleşmesinden, yüksek çarpma açılarında ise darbeden sorumlu olan dikey hız bileşeninin baskın olması ve gevrek malzemelerde darbe etkisiyle yüzeyde meydana gelen mikro çatlakların birleşerek malzemeden uzaklaştırılmasıyla malzeme kaldırma gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır.



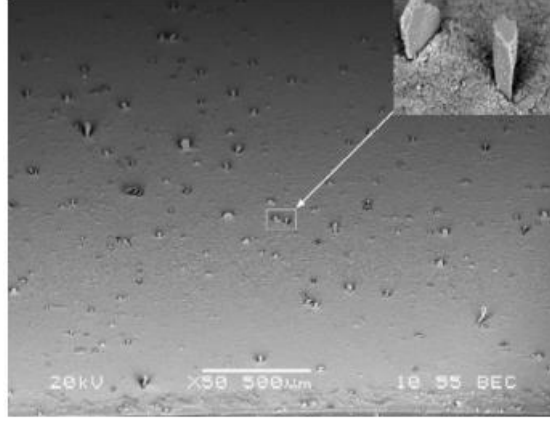
Şekil 2.5. Şematik olarak malzemeye göre erozyondaki tipik davranışlar a) çarpma süresinin ağırlık kaybına etkisi, b) çarpma açısının ağırlık kaybına etkisi (Barkoula ve Kocsis, 2002)

Katı partiküllerin varlığına bağlı olarak erozyon olaylarının ve etkileyen faktörlerin incelendiği bir gözden geçirme çalışmasında (Shinde ve diğ., 2018) gevrek malzemelerde katı partiküllerin çarpmasıyla Şekil 2.6’da şematik görseli gösterildiği üzere, yanal ve radyal yönlerde çatlakların oluştuğu, bu çatlakların katı partiküllerin çarpmaya devam ettiği süreçte büyüyüp birbiriyle kesiştiği ve yüzeyi büyük parçalara böldüğü, arkadan gelen aşındırıcı darbeleriyle malzeme yüzeyinden kaldırıldığı bir erozyon mekanizmasının gerçekleştiği, kısaca gevrek malzemelerde çatlama ve kırılma yoluyla malzeme kaldırılmasının gerçekleştiği ifade edilmiştir.



Şekil 2.6. Aşındırıcı partiküllerin gevrek malzeme üzerine çarpması nedeniyle meydana gelen erozyonun şeması (Shinde ve diğ., 2018)

Polimerlerin katı partikül erozyonunda partikül gömülmesinin azaltılmasıyla ilgili yapılan bir çalışmada (Getu ve diğ., 2011) PDMS (polidimetilsiloksan) polimer malzemesine aşındırıcı partiküllerin gömüldüğü gözlemlenmiştir, SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) görüntüsü Şekil 2.7’de gösterilmektedir.

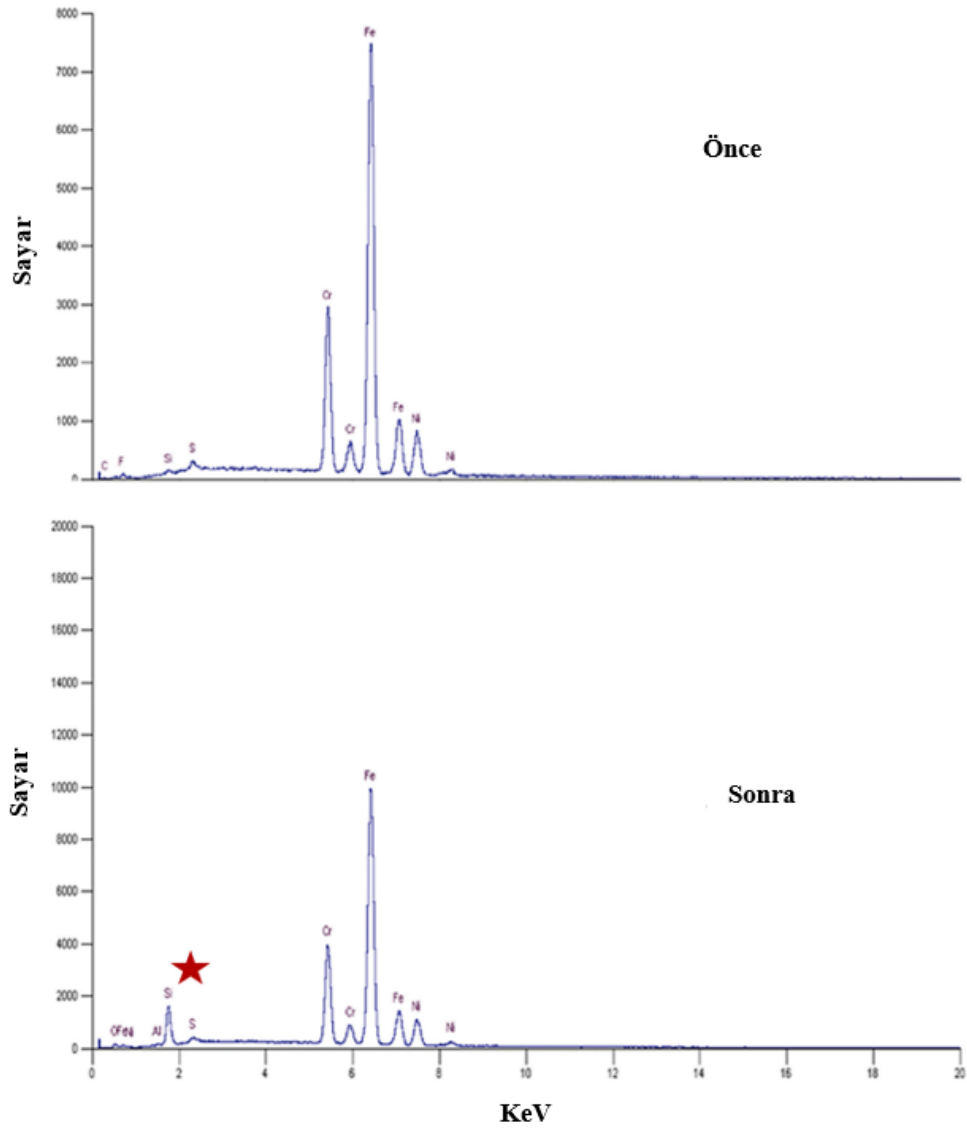


Şekil 2.7. PDMS polimer malzemesine aşındırıcı partiküllerin gömüldüğünü gösteren SEM görüntüsü (Getu ve diğ., 2011)

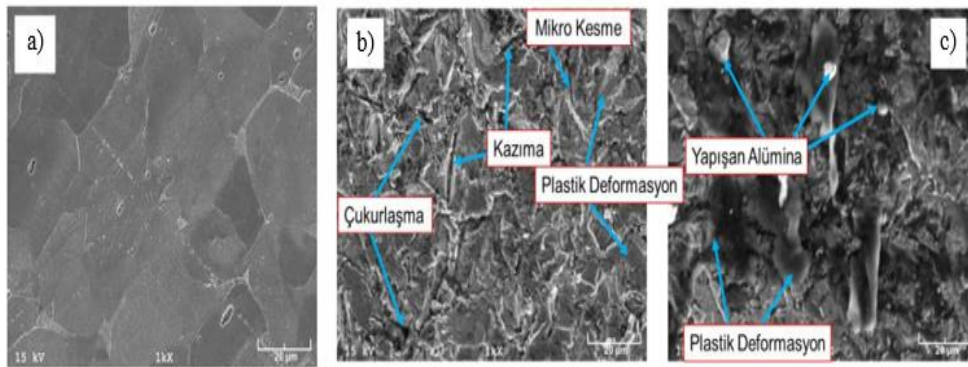
Metalik olmayan çeşitli malzemelerin erozyon testinin gerçekleştirildiği bir çalışmada (Anderson ve diğ., 2021) farklı çarpma hızları (12, 24 ve 36 m/s) ve farklı çarpma açıları (15°, 30°, 60° ve 90°), 150 μm boyutunda yarı yuvarlak aşındırıcı partiküller kullanılmış, Şekil 2.8’de görüldüğü gibi katı partikül erozyonu işleminden önce ve sonra AISI (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü) 316 için X-ışını kırınım (XRD) sonuçları karşılaştırılmış ve numunelere önemli miktarda aşındırıcı silika (SiO₂) partiküllerin gömülmesi sebebiyle erozyon testi sonrasında silisyum (Si) miktarının diğer elementlere göre artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Yüksek hızlarda metalik malzemelerin erozyon davranışının incelendiği bir çalışmada (Budur ve Gedikli, 2019) AA6061, Ti-6Al-4V alaşımları ve SS304 paslanmaz çelik metalik malzemelerin yüksek hızlardaki erozyon davranışını araştırmak amacıyla hem 90° sabit çarpma açısı ve farklı çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) hem de 100 m/s sabit çarpma hızı ve farklı çarpma açıları (20°, 30°, 45°, 60°, 90°) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre 90° çarpma açısında erozyon sonrası Ti-6Al-4V alaşımının optik mikroskop görüntülerini gösteren Şekil 2.9b’den görüldüğü üzere, mikro kesme ve kazıma (mikro sürme) erozyon mekanizmaları ile malzeme kaldırma gerçekleşirken plastik deformasyon sebebiyle çukurlaşmalar ve Şekil 2.9c’de görüldüğü gibi bazı bölgelerde partikül gömülmesinin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle uyumlu olarak sünek malzemelerde meydana gelen inkübasyon periyodunun varlığını kanıtlamaktadır (Budur ve Gedikli, 2019).

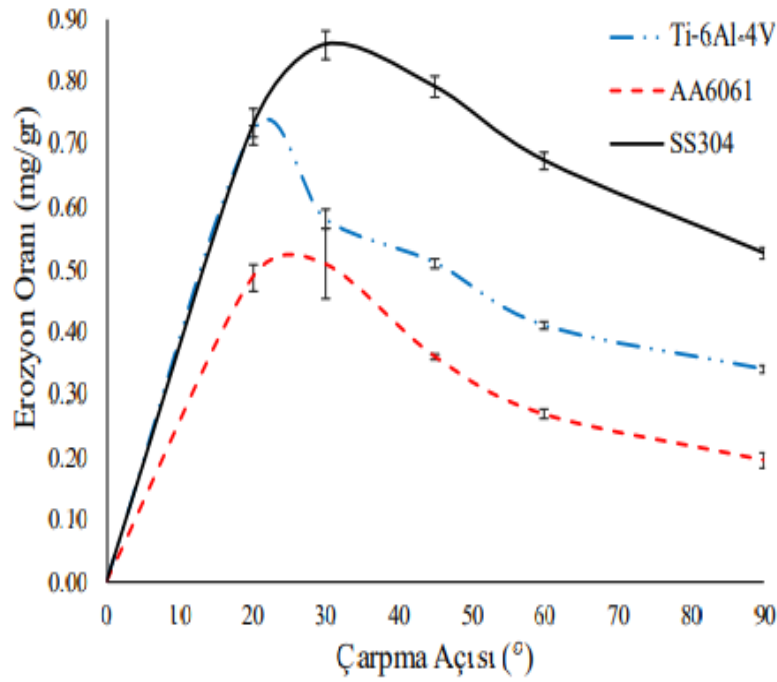


Şekil 2.8. AISI 316 numunesinin erozyon testlerinden önce ve sonra X-ışını kırınım sonuçları (Anderson ve diğ., 2021)



Şekil 2.9. Erozyon sonrası Ti-6Al-4V alaşımının optik mikroskop görüntüleri (Budur ve Gedikli, 2019)

Şekil 2.10'dan görüldüğü üzere, maksimum erozyon oranının SS304 paslanmaz çeliğinde, minimum erozyon oranının ise AA6061 alaşımında meydana geldiği ve üç malzeme için de en düşük erozyon oranının 90° çarpma açısında gerçekleşirken maksimum erozyonun gözlemlendiği çarpma açılarında farklılıklar meydana geldiği gözlemlenmiştir (Budur ve Gedikli, 2019). Dolayısıyla farklı malzemelerin erozif aşınma özelliklerinin de farklı olduğunu ifade edebiliriz.

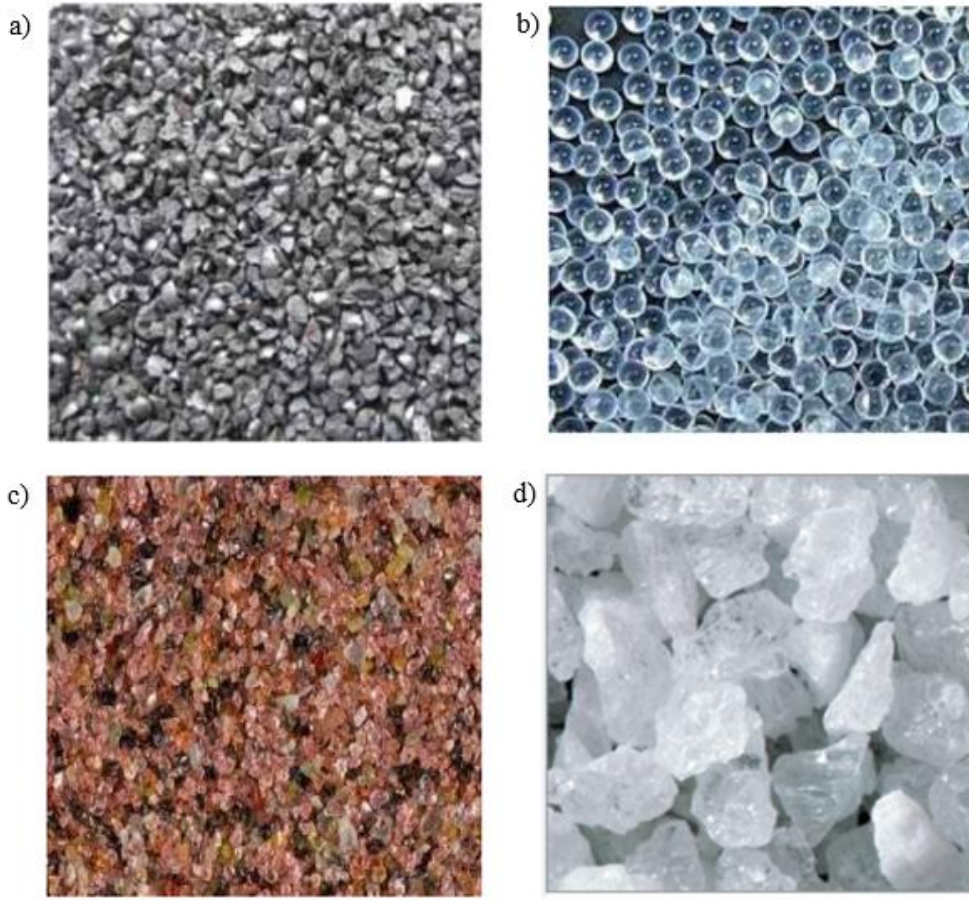


Şekil 2.10. Ti-6Al-4V, AA6061 ve SS304 malzemelerinin çarpma açısına bağlı erozyon oranları (Budur ve Gedikli, 2019)

2.1.2. Aşındırıcı Partikül Özellikleri

Katı partikül erozyonunda çelik kum, cam küre, garnet, alüminyum oksit, silis kumu ve silisyum karbür gibi çok sayıda aşındırıcı partikül kullanılabilmektedir (Sinmazcelik ve Sari, 2009). Şekil 2.11, katı partikül erozyonunda kullanılan çeşitli aşındırıcı partikülleri göstermektedir.

Aşındırıcı partiküllerin özellikleri birbirinden farklı olduğundan hedef malzemede farklı erozif aşınma sonuçlarına sebep olmaktadır. Örneğin kahverengi alüminyum oksit aşındırıcının sertliği ve yoğunluğu silis kumundan yüksek, silisyum karbürden düşük olup ikisinin arasında bir özellik göstermektedir (Sinmazcelik ve Sari, 2009).

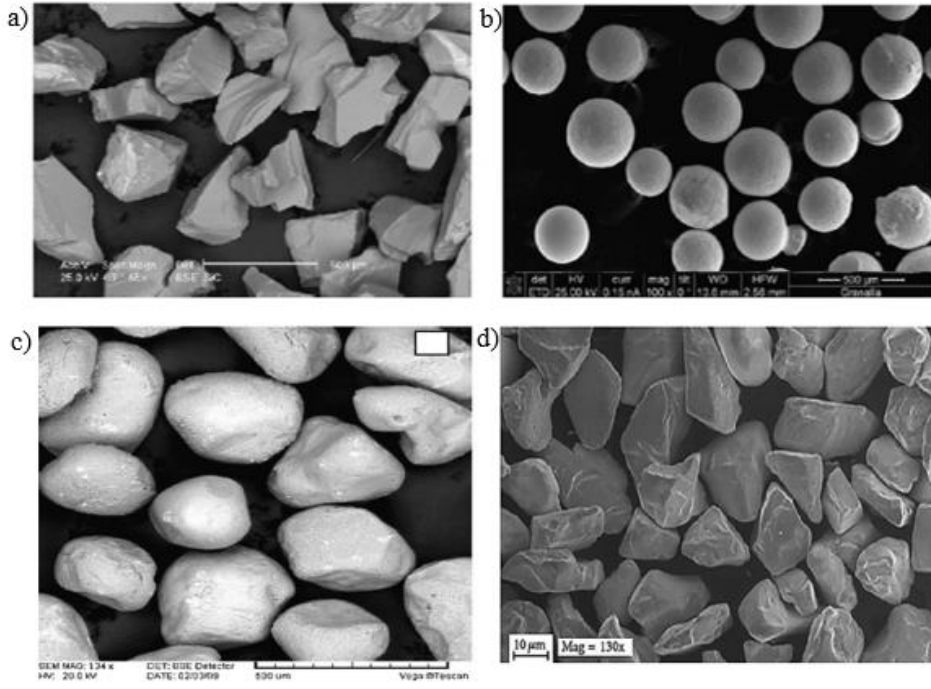


Şekil 2.11. Katı partikül erozyonunda kullanılan bazı aşındırıcı çeşitleri a) Çelik kum, b) Cam küre, c) Garnet, d) Alüminyum oksit beyaz (<https://www.anadolukumlama.com/#>; <http://www.kozaymakina.com.tr/kumlama-malzemeleri>; <http://www.torkmetal.com/urun.asp?id=25>)

2.1.2.1. Partikül Şekli

Katı partikül erozyonuna aşındırıcı parçacıkların fiziksel özellikleri direkt olarak etkide bulunmaktadır (Arslan, 2017). Eroziyon aşınmada kullanılan aşındırıcı partiküller şekil bakımından köşeli veya yuvarlak olabilmektedir.

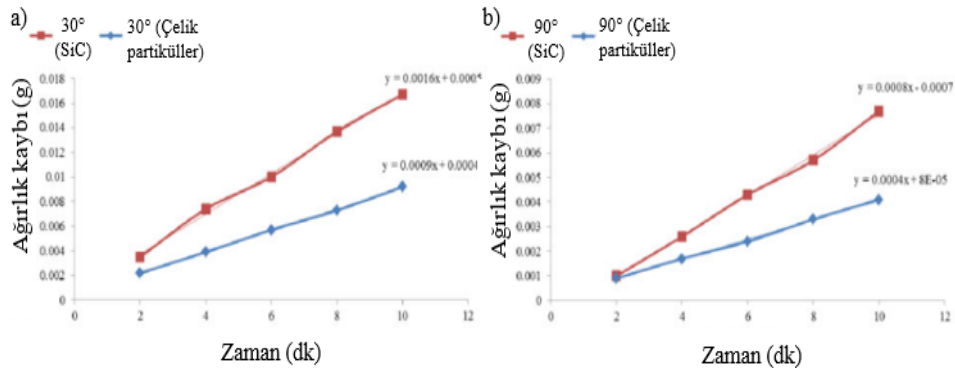
Şekil 2.12’de bazı aşındırıcı parçacıkların morfolojisinin SEM fotoğrafları gösterilmektedir. Keskin olmayan aşındırıcı parçacıklar küresele yakın olup dairesel yüzeye sahip olarak oluşturduğu erozyon plastik deformasyon ağırlıklı olmakta ve hedef malzeme yüzeyinde küresel şekle yakın hasar bölgeleri oluşturmaktadırlar (Arslan, 2017; Sezer, 2017). Keskin köşeli aşındırıcı parçacıklar ise küçük yarıçaplı köşelerle birbirine bağlanan düzlemsel alanlara sahip olup oluşturduğu erozyonda kesme, kırılma ve parçalanma daha baskın gerçekleşir (Arslan, 2017; Sezer, 2017).



Şekil 2.12. Aşındırıcı partiküllerin SEM fotoğrafları a) köşeli silisyum karbür (SiC), b) çelik yuvarlak kum (SRG), c) SiO₂ (silika kumu) ve d) garnet (Ćurković ve diğ., 2011; İbrahim ve diğ., 2020; Torres ve diğ., 2014)

AISI D2 üzerinde köşeli silisyum karbür ve çelik yuvarlak kum partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonunun gerçekleştirildiği bir çalışmada (Torres ve diğ., 2014) partikül şeklinin erozyona etkisini incelemek amacıyla SEM mikrografları sırasıyla Şekil 2.12a ve Şekil 2.12b'de gösterilen ikisi de 400–420 µm partikül boyutuna, $21 \pm 2,5$ g/dk aşındırıcı akış hızına sahip köşeli silisyum karbür (SiC) ve silisyum karbür parçacığının ağırlığından iki kat fazla olması sebebiyle $48,5 \pm 3,5$ g/dk aşındırıcı akış hızına sahip çelik yuvarlak kum (SRG) partikülleri kullanılarak AISI D2 üzerinde 24 ± 2 m/s çarpma hızı, 10 mm nozul-numune mesafesi, 10 dk maruz kalma süresi ve farklı çarpma açılarında (30°, 45°, 60° ve 90°) katı partikül erozyonu uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre köşeli partiküllerle aşınan hedef malzemenin yuvarlak partiküllerle aşınana kıyasla daha fazla düzensizlik ve daha yüksek pürüzlülük değerleri sergilediği, yuvarlak partiküllerin numune yüzeyinde kayarak teması ile malzeme yer değiştirmesinin olduğu fakat kaldırmanın gerçekleşmediği dolayısıyla Şekil 2.13'teki 30° ve 90° çarpma açılarında meydana gelen malzeme kaybı grafiklerine bakıldığında tüm çarpma açıları için de köşeli aşındırıcı parçacıklarının küresel olanlara göre daha yüksek malzeme kaybına sebep olduğu gözlemlenmiştir (Torres ve diğ., 2014).



Şekil 2.13. AISI D2 malzemesinde köşeli silisyum karbür ve çelik yuvarlak kum olmak üzere iki farklı aşındırıcı kullanılarak hedef malzemede zamana bağlı olarak meydana gelen malzeme kaybı grafiği a) 30°, b) 90° çarpma açısında (Torres ve diğ., 2014)

2.1.2.2. Partikül Türü ve Sertliği

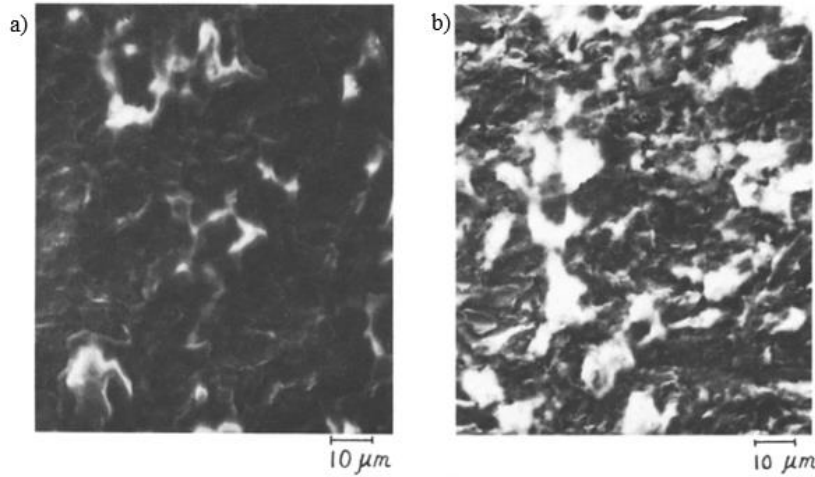
Aşındırıcı partiküllerin sertliği de önem arz etmektedir fakat aşındırıcı sertliğine bağlı olarak meydana gelen erozif aşınma hedef malzemenin sünek veya gevrek olma durumuna da bağlıdır.

Gevrek erozif aşınma modunda aşındırıcı parçacığın sertliğinin etkisi sünek moda kıyasla daha belirgin olmaktadır. Genelde sert aşındırıcılarla yumuşak olanlara göre daha fazla aşınma oranları elde edildiği düşünülmektedir fakat parçacığın şekli gibi başka özelliklerinin de aşınmaya olan etkisi dikkate alınmalıdır, sertlik aşındırıcı parçacık hedef malzemeye çarptığında kaldırılan hacimden ziyade yer değiştiren hacmi belirleyen bir etken olduğundan tek başına erozyon oranıyla ilişkilendirilememektedir. Zira sert fakat yuvarlak şekilli bir partikül kullanılırsa şiddetli bir aşınmanın meydana gelmesi beklenemez (Barkoula ve Kocsis, 2002; Debnath ve diğ., 2015).

Aşındırıcı partiküller kırılma tokluklarına bağlı olarak hedef malzemeye çarparken parçalanabilir (Barkoula ve Kocsis, 2002). Aşındırıcı partiküllerin çarparken parçalanması erozyon oranını etkileyebilir (Brandstädter ve diğ., 1991). Enerjisini kendini parçalamakta kullanan bu aşındırıcılar kırıldıkları için hedef malzemeye daha düşük enerji aktarır, başlangıçtaki enerji ve dolayısıyla yüzeydeki gerilmeler daha geniş bir alana yayılır. Bu etkileri dolayısıyla aşındırıcı parçacığın kırılmasının aşınmayı azaltan bir etkiye sahip olduğu düşünülebilir fakat aşındırıcılar kırılmadan öncekine göre daha keskin köşeli hal alabildiğinden erozyon oranını artırması da mümkün olabilmektedir (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Çelik malzemelerin erozyonu üzerinde aşındırıcı kompozisyonu ve şeklinin etkilerinin incelendiği bir çalışmada (Levy ve Chik, 1983) aşındırıcı kompozisyonu ve şeklinin AISI 1020 çelik malzemenin erozyonuna etkisi iki farklı çarpma açısı (30° ve 90°) ve 80 m/s çarpma hızında, partikül sertliğinin etkisini incelemek amacıyla 180-250 μm boyut aralığında olan beş farklı bileşimdeki köşeli şekle sahip (CaCO_3 , $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$, SiO_2 , Al_2O_3 , SiC) aşındırıcı partiküller kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.14'ten görüldüğü üzere, metal olan hedef malzemeye çarptığında bütünlüklerini koruyamayacak kadar zayıf ve kırılgan kalsit (CaCO_3) ve apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$) partiküllerinin parçalanarak malzeme kaldırmak için gereken kuvveti sağlayacak ağırlığa sahip olmadığı ve önemli miktarda parçanın numune yüzeyine gömülerek numune yüzeyini partikül parçalarından oluşan bir tabaka ile kapladığı, bunun da arkadan gelen aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjilerinin azalmasına sebep olarak her bir parçacık türü tarafından elde edilen erozyon oranları verilen Tablo 2.2'den görüldüğü üzere aynı zamanda sertlikleri de düşük olduğundan erozyon oranlarının düşük olduğu, Şekil 2.15'ten görüldüğü üzere belirli bir sertlik değerine kadar (yaklaşık 700 Vickers sertliği) partiküllerin sertliği arttıkça erozyon oranları artarken yaklaşık 700 Vickers sertliği olan bu eşik değerden sonra partiküllerin sertlik-mukavemet özelliklerine bakılmaksızın neredeyse aynı erozyon oranlarının elde edildiği, Şekil 2.16'dan görüldüğü üzere numuneye çarparken parçalanarak zayıf apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$) partikülleri kullanılarak çarpma esnasında parçalanmayan güçlü alümina (Al_2O_3) partiküllerinin kullanıldığı duruma göre kararlı durum erozyon oranına ulaşmak için hedef malzemeye yeterli kuvvetin iletilmesi bakımından daha fazla miktarda aşındırıcı partikül kullanılması gerektiği gözlemlenmiştir.

Aynı çalışmada partikül şeklinin etkisini incelemek amacıyla aynı parçacık bileşimine sahip, ortalama boyutu 100 μm olan köşeli çelik kum ve küresel çelik bilye kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada ise aşındırıcı partiküllerin geometrisinin bir fonksiyonu olan yerel kuvvet konsantrasyonunu hedef malzemede köşeli partiküllerin yuvarlaklara göre daha etkili bir şekilde yoğunlaştırmasından kaynaklı Şekil 2.17'de görüldüğü üzere köşeli çelik kumun çok daha keskin kraterler, yuvarlak çelik bilyanın ise daha sığ, yuvarlak kraterler oluşturarak çelik kum partiküller kullanıldığında çelik bilyaya göre yaklaşık 4 kat daha yüksek erozyon oranları (ER) elde edildiği gözlemlenmiştir (Levy ve Chik, 1983).

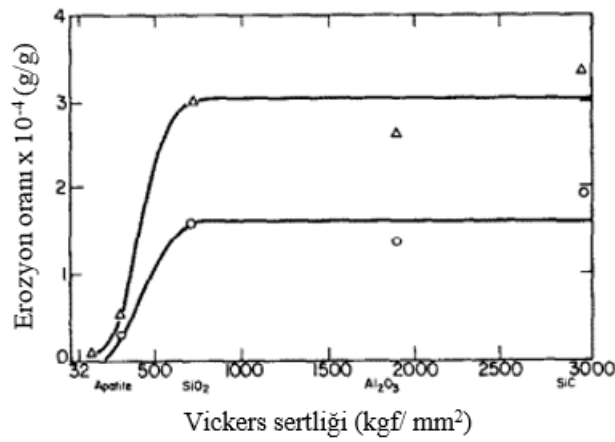


Şekil 2.14. AISI 1020 çeliğinin aşınan yüzeyleri a) kalsit (CaCO_3), b) apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$) ($V=80\text{ m/s}$, $\alpha=30^\circ$) (Levy ve Chik, 1983)

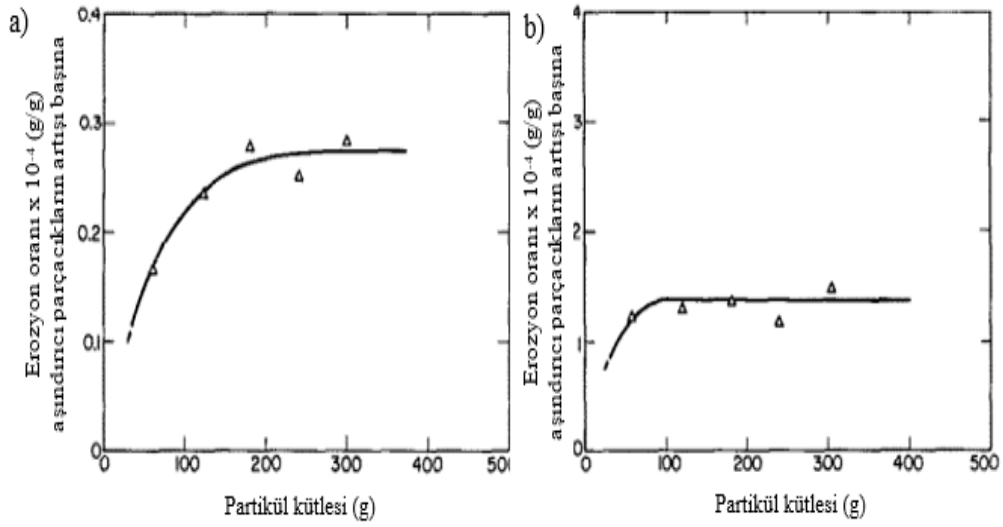
Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan aşındırıcı partiküller ve AISI 1020 çeliğinin erozyon oranları (Levy ve Chik, 1983)

Partikül bileşimi	Yoğunluk (g/cm^3)	Vickers sertliği, HV (kgf/mm^2)	Erozyon oranları ($\times 10^{-4}\text{ g/g}$)	
			$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
CaCO_3 (kalsit)	-	115	0,03	-
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$ (apatit)	-	300	0,5	0,3
SiO_2 (kum)	2,7	700	3,0	1,6
Al_2O_3 (alümina)	4,0	1900	2,6	1,4
SiC (silisyum karbür)	3,2	3000	3,3	1,9
Çelik kum	7,9	-	5,3	-
Çelik bilya	7,9	-	1,4	-

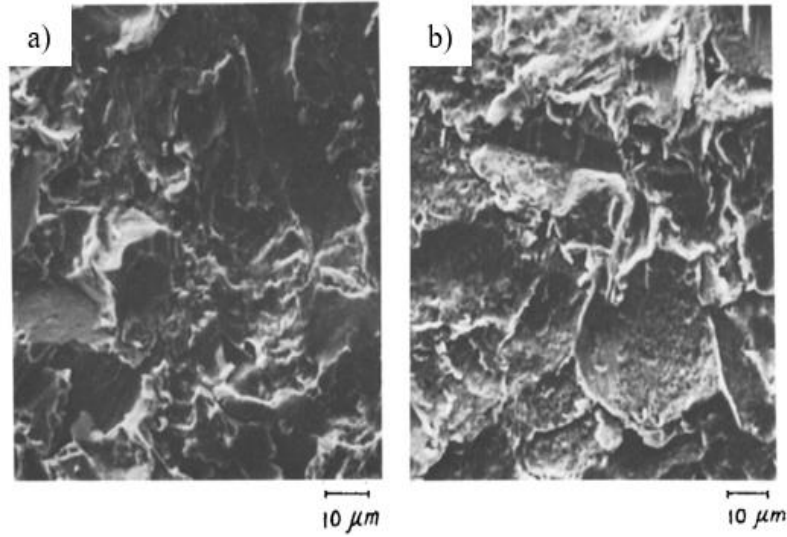
AISI 1020 çeliği için HV = 150 kgf/mm^2



Şekil 2.15. Beş tür aşındırıcı parçacık kullanılarak 30° ve 90° çarpma açılarında AISI 1020 çeliğinin erozyon oranları (Δ , $\alpha = 30^\circ$; $\circ$, $\alpha = 90^\circ$) (Levy ve Chik, 1983)



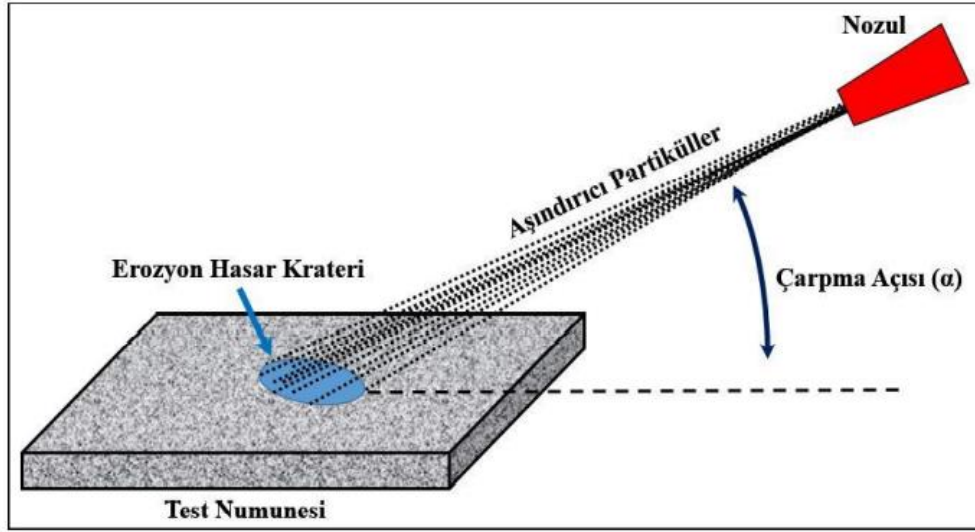
Şekil 2.16. Aşındırılmış AISI 1020 çeliği için artan erozyon oranı eğrisi a) apatit (Ca₅(PO₄)₃) partikülleriyle (parçacık boyutu= 180 µm, α= 90°, V= 80 m/s, T= 25°C), b) alümina (Al₂O₃) partikülleriyle (parçacık boyutu= 250 µm, α= 90°, V= 80 m/s, T= 25°C) (Levy ve Chik, 1983)



Şekil 2.17. AISI 1020 çeliğinin aşınan yüzeyleri a) çelik kum ile (ER= 5,3 x 10⁻⁴ g/g), b) çelik bilya ile (ER= 1,4 x 10⁻⁴ g/g) (V= 80 m/s, α= 30°) (Levy ve Chik, 1983)

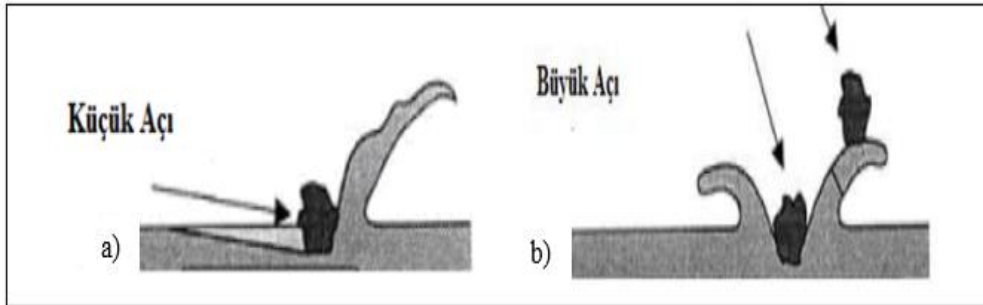
2.1.3. Partikül Çarpma Açısı

Malzemelerin erozyon davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biri çarpma açısıdır. Şekil 2.18’de görüldüğü üzere hedef malzeme yüzeyiyle püskürtülen aşındırıcı partiküllerin arasında kalan açıya çarpma açısı denilmektedir. Literatürde çarpma açısı olarak 90°’lik çarpmalar dik açılı, bunun dışında olan 90° altındaki açılar ise eğik açılı çarpma (0° < açı < 90°) olarak kabul edilmiştir (Arslan, 2017).



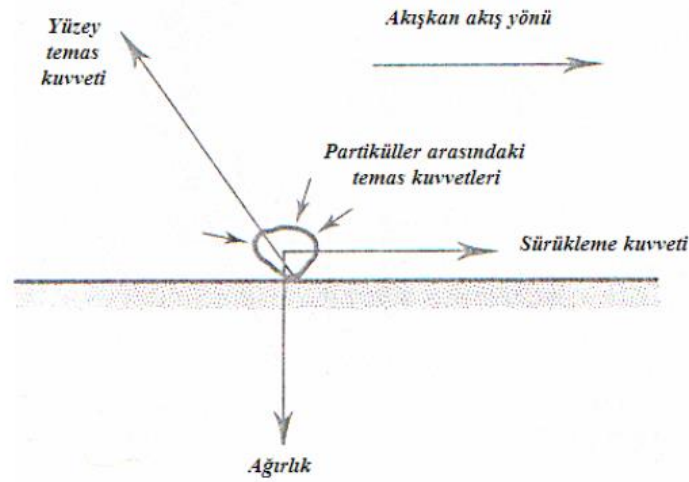
Şekil 2.18. Katı partikül erozyonunda çarpma açısı (α) şematik gösterimi (Sezer, 2017)

Şekil 2.19’da gösterildiği gibi katı partikül erozyonunda çarpma açısının etkisiyle ilgili olarak, düşük çarpma açılarındaki aşındırıcı parçacıklar malzemeyle temasları süresince yüzey boyunca bir yol izlediğinden iki cismin sürtünmesine benzeyen bir mekanizma gözlemlenir, yüksek çarpma açılarındaki ise tipik çarpma şeklinde erozyon mekanizması gözlemlenmektedir (Sezer, 2017).



Şekil 2.19. Çarpma açısının hedef malzeme erozyonuna etkisi a) küçük açı, b) büyük açı (Sezer, 2017)

Şekil 2.20’de belirtildiği üzere katı partikül erozyonunda hedef malzeme yüzeyiyle temasta bulunan her aşındırıcı parçacığa birbiriyle temasta bulunan parçacıkların temas kuvvetleri, akışkan varlığı ile sürüklenme kuvveti, yerçekimi, aşındırıcı parçacık üzerinde bulunan ve başlangıç hızının azalmasına sebep olan çarpma esnasındaki yüzeyin tepki kuvveti gibi birçok farklı kuvvet etki edebilir. Dolayısıyla aşınma miktarı aşındırıcı parçacıkların sayısı, ağırlığı ve çarpma hızı gibi birçok değişkene bağlıdır (Khalfan, 2008).



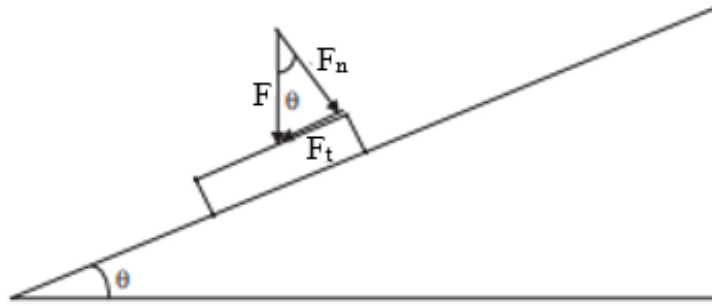
Şekil 2.20. Hedef malzemeye temasta bulunan aşındırıcı partiküllere etki eden kuvvetler (Khalfan, 2008)

Sünek ve gevrek malzemelerde meydana gelen ağırlık kaybı çarpma açısının bir fonksiyonu olarak farklı özellikler gösterir. Gevrek malzemeler yüksek çarpma açılarında (açı=90°) maksimum erozyon gösterirken sünek malzemeler karakteristik özellikleri gereği maksimum erozyonu düşük çarpma açılarında (açı=15°-30° arasında) gösterir. Fiber takviyeli kompozitler ise yarı-sünek davranış göstererek genellikle 45°-60° çarpma açısı arasında maksimum erozyona uğrar fakat diğer erozyon değişkenlerine de bağlı olarak 15°-90° çarpma açıları arasında da maksimum erozyon sergileyebilmektedirler (Arslan, 2017).

Aşındırıcı parçacıklar düşük çarpma açılarında hedef malzemeye daha uzun süre temas eder, bu durum yumuşak yüzeylerde ağırlık kaybının artmasına sebep olur (Arslan, 2017). Düşük çarpma açılarında aşındırıcı parçacıklar malzemeye teması süresince yüzey boyunca bir yol izler (Önen, 2016). Çarpma açısı düşük olduğunda aşındırıcı parçacık çarpma kuvveti Şekil 2.21’de görüldüğü gibi yatay ve dikey olmak üzere malzemenin yüzeyine teğetsel (F_t) ve normal (F_n) iki hareket hız bileşenine sahip olup F_t aşındırıcıyı kontrol ederken F_n darbeden sorumlu olmaktadır (Sezer, 2017; Suresh ve diğ., 2009). Yatay ve dikey hız bileşenleriyle ilişkili kinetik enerjiler malzemelerin erozyon mekanizmasının belirlenmesinde önemli rol oynar, yatay bileşen yüzeyde sürülmeyi kontrol ederken dikey bileşen parçacık kinetik enerjisinin hedef malzemeye aktarılmasından sorumlu olmaktadır (Nayak ve diğ., 2021). Sünek malzemelerde düşük açılarda daha az darbe etkisi görülüp çarpma kuvvetinin yatay hız bileşen etkisinin büyük

olması aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyine nüfuz etmesini sağlar ve mikro kesme ve mikro sürme etkilerini yaratarak çizilme ve kesilme gerçekleştirirken dikey bileşen ise dövme ve plastik deformasyon etkisi yaratır. Bu sebeple sünek malzemelerde çarpma açısına bağlı olarak bu hız bileşenlerinin büyüklüklerinin malzeme kaybına etkisi büyüktür (Sezer, 2017; Sınmazçelik ve Taşkiran, 2007; Suresh ve diğ., 2009).

Yüksek çarpma açılarındaki partikül hızının dikey bileşeni artmakta, mevcut olan enerjinin tümü çarpma ve mikro çatlama ile dağılarak erozyon mekanizması tipik çarpma biçiminde gerçekleşmektedir (Sezer, 2017; Suresh ve diğ., 2009). Çarpma açısı arttıkça parçacığın yatay bileşeninin etkisi azalacağından mikro kesme ve mikro sürme erozyon mekanizmaları hakimiyetini kaybederken dikey bileşen artarak yarattığı dövme ve plastik deformasyonun etkisi de artış gösterir.



Şekil 2.21. Paralel ve normal yönlerdeki çarpma hızı bileşenleri (Debnath ve diğ., 2015)

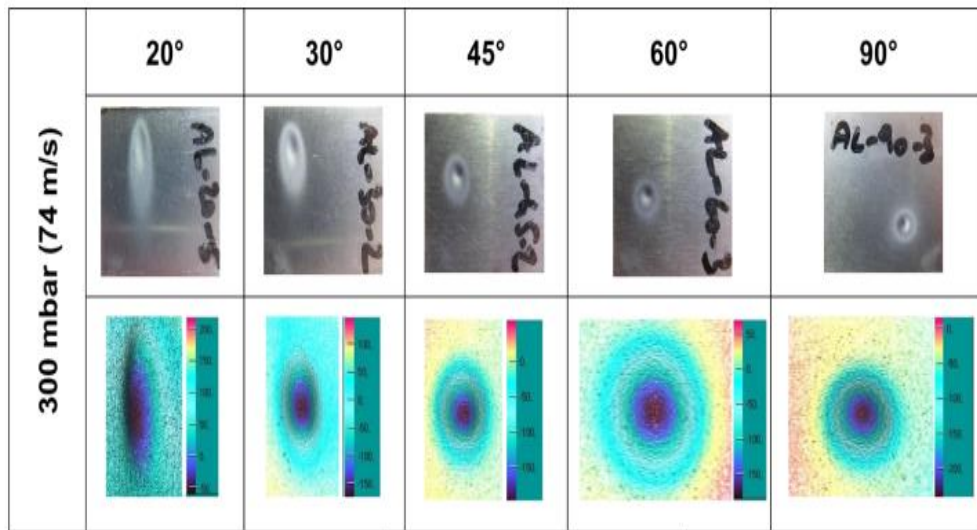
Gevrek malzemelere eğik açılarda katı partikül erozyonu uygulandığında aşındırıcı partiküller malzemeyi süneklerdeki kadar kolay kesemez, eğik açıda partiküllerin gevrek malzemeye aktardığı enerji az olacağından sünek malzemelerdeki kadar aşınma olmaz. Burada malzemeye aktarılan enerjiyi daha çok hızın dikey bileşeni belirler. Bu nedenle gevrek malzemelerde eğik açılı çarpmada görülen erozyon mekanizması dik açılı çarpmadaki gibidir fakat aşınmasında parçacığın düşey hız bileşeninin çok bir etkisi olmayıp dikey hız bileşeninin etkisi daha hakim olduğundan ve dik açılı duruma kıyasla dikey hız bileşeni daha düşük bir değer aldığından malzemeye aktarılan enerji dolayısıyla erozif aşınma daha az olur.

Hedef malzeme ve aşındırıcı parçacıklar arasındaki sürtünme katsayısı yüksekse, parçacıkların dikey hız bileşenlerine ek olarak düşey hız bileşenlerinin de malzemeye enerji aktarması ve erozif aşınmada artış olması beklenir (Barkoula ve Kocsis, 2002).

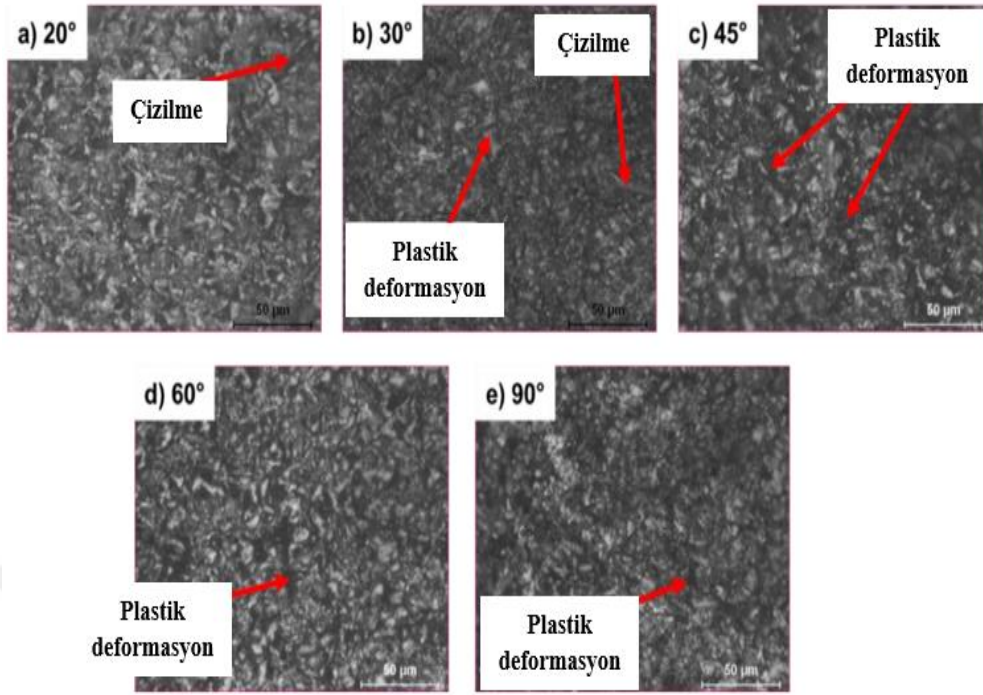
AA6061 alaşımının katı partikül erozyonu davranışı üzerine yapılan bir çalışmada (Acar ve diğ., 2017) 0,5 mm kalınlığındaki AA6061 alaşımının ortam sıcaklığında, aşındırıcı olarak ortalama boyutu 50 μm olan alümina partikülleri kullanarak farklı çarpma açıları (20° , 30° , 45° , 60° , 90°) ve farklı çarpma hızlarında (74, 100, 150, 195 m/s) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, şekil 2.22'den görüldüğü üzere çarpma açısı arttıkça aşınma izinin eliptik formdan dairesele dönüştüğü ve maksimum krater derinliğinin genel olarak artış göstererek 90° çarpma açısında en yüksek değere ulaştığı, daha düşük çarpma açılarında daha fazla kayma ve daha az penetrasyonun gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

şekil 2.23'ten görüldüğü üzere plastik deformasyon ve izilmenin başlıca erozyon mekanizmaları olduğu, genel olarak tüm çarpma açılarında plastik deformasyon erozyon mekanizması gerçekleşirken düşük çarpma açılarında kesme ve normal gerilmeler etkili olup daha yüksek çarpma açılarında kesme gerilmelerinin etkisini kaybederek normal gerilmelerin daha etkili olmasından kaynaklı olarak çarpma açısının artmasıyla izilmenin etkisini kaybettiği gözlemlenmiştir (Acar ve diğ., 2017).

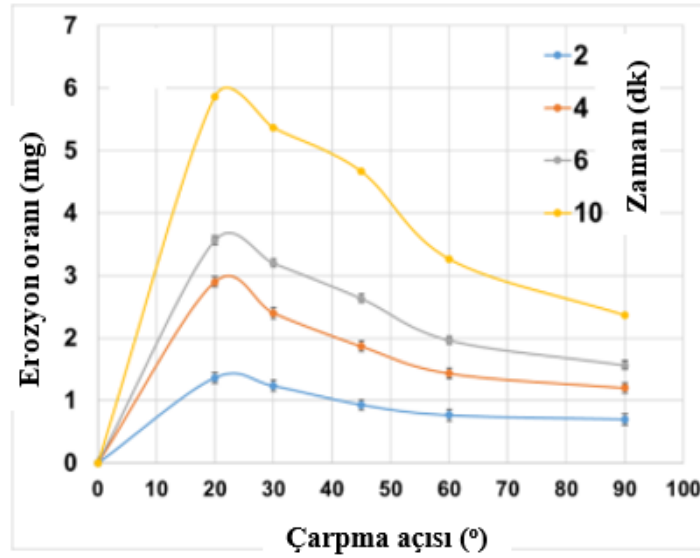
şekil 2.24'ten görüldüğü üzere sünek bir malzeme olan AA6061 alaşımında aşınma esas olarak kesme kuvvetlerinden kaynaklandığından maksimum erozyon oranının tüm maruz kalma süreleri için aşındırıcı parçacığın daha yüksek teğetsel kuvvet ve daha düşük normal kuvvete sahip olduğu 20° gibi düşük bir çarpma açısında meydana gelerek sünek erozyon davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir (Acar ve diğ., 2017).



şekil 2.22. AA6061 alaşımı için 74 m/s çarpma hızında, farklı çarpma açılarında elde edilen test edilmiş numuneler üzerinde erozyon krateri ve izleri (Acar ve diğ., 2017)



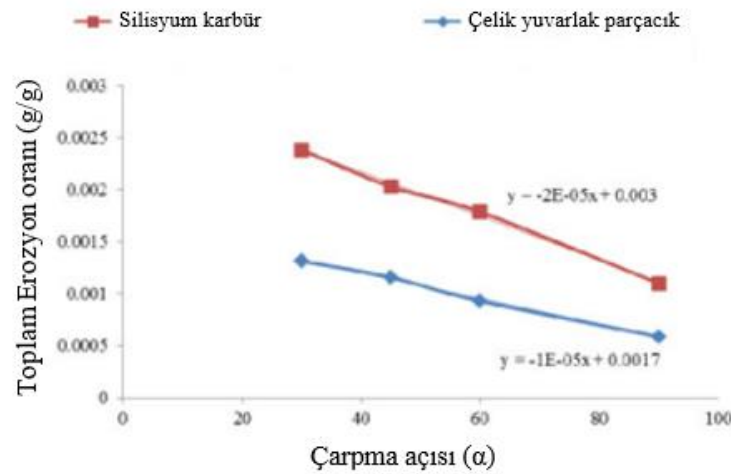
Şekil 2.23. AA6061 alaşımı için farklı çarpma açılarında test numunesi yüzeylerinden elde edilen optik mikrograflar a) 20°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 90° (Acar ve diğ., 2017)



Şekil 2.24. AA6061 alaşımı için 74 m/s çarpma hızında farklı çarpma açıları ve maruz kalma sürelerine bağlı olarak elde edilen erozyon oranları (Acar ve diğ., 2017)

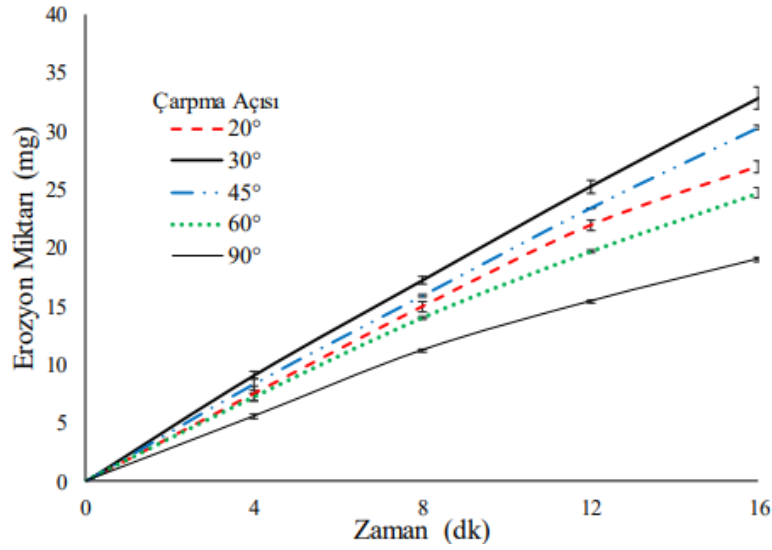
AISI D2 üzerinde köşeli silisyum karbür ve çelik yuvarlak kum partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonunun gerçekleştirildiği bir çalışmada (Torres ve diğ., 2014) partikül şeklinin erozyona etkisini incelemek amacıyla SEM mikrografları sırasıyla Şekil 2.12a ve Şekil 2.12b'de gösterilen ikisi de 400-420 µm partikül boyutuna, 21± 2,5 g/dk

aşındırıcı akış hızına sahip köşeli silisyum karbür (SiC) ve silisyum karbür parçacığının ağırlığından iki kat fazla olması sebebiyle $48,5 \pm 3,5$ g/dk aşındırıcı akış hızına sahip çelik yuvarlak kum partikülleri kullanılarak AISI D2 üzerinde 24 ± 2 m/s çarpma hızı, 10 mm nozul-numune mesafesi, 10 dk maruz kalma süresi ve farklı çarpma açılarında (30° , 45° , 60° ve 90°) katı partikül erozyonu uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan 30° ve 45° çarpma açılarında aşındırıcı partikül akışının daha yüksek ıraksaması sebebiyle aşınma izinin eliptik, 60° ve 90° çarpma açılarında ise aşınma izinin daha küçük ve nozulun dairesel geometrisi sebebiyle dairesel şekle sahip olduğu, Şekil 2.25'ten görüldüğü üzere her iki partikül şekline sahip (köşeli ve küresel) aşındırıcı parçacıklar için de AISI D2 malzemesinin maksimum erozyon oranının 30° çarpma açısında gerçekleştiği sünek erozyon davranışı sergilediği ve çarpma açısının artmasıyla erozyon oranlarında düşüş gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.25. İki farklı aşındırıcıyla aşınan AISI D2 malzemesinin çarpma açısına bağlı olarak toplam erozyon oranı grafiği (Torres ve diğ., 2014)

Yüksek hızlarda metalik malzemelerin erozyon davranışının incelendiği bir çalışmada (Budur ve Gedikli, 2019) AA6061, Ti-6Al-4V alaşımları ve SS304 paslanmaz çelik metalik malzemelerin yüksek hızlardaki erozyon davranışını araştırmak amacıyla hem 90° sabit çarpma açısı ve farklı çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) hem de 100 m/s sabit çarpma hızı ve farklı çarpma açılarında (20° , 30° , 45° , 60° , 90°) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.26'da görüldüğü üzere, SS304 malzemesinde en yüksek erozyon miktarının 30° , en düşük erozyon miktarının ise 90° çarpma açısında meydana gelen sünek erozyon davranışı sergilediği gözlemlenmiştir.



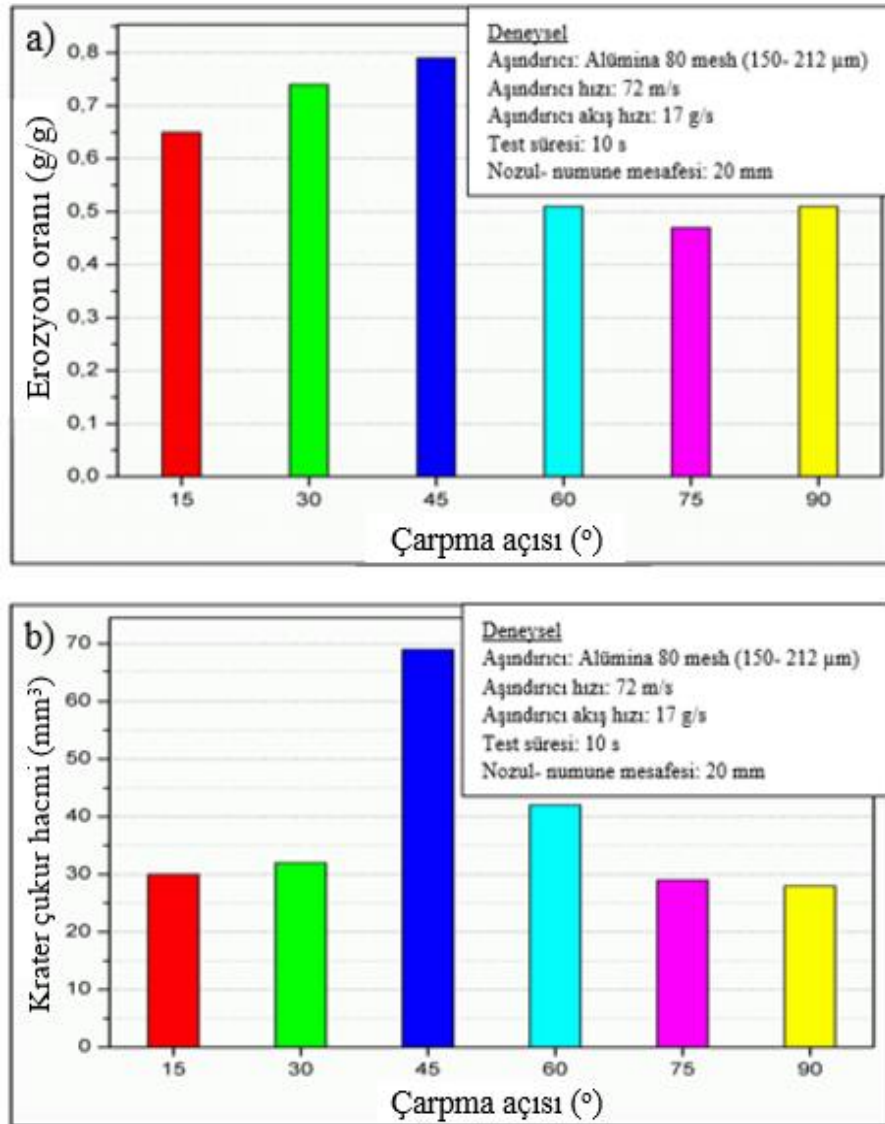
Şekil 2.26. SS304 malzemesi için 100 m/s çarpma hızında ve farklı çarpma açılarında maruz kalma süresine bağlı olarak erozyon miktarları (Budur ve Gedikli, 2019)

Karbon fiber-metal tel hibrit takviyeli polimer kompozitlerin katı partikül erozyonu davranışının incelendiği bir çalışmada (Arslan ve diğ., 2018) dış tarafına ağ geometrisine sahip bir metal tel katman uygulanan, + 45/ -45 fiber oryantasyonlu karbon fiber kumaş içeren karbon fiber-metal tel örgü hibrit polimer kompozitlerine 3 bar püskürtme basıncında (72 m/s çarpma hızında), 20 mm nozul-numune mesafesinde, 10 saniye maruz kalma süresinde, farklı çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) ve 80 mesh (150-212 µm) boyutunda alümina partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

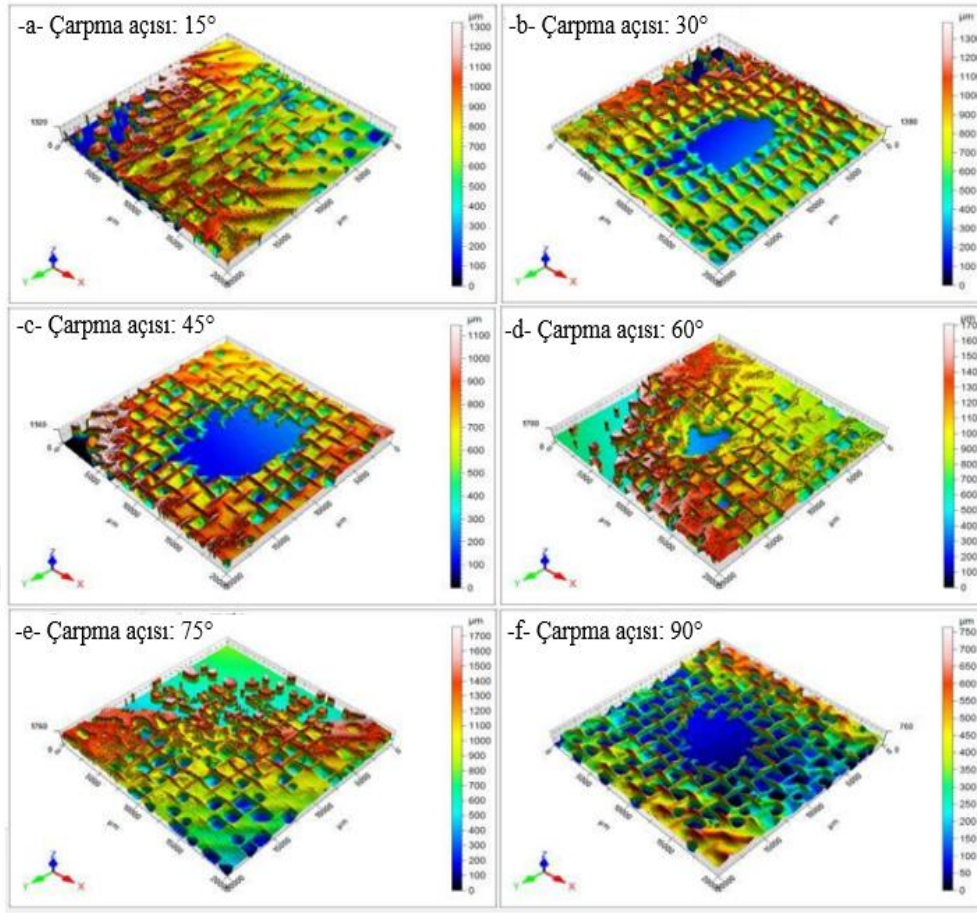
Şekil 2.27a'da görüldüğü üzere 15°, 30° ve 45° gibi eğik açılarda çarpma açısı arttıkça erozyon oranı artarken karbon fiber takviyeli polimer kompozit gibi yarı sünek malzemelerin genelde 45°-60° gibi çarpma açılarında maksimum erozyon oranı göstereceği beklenmesinin yanında hedef malzemenin metal teller içermesi sebebiyle maksimum erozyon oranının 45° çarpma açısında meydana gelerek baskın erozyon mekanizmasının yarı sünek bir şekilde çalıştığı, 75° çarpma açısında minimum erozyon oranı meydana geldiği gözlemlenmiştir (Arslan ve diğ., 2018).

Şekil 2.27b'de görüldüğü üzere, maksimum erozyon krater hacminin hedef malzemeden önemli miktarda malzemenin kaldırıldığı 45° çarpma açısında meydana geldiği gözlemlenmiştir (Arslan ve diğ., 2018).

Şekil 2.28'deki 3D yüzey pürüzlülük haritalarında yüzeyin ortalama pürüzlülüğünü gösteren Sa pürüzlülüklerinden görüldüğü üzere 45° çarpma açısında (Şekil 2.28c) karbon takviye ve metal tel kaldırılarak metal teller arasında bağlantının koptuğu ve erozyon kraterinin numune yüzeyine yayılarak malzemede ciddi hasar ve malzeme kaldırılmasının meydana geldiği, 90° çarpma açısında (Şekil 2.28f) metal tel ve karbon fiberler uzaklaştırılmış olmasına rağmen orta erozyon bölgesi dışında ağırlık kaybı ve metal tellerde ayrılma gerçekleşmediği gözlemlenmiştir (Arslan ve diğ., 2018). Buradan çarpma açısının hedef malzemenin erozyon davranışı üzerinde önemli bir rolü olduğunu görmekteyiz.



Şekil 2.27. CFRP-metal tel hibrit takviyeli kompozitin çarpma açısına bağlı olarak a) erozyon oranları, b) erozyon krater hacimleri (Arslan ve diğ., 2018)



Şekil 2.28. Farklı çarpma açılarında aşınmış CFRP-metal tel hibrit takviyeli kompozitin 3D yüzey pürüzlülük haritaları a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90° (Arslan ve diğ., 2018)

2.1.4. Püskürtme Basıncı ve Partikül Hızı

Püskürtme basınçlarındaki artışa bağlı olarak nozuldan çıkan aşındırıcı partiküllerin hızları artar, bu da kinetik enerjilerini artırarak hedef malzemeye daha yüksek bir enerji aktarmasına sebep olur (Debnath ve diğ., 2015).

Aşındırıcı parçacık çarpma hızı çok düşük olduğu durumda hedef malzemeye çarptığında meydana gelen gerilmeler plastik deformasyon oluşturmak için yetersiz kalmakta, aşınma yüzey yorulması şeklinde gerçekleşmektedir. Aşındırıcı parçacıklar çok düşük hızlarda hedef malzemenin özellikleri ve aşındırıcı çarpma açısına da bağlı olarak malzeme yüzeyinde erozyon davranışı göstermeyip yorulmaya neden olurken parçacık hızının artmasıyla malzeme plastik deformasyona uğrayabilir ve tekrarlayan plastik deformasyonlar sonucu aşınma gerçekleşir, dolayısıyla erozyon gözlemlenmeye başlar

(Barkoula ve Kocsis, 2002; Sezer, 2017). Gevrek malzemelerde aşınma yüzey altı çatlamasıyla ilerler (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Hedef malzemeye çarpan aşındırıcı parçacıkların etkinliği Denklem (2.1)'de ifade edilen parçacığın sahip olduğu kinetik enerjiyle doğru orantılıdır (Önen, 2016).

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de m aşındırıcı parçacığın kütlesi ve v aşındırıcı parçacığın hızıdır (Önen, 2016).

Çarpma hızı daha düşük olduğu durumda laminar yapıya benzer şekilde bir partikül akışı meydana gelirken çarpma hızı daha yüksek olduğunda, laminar ve türbülanslı yapının bir arada partikül akışı gerçekleşmektedir (Debnath ve diğ., 2015). Aşındırıcı parçacıklar çarpma hızları yükseldikçe daha yüksek kinetik enerjiye sahip olur ve hedef malzemenin yüzeyine daha yüksek enerjilerle çarpacağından malzemeye daha yüksek enerji aktararak plastik deformasyona neden olabilir ve aşındırıcı parçacıkların tekrarlı olarak hedef malzemeye çarpması ile malzemeyi sürekli plastik deformasyona uğratarak aşınma gerçekleştirirler, böylece daha yüksek erozyon oranlarına sebep olurlar.

Öte yandan parçacıkların çarpma hızları çok yüksek olduğu durumlarda hedef malzemenin darbeye maruz kalan yüzeyinde lokal ergime (yüzey erimesi) meydana gelebilmekte, hedef malzeme üzerinde krater açılmasına veya tamamen delinmesine sebep olabilmektedir (Arslan, 2017; Yıldırım, 2013).

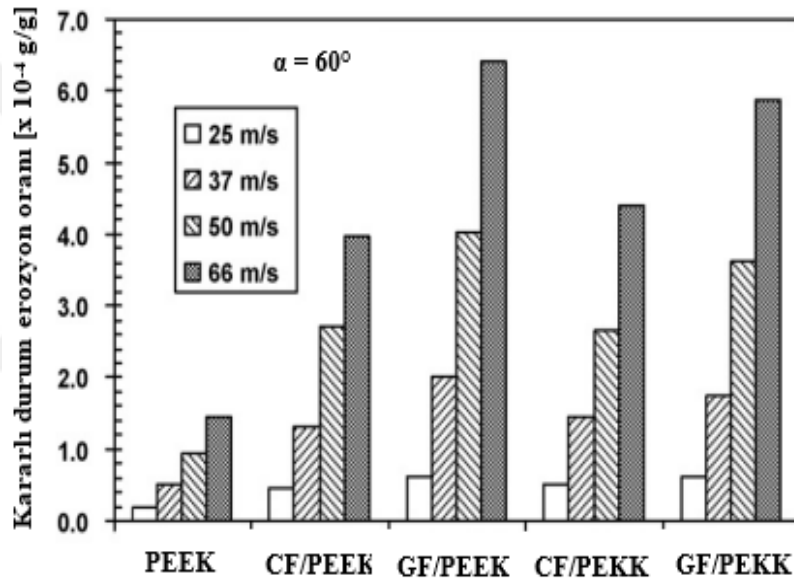
Erozyon oranı ile çarpma hızı arasındaki ilişkiyi ifade eden Denklem (2.2) aşağıda verilmiştir (Arjula ve diğ., 2008);

$$E = Kv^n \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'deki E erozyon oranı, v çarpma hızı, K orantı sabiti olarak adlandırılıp diğer değişkenlerin etkilerini içerir, n ise hız üssüdür. Buradaki hız üssü olan n değeri tipik olarak sünek davranış gösteren polimerik malzemeler için $2 < n < 3$, kırılğan davranış gösteren polimer esaslı kompozitler için ise $3 < n < 5$ aralığında olmaktadır (Arjula ve diğ., 2008; Barkoula ve Kocsis, 2002; Debnath ve diğ., 2015).

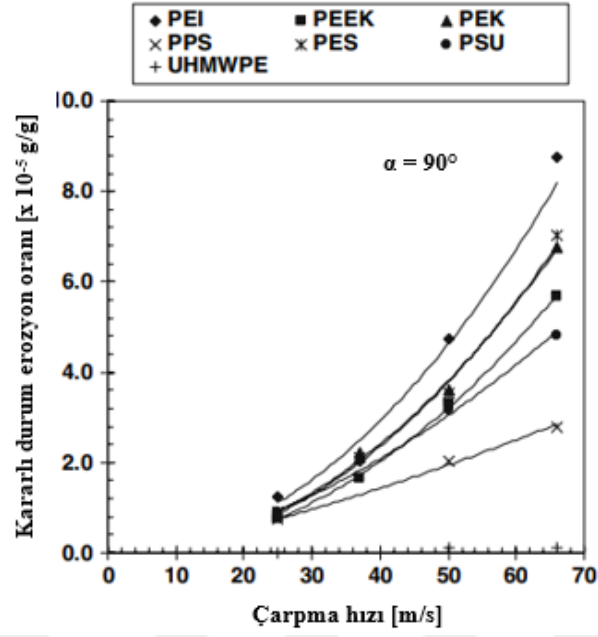
Tek yönlü fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin katı partikül erozyonu ile ilgili yapılan bir çalışmada (Suresh ve diğ., 2009) tek yönlü fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin farklı çarpma açıları (15°, 30°, 60°, 90°), çarpma hızları (25, 37, 50, 66 m/s), 10 mm nozul-numune mesafesinde, oda sıcaklığında (RT), 200± 50 µm boyutunda köşeli silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

Polimer malzeme ve polimer matrisli kompozit malzemelere 60° çarpma açısında, farklı çarpma hızlarında uygulanan testte elde edilen verilerden Şekil 2.29’da gösterildiği üzere, tüm malzemelerde çarpma hızı artışıyla aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisinin artarak erozyon oranında artış gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir (Suresh ve diğ., 2009).



Şekil 2.29. 60° çarpma açısında çarpma hızının PEEK polimer malzeme ve çeşitli polimer matrisli kompozit malzemelerin kararlı durum erozyon oranına etkisi (Suresh ve diğ., 2009)

Yüksek performanslı termoplastik polimerlerin katı partikül erozyonu davranışının incelendiği bir çalışmada (Arjula ve diğ., 2008) farklı çarpma açıları (15°, 30°, 60°, 90°) ve çarpma hızlarında (25, 37, 50, 66 m/s), 10 mm nozul-numune mesafesinde, oda sıcaklığında, 200± 50 µm boyutunda silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.30’dan görüldüğü üzere, aynı deneysel koşullar altında çarpma hızları artırıldığında partiküllerin daha fazla kinetik enerjiye sahip olup polimer malzemelere daha fazla enerji aktararak daha fazla aşınmaya sebep olduğu ve erozyon oranlarında artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

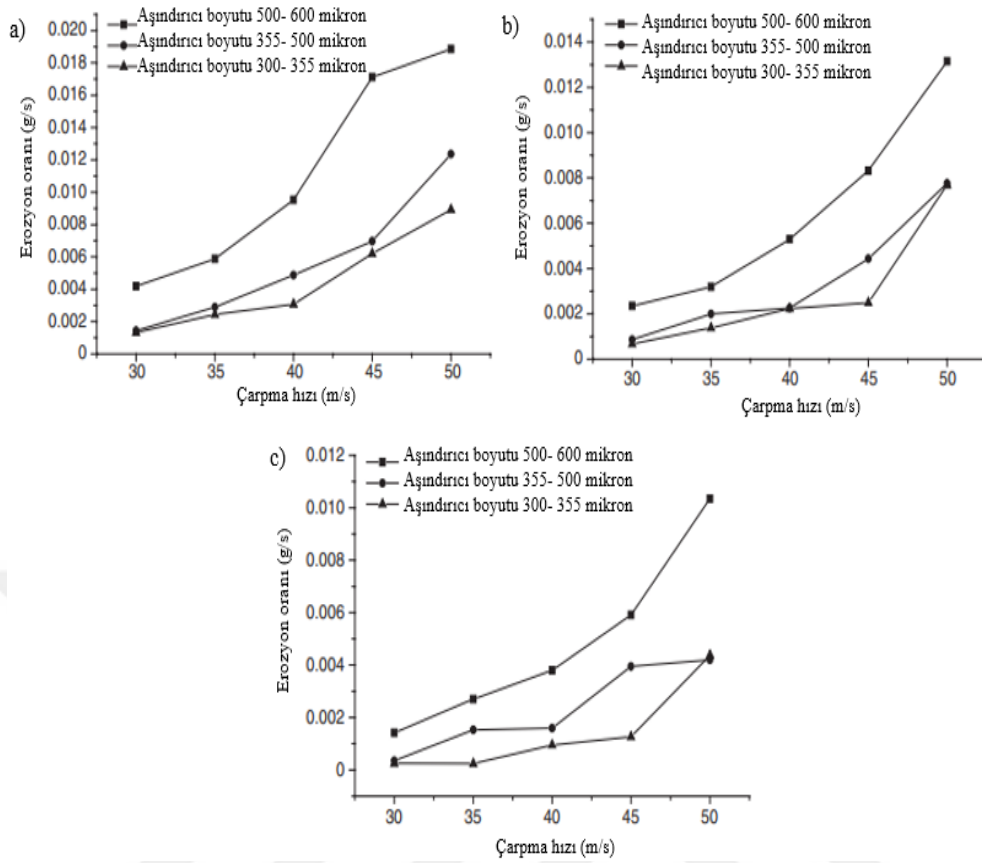


Şekil 2.30. Çarpma hızının bir fonksiyonu olarak çeşitli polimerlerin kararlı durum erozyon oranları (Arjula ve diğ., 2008)

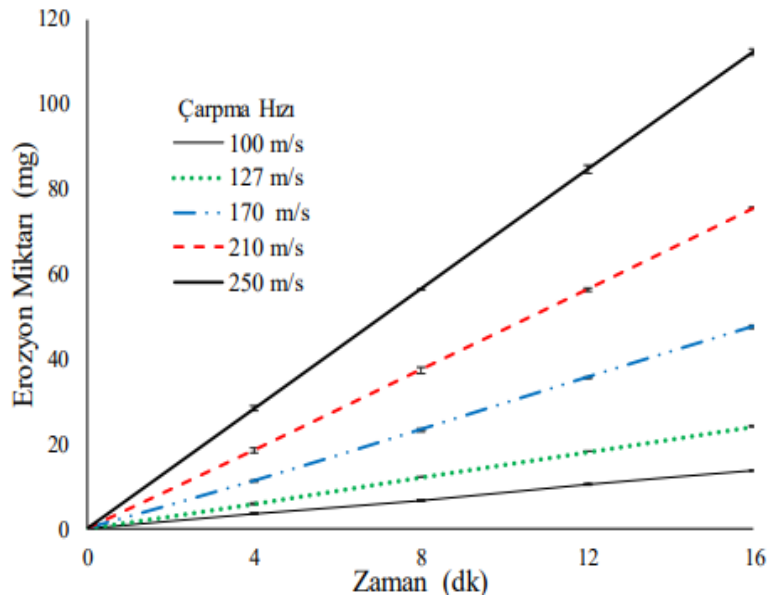
Farklı operasyon koşulları altında Teflonun erozyon özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Debnath ve diğ., 2015) farklı çarpma açıları (15°-90°), çarpma hızları (30, 40, 50 m/s), aşındırıcı boyutları (300–355 µm, 355–500 µm, 500–600 µm), nozul-numune mesafeleri (15, 20, 25 mm) ve ortam sıcaklığı altında gerçekleştirilen testte, Şekil 2.31’de gösterildiği üzere Teflon malzemesine çarpma hızları ve aşındırıcı boyutları değiştirilerek katı partikül erozyonu uygulandığında tüm çarpma açıları ve aşındırıcı boyutları için çarpma hızlarının artmasıyla Teflonun erozyon oranlarında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Yüksek hızlarda metalik malzemelerin erozyon davranışının incelendiği bir çalışmada (Budur ve Gedikli, 2019) AA6061, Ti-6Al-4V alaşımları ve SS304 paslanmaz çelik metalik malzemelerin yüksek hızlardaki erozyon davranışını araştırmak amacıyla hem 90° sabit çarpma açısı ve farklı çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) hem de 100 m/s sabit çarpma hızı ve farklı çarpma açılarında (20°, 30°, 45°, 60°, 90°) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

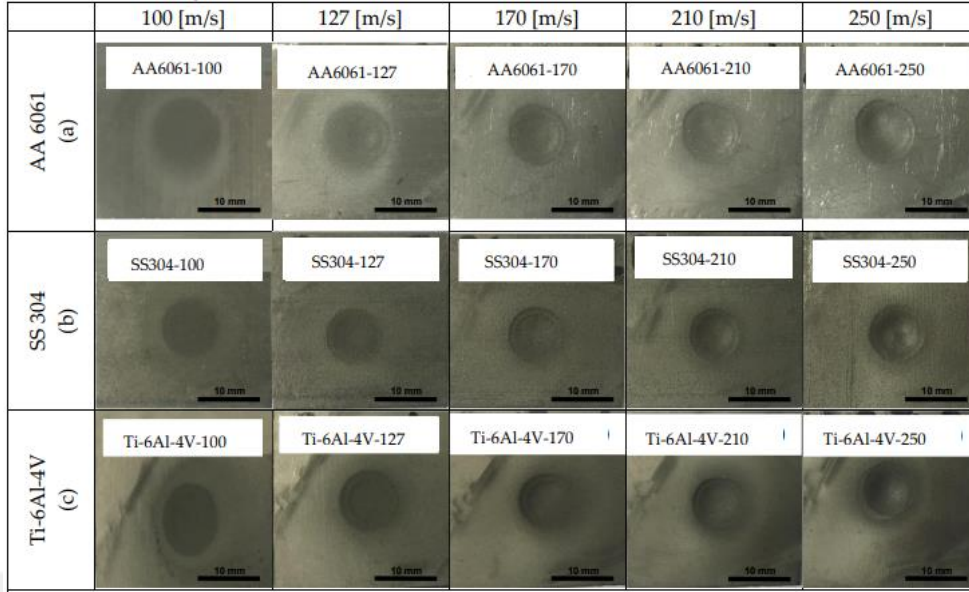
Şekil 2.32’den görüldüğü üzere, çarpma hızının artmasıyla erozyon miktarının arttığı, Şekil 2.33’ten görüldüğü üzere 90° çarpma açısında çarpma hızı arttıkça tüm malzemelerin krater derinliklerinde de artış meydana geldiği gözlemlenmiştir (Budur ve Gedikli, 2019).



Şekil 2.31. Farklı parçacık boyutu ve çarpma açılarındaki katı partikül erozyonunda çarpma hızının erozyon oranına etkisi a) 30°, b) 60°, c) 90° çarpma açısında (Debnath ve diğ., 2015)

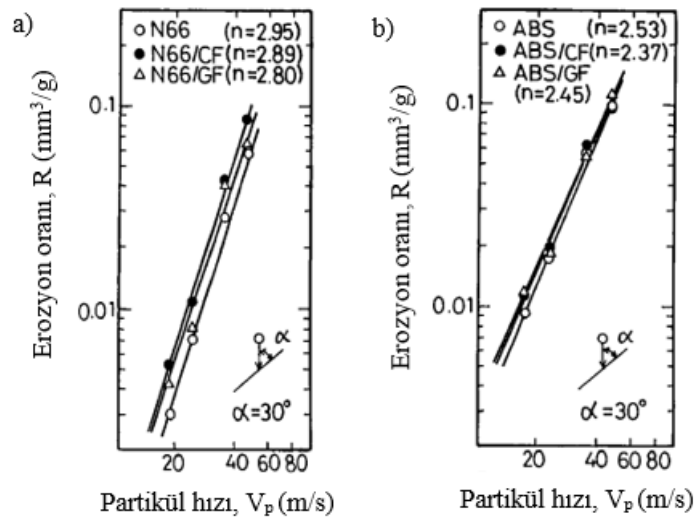


Şekil 2.32. Ti-6Al-4V alaşımının 90° çarpma açısında, farklı maruz kalma sürelerinde çarpma hızına bağlı olarak erozyon miktarları (Budur ve Gedikli, 2019)



Şekil 2.33. 90° çarpma açısında, farklı çarpma hızları için numunelerde meydana gelen krater görüntüleri a) AA6061, b) SS304, c) Ti-6Al-4V (Budur ve Gedikli, 2019)

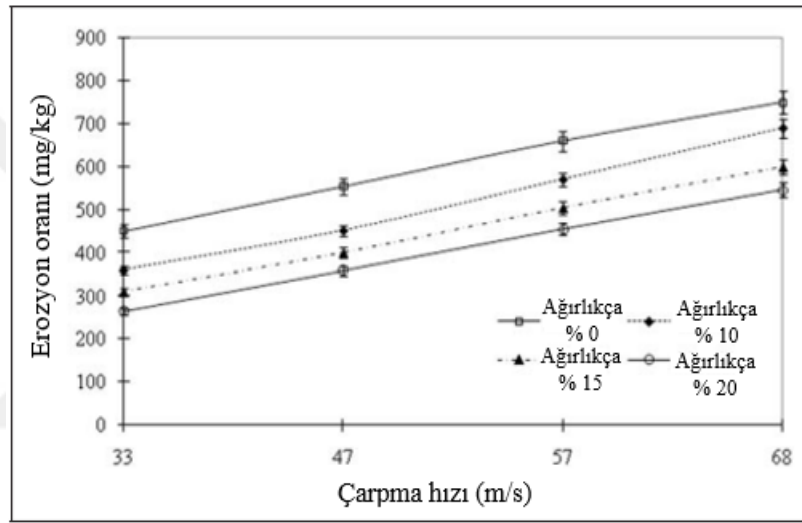
Fiber takviyeli plastiklerin katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Miyazaki ve Takeda, 1993) N66 (Naylon 66), ABS (akrilonitril bütadien stiren) polimer malzemeleri ve onların kompozitlerinin farklı çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 90°) ve 18 m/s'den 47 m/s'ye değişen çarpma hızlarında, 100-150 µm boyutunda SiC aşındırıcı partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, partikül hızının erozyon oranına etkisine bakılarak Şekil 2.34'te elde edilen verilerden partikül hızının artmasıyla erozyon oranlarının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.34. 30° çarpma açısı için çarpma hızının erozyon oranına etkisi a) N66 ve onun kompozitleri, b) ABS ve onun kompozitleri (Miyazaki ve Takeda, 1993)

Granit dolgulu cam-epoksi hibrit kompozitlerin erozif aşınma performanslarının incelendiği bir çalışmada (Rout ve Satapathy, 2013) içeriğindeki cam fiber oranı sabit tutularak (%40) dört farklı ağırlık oranlarında (ağırlıkça %0, %10, %15 ve %20) granit partikül dolgulu cam-epoksi hibrit kompozitlerin farklı çarpma açıları (30°, 45°, 60°, 90°), çarpma hızları (33, 47, 57, 68 m/s) ve aşındırıcı boyutlarında (100, 150, 200, 250 µm) silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

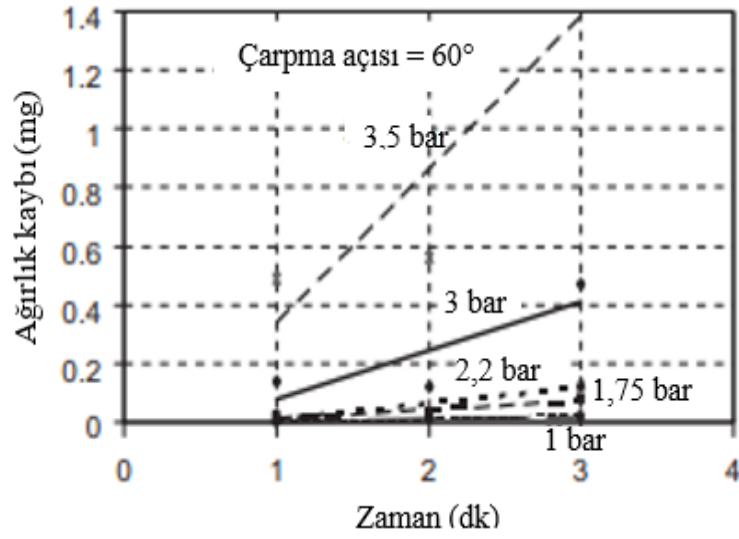
Şekil 2.35'ten görüldüğü üzere tüm numunelerde çarpma hızındaki artışla erozyon oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir (Rout ve Satapathy, 2013).



Şekil 2.35. Çarpma hızının kompozitlerin erozyon oranına etkisi (Rout ve Satapathy, 2013)

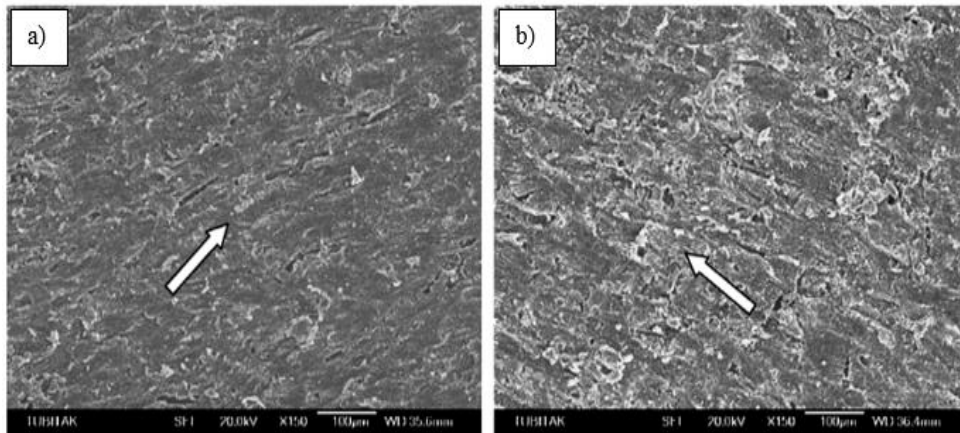
Epoksi esaslı tek yönlü cam fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin erozyon davranışının incelendiği bir çalışmada (Fouad ve diğ., 2011) farklı püskürtme basınçları (1, 1,75, 2,2, 3, 3,5 bar), çarpma açıları (30°, 60° ve 90°), maruz kalma süreleri (1, 2, 3 dk) ve 150± 15 µm partikül boyutunda silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.36'da ifade edildiği üzere GFRP (cam fiber takviyeli polimer) kompozitin maruz kalma süresi ve basıncın bir fonksiyonu olarak elde edilen ağırlık kaybı grafiğine bakıldığında püskürtme basıncı dolayısıyla çarpma hızının ağırlık kaybı üzerinde rolünün büyük olduğu ve arttıkça ağırlık kaybının da artış gösterdiği gözlemlenmiştir (Fouad ve diğ., 2011).

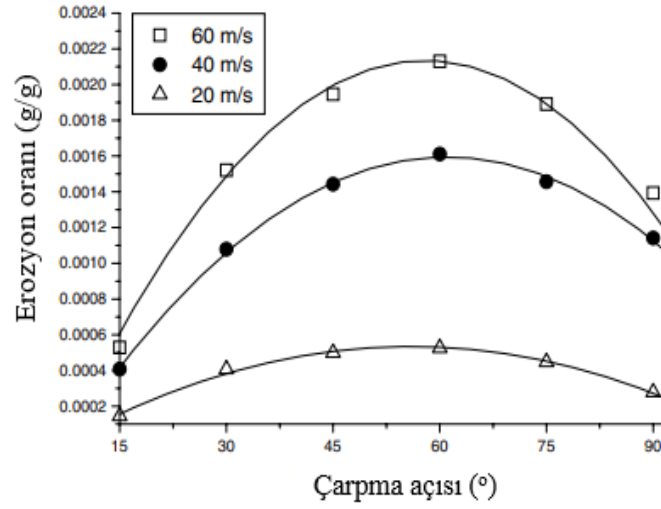


Şekil 2.36. Farklı basınçlarda maruz kalma süresinin bir fonksiyonu olarak GFRP kompozitin ağırlık kaybı (60° çarpma açısında) (Fouad ve diğ., 2011)

Polifenilen sülfid (PPS) kompozitlerinin erozyon aşınma davranışının incelendiği bir çalışmada (Sınmazçelik ve Taşkiran, 2007) rastgele yönlendirilmiş kısa cam fiber (ağırlıkça %40) ve CaCO_3 mineral partikül (ağırlıkça %25) takviyeli polifenilen sülfid kompozitlerinin farklı çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°), partikül hızları ($v = 20, 40$ ve 60 m/s), ortalama boyutu $150\text{-}200\ \mu\text{m}$ ve kütleli debisi 9 g/s olan silis kumu ile $4,5$ bar basınçta katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.37’de gösterilen 15° çarpma açısı, 20 ve 60 m/s çarpma hızlarında aşınma yüzeylerinin mikrograflarına bakıldığında düşük çarpma hızına (20 m/s) kıyasla daha yüksek çarpma hızında (60 m/s) numune yüzeyinin daha pürüzlü olduğu ve Şekil 2.38’den görüldüğü üzere çarpma hızı arttıkça malzemenin erozyon oranının da artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

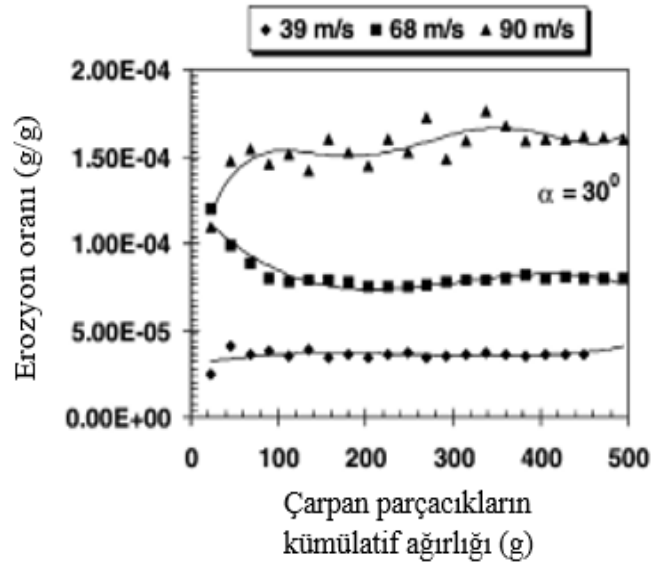


Şekil 2.37. 15° çarpma açısında aşınmış yüzeylerin SEM mikrografları a) 20 m/s, b) 60 m/s (Sınmazçelik ve Taşkiran, 2007)



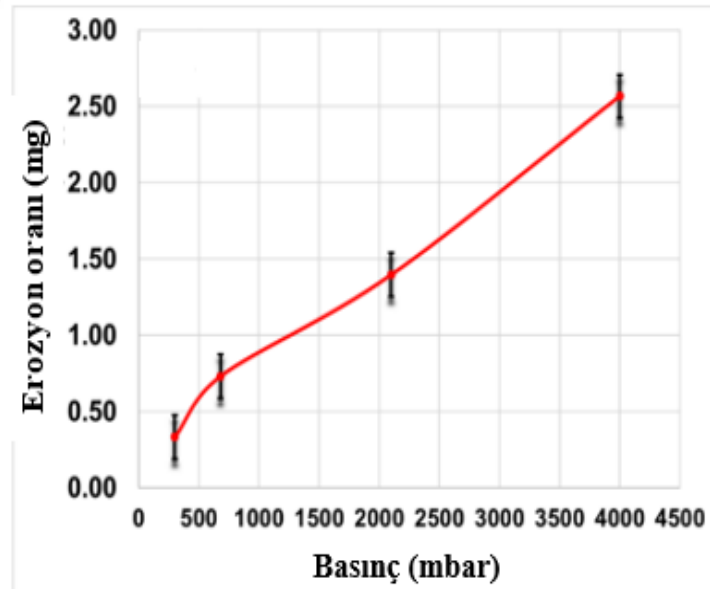
Şekil 2.38. Farklı çarpma hızları için çarpma açılarının bir fonksiyonu olarak PPS kompozitinin erozyon oranları (Sınmazçelik ve Taşkiran, 2007)

Çeşitli poliarileterketon ve kompozitlerinin katı partikül erozyonu davranışının incelendiği bir çalışmada (Harsha ve diğ., 2003) PEKK'in aşındırıcı olarak 150-212 μm arasında değişen büyüklüklerde köşeli silis kumu kullanılarak farklı çarpma açıları (15°, 30°, 60°, 90°) ve hızlarda (39, 68, 90 m/s), 10 mm nozul-numune mesafesinde, oda sıcaklığında katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.39'dan PEKK'in 30° çarpma açısında çeşitli çarpma hızlarındaki erozyon oranlarına bakıldığında çarpma hızı arttıkça erozyon oranının da artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



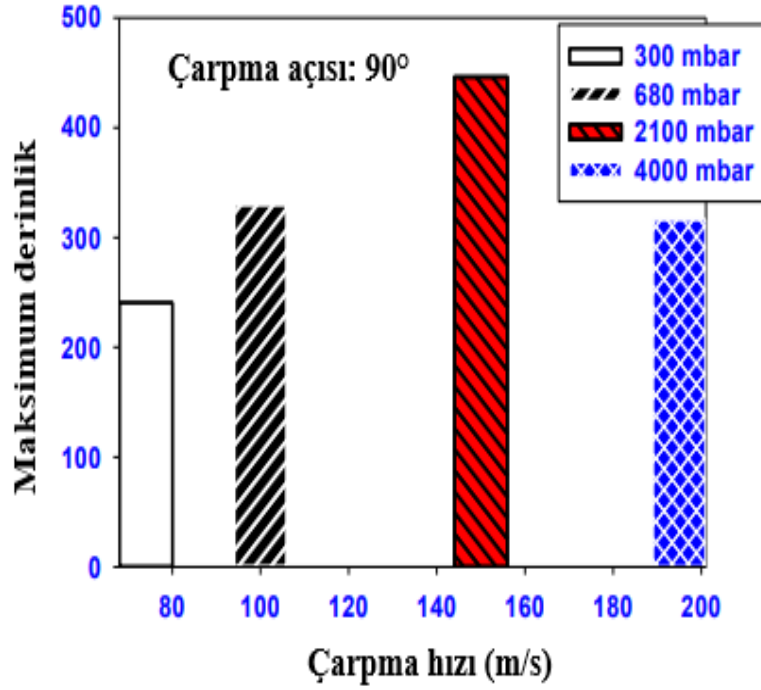
Şekil 2.39. Farklı çarpma hızları ve 30° çarpma açısında aşındırıcı parçacığın kümülatif ağırlığının bir fonksiyonu olarak PEKK için erozyon oranları (Harsha ve diğ., 2003)

AA6061 alaşımının katı partikül erozyonu davranışı üzerine yapılan bir çalışmada (Acar ve diğ., 2017) 0,5 mm kalınlığındaki AA6061 alaşımının ortam sıcaklığında, aşındırıcı olarak ortalama boyutu 50 μm olan alümina partikülleri kullanarak farklı çarpma açıları (20° , 30° , 45° , 60° , 90°) ve farklı çarpma hızlarında (74, 100, 150, 195 m/s) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, şekil 2.40'ta görüldüğü üzere püskürtme basıncı dolayısıyla çarpma hızındaki artışla aşındırıcıların hedef malzemeye aktardığı kinetik enerji arttığından daha yüksek erozyon oranlarının elde edildiği, çarpma hızı ve maksimum krater derinliğinin ilişkisini gösteren şekil 2.41'den görüldüğü üzere çarpma hızı arttığı 150 m/s'ye kadar krater derinliğinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Fakat belirli bir çarpma hızının üzerinde aşındırıcı parçacıkların tıpkı bilyalı dövmede olduğu gibi dövme etkisi yaratarak basma gerilmesi ile plastik deformasyon oluşturup çok sayıda dislokasyon meydana getirmesi ile bu dislokasyonların artık birbirine takılıp hareket edemez hale gelmeleri ve pekleşme olarak malzeme yüzeyinin sertleşmesine sebebiyet vermeleri dolayısıyla aşınmaya neden olmaktan ziyade yüzeyi sertleştirdiği için 195 m/s çarpma hızında ise krater derinliğinde bir miktar azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.



şekil 2.40. AA6061 alaşımı için farklı çarpma hızlarında erozyon oranları (300 mbar= 74 m/s, 680 mbar= 100 m/s, 2100 mbar= 150 m/s, 4000 mbar= 195 m/s) (Acar ve diğ., 2017)

Katı partikül erozyonunda aşındırıcı çarpma hızıyla ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde diğer parametreler sabit iken parçacık hızının artmasıyla genel olarak ağırlık kaybının artış gösterdiği görülmektedir.



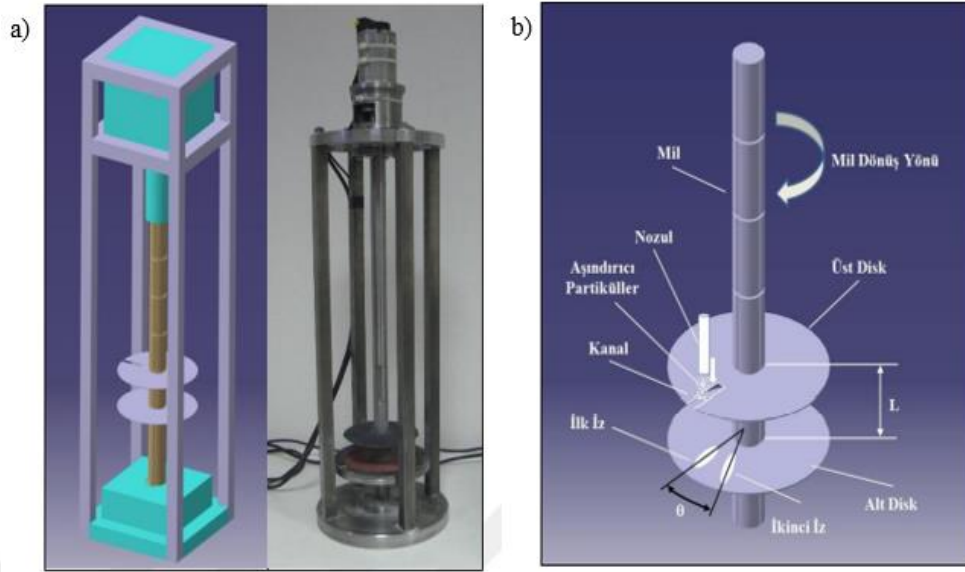
Şekil 2.41. 90° çarpma açısında farklı çarpma hızlarına bağlı olarak erozyon kraterinde meydana gelen maksimum derinlik değerleri (300 mbar= 74 m/s, 680 mbar= 100 m/s, 2100 mbar= 150 m/s, 4000 mbar= 195 m/s) (Acar ve diğ., 2017)

2.1.4.1. Döner Disk Metodu ile Partikül Çarpma Hızı Ölçümü

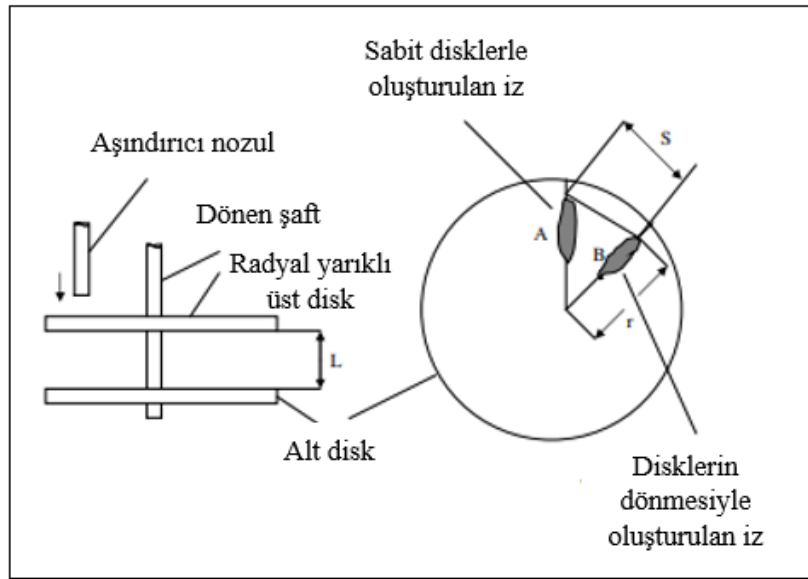
Parçacık çarpma hızı sıkıştırılmış havanın basıncı değiştirilerek ayarlanabilmekle beraber katı partikül erozyonunda erozyon oranını etkileyen önemli bir parametre olduğu için partikül hızının bilinmesi önem arz etmektedir (Khalfan, 2008; Önen, 2016; Suresh ve diğ., 2009). Bu sebeple döner disk hız ölçme metodu aşındırıcı partikül çarpma hızının ölçümü için yaygın olarak kullanılmaktadır (Srivastava ve Pawar, 2006).

Çift disk metodu olarak da bilinen döner disk metodu Şekil 2.42’de gösterilen düzenek ile ortak bir shaft üzerinde bulunan alt ve üst disk arasındaki uzaklık bilinerek belirli bir basınçla gönderilen partiküllerin hızları ölçülür (Arslan, 2017; Srivastava ve Pawar, 2006).

Öncelikle mil dönmezken dik açıyla gönderilen aşındırıcı parçacıklar üst taraftaki diskte bulunan delikten geçirilerek alt diskte Şekil 2.43’te gösterildiği gibi iz (A erozyon izi) oluşturması sağlanır daha sonra mil belirli bir devirde döndürülerek tekrar aşındırıcı parçacıklar püskürtülür ve alt diskte ikinci bir iz oluşumu (B erozyon izi) sağlanır (Arslan, 2017; Srivastava ve Pawar, 2006).



Şekil 2.42. a) Döner disk partikül hızı ölçme sistemi, b) Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler (Önen, 2016)



Şekil 2.43. Partikül hız ölçümü için kullanılan metodolojinin şematik diyagramı (Srivastava ve Pawar, 2006)

Denklem (2.3)'te gösterilen formül ile birinci diskten ikinci diske aşındırıcıların ulaşmasında geçen süre olan t (s), bu iki iz (A ve B erozyon izi) arasındaki açısal yer değiştirme olan θ açısı ($^{\circ}$) ve milin devir hızı olan n (rpm) kullanılarak hesaplanmaktadır (Arslan, 2017; Önen, 2016; Srivastava ve Pawar, 2006).

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (2.3)$$

Hesaplanan süre olan t (s) ve alt ile üst disk arasındaki mesafe olan L (m) Denklem (2.4)'teki formülde kullanılarak partikül hızı olan V (m/s) hesaplanmış olur (Arslan, 2017).

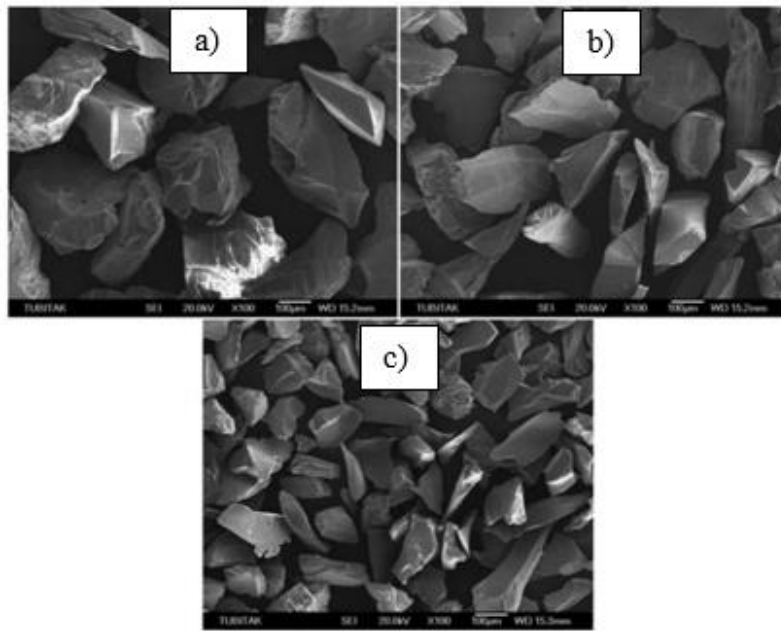
$$V = \frac{L}{t} \quad (2.4)$$

2.1.5. Partikül Boyutu

Aşındırıcı partiküllerin türü ve fiziksel özellikleri hedef malzemenin erozif aşınma özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Aşındırıcı partiküllerin şekil ve boyutundaki değişiklikler katı partikül erozyonunda dikkate değer değişiklikler yaratabilmektedir (Öztürk ve diğ., 2019).

Katı partikül erozyonunda aşındırıcı parçacıkların boyutlarındaki artış üzerlerinde taşıyabilecekleri kinetik enerji miktarını artırır dolayısıyla da başta hedef malzemenin özellikleri olmak üzere diğer parametrelere de bağlı olarak erozyon oluşturma ihtimalini artırır (Arslan, 2017).

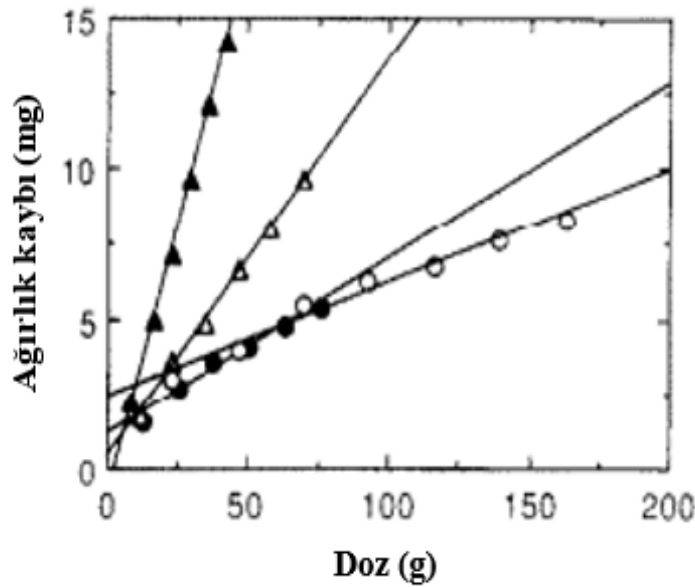
Şekil 2.44'te görüldüğü üzere katı partikül erozyonunda aynı türde çeşitli boyutlarda aşındırıcılar kullanılabilir.



Şekil 2.44. Alümina aşındırıcı partiküllerinin SEM fotoğrafları a) 60 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh (Avcu ve diğ., 2013)

Bismaleimid (BMI) polimerlerin katı partikül erozyonu ile ilgili bir çalışmada (Brandstädter ve diğ., 1991) çeşitli bileşimlerdeki bismaleimid termoset polimer malzemenin 60 m/s çarpma hızında, farklı boyutlardaki (42, 63, 143 ve 390 μm) köşeli Al_2O_3 aşındırıcı parçacıkları kullanılarak 90° çarpma açısında katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

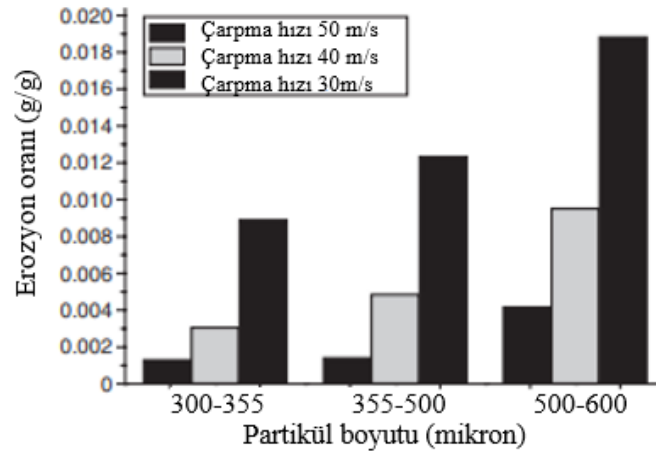
Şekil 2.45'te gösterildiği üzere bismaleimid polimer malzemesine farklı aşındırıcı boyutlarında katı partikül erozyonu uyguladığında daha büyük aşındırıcı partiküllerin daha az miktarda kullanılarak daha yüksek malzeme kayıpları meydana getirdiği gözlemlenmiştir (Brandstädter ve diğ., 1991).



Şekil 2.45. Farklı boyutlardaki köşeli Al_2O_3 aşındırıcı partikülleri tarafından aşındırılan bismaleimid polimerinin aşındırıcı miktarına bağlı olarak erozyon oranları (○): 42 μm , (●): 63 μm , (Δ): 143 μm , (▲): 390 μm (Brandstädter ve diğ., 1991)

Farklı operasyon koşulları altında Teflonun erozyon özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Debnath ve diğ., 2015) farklı çarpma açıları (15°-90°), çarpma hızları (30, 40, 50 m/s), aşındırıcı boyutları (300–355 μm , 355–500 μm , 500–600 μm), nozul-numune mesafeleri (15, 20, 25 mm) ve ortam sıcaklığı altında gerçekleştirilmiştir.

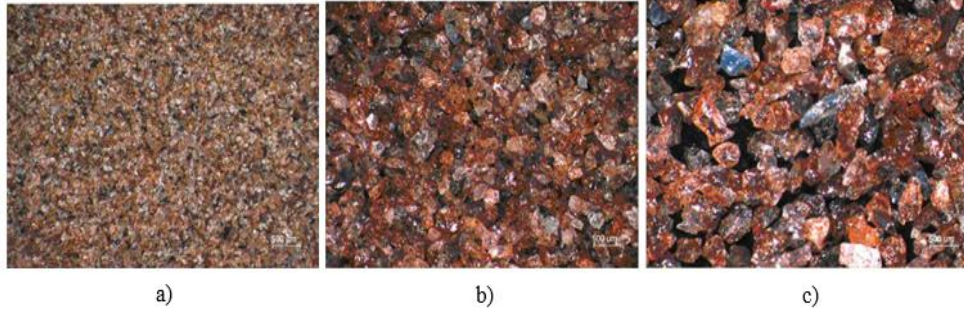
Şekil 2.46'da gösterildiği üzere Teflon malzemesine 30° çarpma açısında, farklı çarpma hızı ve aşındırıcı boyutlarında katı partikül erozyonu uygulandığında partikül boyutunun artmasıyla Teflonun erozyon oranlarında artış olduğu gözlemlenmiştir (Debnath ve diğ., 2015).



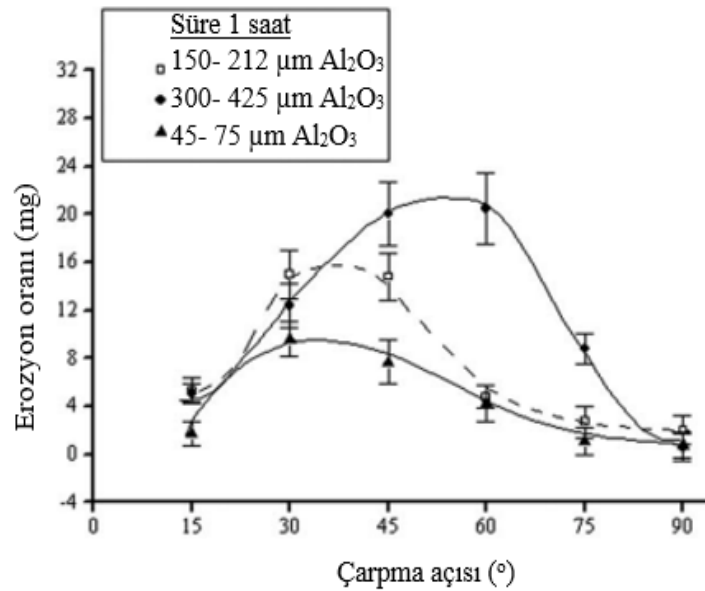
Şekil 2.46. Farklı çarpma hızlarında partikül boyutunun Teflonun erozyon oranına etkisi (çarpma açısı= 30°) (Debnath ve diğ., 2015)

Polifenilen sülfid kompozitinin erozyonuna aşındırıcı partikül boyutu etkisinin incelendiği bir çalışmada (Sinmazcelik ve Sari, 2009) rastgele yönlendirilmiş kısa cam fiber (ağırlıkça %40) ve mineral partikül (ağırlıkça %25) takviyeli polifenilen sülfid kompozitlerine farklı çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) ve maruz kalma sürelerinde (1, 3 ve 5 saat), Şekil 2.47’de gösterildiği üzere 45-75 µm 150-212 µm ve 300-425 µm olmak üzere üç farklı aşındırıcı boyutunda köşeli alüminyum oksit (Al₂O₃) partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, küçük boyutlu aşındırıcı partiküllerin fiberleri kırarak kadar büyük olmadığı, fiberler arasındaki küçük boşluklara nüfuz ederek matrisi daha kolay ve düzgün bir şekilde aşındırdığı böylelikle pürüzsüz matris ve fiber yüzeyleri oluşturduğu, kinetik enerjinin ($E_k = \frac{1}{2}mv^2$) kütle ile olan ilişkisi belli olduğundan aşındırıcı boyutu büyük olduğunda daha yüksek kinetik enerjileri sebebiyle aşındırıcı parçacıkların kolayca kırılabilmesi, matris ve kırık fiberler gibi küçük parçalarla kaplı olduğu ve derin boşluk oluşumları gerçekleştiği, fiberlerin arasındaki matrise nüfuz edip aşındıracak kadar küçük olmadığından fiberlerin arasında bulunan matrisin aşındırıcı parçacıklarla etkileşime girmeyerek konumunu koruduğu fakat diğer bölgelerde Şekil 2.48’de görüldüğü üzere daha büyük aşındırıcı boyutunun fiber kırılması bakımından yüksek yeteneğe sahip olarak ve fiberlerin konumlarından kolayca ayrılmasını sağlayarak daha yüksek kinetik enerjisi ile daha yüksek erozyon oranına sebep olduğu dolayısıyla daha pürüzlü matris ve fiber yüzeyleri elde edildiği ve hedef malzemenin erozif aşınma özelliklerine aşındırıcı partikül boyutunun etki ettiği, 45-75 µm ve 150-212 µm boyutundaki aşındırıcılarla maksimum erozyon oranının 30° çarpma

açısında, 300-425 μm boyutundaki aşındırıcıyla ise 45° - 60° çarpma açısında meydana gelerek aşındırıcı partikül boyutunun çarpma açısıyla güçlü bir bağımlılığı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.47. Çalışmada kullandıkları aşındırıcıların morfolojisi a) 45–75 μm , b) 150–212 μm , c) 300–425 μm (Sinmazcelik ve Sari, 2009)

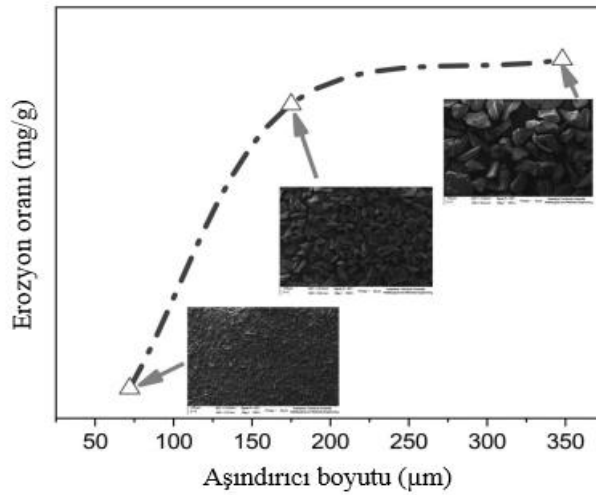


Şekil 2.48. Farklı çarpma açılarında aşındırıcı boyutuna bağlı olarak numunelerin aşınma oranları (maruz kalma süresi= 1 saat) (Sinmazcelik ve Sari, 2009)

Bunun yanı sıra bazı araştırmalar erozyon oranının kritik bir değer üzerinde aşındırıcı boyutundan bağımsız olduğunu ortaya koymaktadır (Öztürk ve diğ., 2019). Partikül boyutu, 100–200 μm arasında olduğu gözlemlenen ancak maruz kalma koşullarına, hedef malzeme özelliklerine ve partikül ile hedef malzeme etkileşimine de bağlı olan bu kritik değere kadar arttıkça erozyon oranını da artırdığı fakat bu kritik değerden sonra erozyon oranını artırmadığı varsayılmaktadır (Arslan, 2017; Barkoula ve Kocsis, 2002). Aşındırıcı parçacıklar kritik değere kadar büyüdükçe, kütleleri arttığından kinetik enerjileri artar

böylelikle hedef malzeme yüzeyine daha yüksek bir enerji aktararak daha derine nüfuz eder ve daha yüksek krater derinliği meydana getirerek daha büyük hasarlara neden olur (Öztürk ve diğ., 2019).

E-cam fiber takviyeli silika ve çinko oksit dolgulu epoksi reçine kompozitlerinin erozif aşınma özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Öztürk ve diğ., 2019) miktarının ağırlıkça %0 ila %16 aralığında değişen ve ortalama partikül boyutu sırasıyla 135 nm ve 220 nm olan silika (nanosilika) ve çinko oksit (ZnO) dolgulu çift yönlü (0/90°) E-cam dokuma kumaş takviyeli epoksi reçine kompozitlerine farklı boyutlarda (72 µm, 175 µm ve 348 µm) silisyum karbür (SiC) aşındırıcı partikülleri kullanılarak, farklı çarpma açıları (20°-90°) ve çarpma hızlarında (70, 100, 150 ve 200 m/s) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, aşındırıcı boyutunun kompozit numunelerin erozyon oranı üzerindeki etkisi Şekil 2.49'da ifade edilmiş ve 175 µm'ye kadar aşındırıcı boyutu arttıkça erozyon oranında artış gerçekleştiği bu değerden sonra ise erozyon oranlarının önemli bir değişim göstermediği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla belirli bir partikül boyutu aralığında artış oldukça erozyon oranı artarken kritik değere ulaştıktan sonra aşındırıcı boyutundan bağımsız olarak erozyon oranı hemen hemen sabit kalmaktadır.

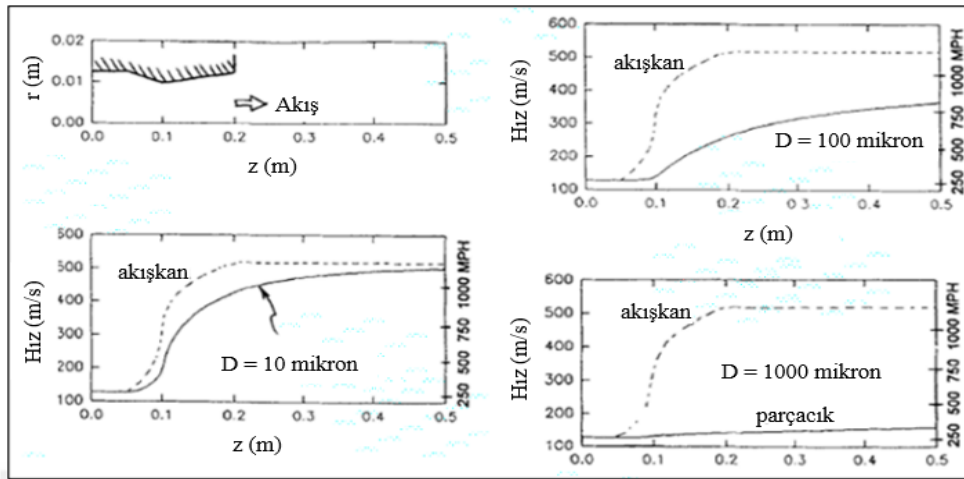


Şekil 2.49. Aşındırıcı partikül boyutu ile erozif aşınmanın değişimi (Öztürk ve diğ., 2019)

Aşındırıcı parçacıkların boyutu kritik değerin üzerine çıktığında hem hızlandırılmaları zor olduğundan kinetik enerjileri düşük olabilmekte hem de birbirleriyle çarpışma olasılıklarının artması nedeniyle etrafa saçılarak hedef malzemeye hiç temasta bulunmayan partiküller olacağından numuneye daha az sayıda parçacık ulaşabilmektedir

dolayısıyla bu kritik değer aşıldıktan sonra ters eğilim dahi gözlemlenebilmekte, daha büyük partiküller daha az etkili hale gelerek daha az erozyon oranı meydana getirebilmektedir (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Katı aşındırıcı parçacıklar hava akımı içerisindeyken havadan daha büyük, ağır ve yoğun olmaları sebebiyle ataletleri hava kadar hızlı ivmelenmelerine engel olur (Önen, 2016). 0,2 m (8 inç) olan kumlama nozulunda 100 psi (700 kPa) basınçta püskürtülen 10, 100 ve 1000 μm boyutundaki aşındırıcı partiküllerin büyüklüğünün hızlandırılmasına etkisini gösteren Şekil 2.50'ye bakıldığında 10 μm boyutundaki partiküllerin hızı hava akımından az olup nozul çıkışına doğru hava akımı hızının %80'ine ulaşırken 100 μm boyutundaki partiküller nozul içinde sıkışarak hava akımı ile çok hızlandırılmamış ve 1000 μm boyutundaki partiküller ise hiç hızlandırılmamıştır (Önen, 2016).

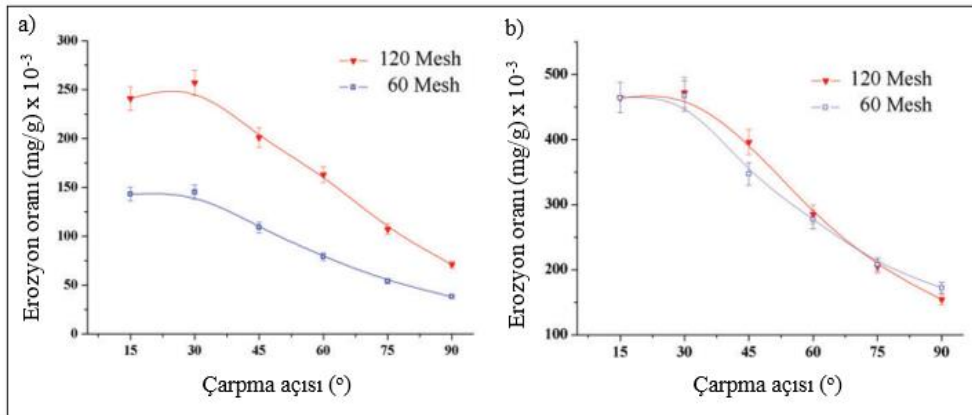


Şekil 2.50. Farklı aşındırıcı boyutlarının nozul içindeki hızları (Önen, 2016)

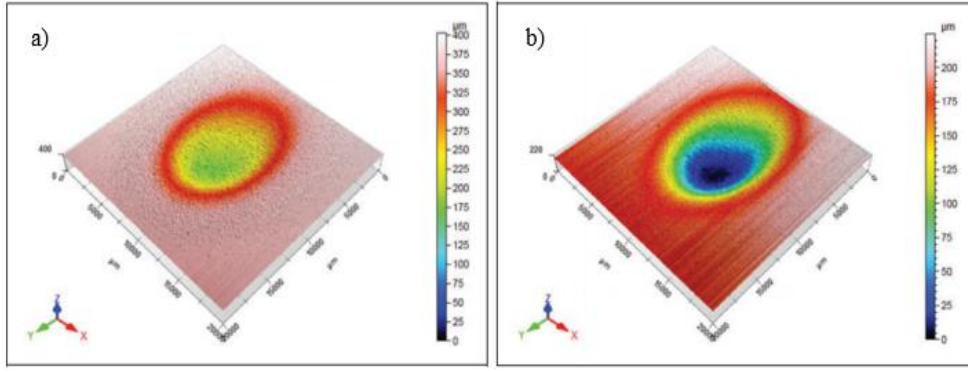
Partikül boyutu büyük olduğunda hava akımı tarafından hızlandırılması zor olduğundan düşük verimliliğe sebep olur. Yüksek verimlilik elde etmek için küçük boyutlu partiküllerin kullanılması tavsiye edilmektedir (Önen, 2016).

AA6082-T6 alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışlarının incelendiği bir çalışmada (Erdoğan ve diğ., 2020) 1,5 bar ve 3 bar basınç altında, farklı çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°), 15 saniye maruz kalma süresinde, 20 mm nozul-numune mesafesinde, 60 mesh (212-300 μm) ve 120 mesh (90-125 μm) boyutundaki alüminyum oksit (Al_2O_3) aşındırıcı partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.51'den görüldüğü üzere kritik değerın altında partikül boyutu arttıkça kütlesi

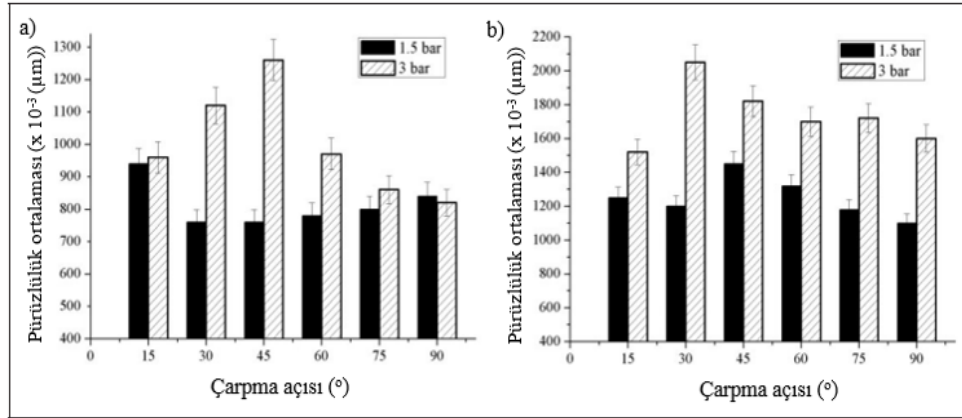
dolayısıyla kinetik enerjisi arttığı için erozyon oranları daha fazla olacağından ve küçük boyuttaki aşındırıcı partiküllerin kırılma toklukları daha yüksek olduğundan yapısal bütünlüklerini koruyarak enerjilerinin büyük bir kısmını hedef malzemeye aktaracağından 1,5 bar püskürtme basıncında kritik partikül boyutunun (100-200 μm) altında olan 120 mesh (90-125 μm) partikül boyutunda daha yüksek erozyon oranlarının elde edilebileceği bunun yanı sıra büyük partikülleri yerinden hareket ettirmek, hızlandırmak daha zor ve nozuldan çıkarken birbirine çarparak etrafa saçılma gibi olasılıkları küçük boyuttakilere göre daha fazla olacağından fakat ağırlıkları daha fazla olduğu için daha fazla malzeme kaldırabileceğinden 3 bar püskürtme basıncında görüldüğü gibi küçük ve büyük partiküllerin erozyon oranlarının çok benzer olduğu gibi durumların da görülebileceği, Şekil 2.52'den görüldüğü üzere aynı operasyon parametreleri altında sadece parçacık boyutunun değişimiyle 120 mesh yani daha küçük olan parçacık boyutunda çarpma hızı daha fazla ve kırılma tokluğu daha yüksek olduğundan enerjisinin büyük bir kısmını hedef malzemeye aktaracağından aşınma izi derinliğinin önemli ölçüde daha fazla olmasına sebep olduğu, Şekil 2.53'ten görüldüğü üzere her çarpma açısı için 60 mesh boyutundaki aşındırıcının pürüzlülük ortalaması (R_a) değerlerinin 120 mesh boyutundaki aşındırıcının değerlerinden daha yüksek olduğu, 60 mesh partikül boyutu ve 3 bar püskürtme basıncında basınç artışıyla parçacığın hızının dolayısıyla kinetik enerjisinin artması ve numuneye çarpma sırasında büyük olan aşındırıcıların kırılma tokluğunun düşük olması sebebiyle parçalanıp yüzeydeki düzensizliği artırmasından kaynaklı yüzey pürüzlülük değerlerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.51. Farklı partikül boyutlarında çarpma açısına göre numunelerin erozyon oranları a)1,5 bar, b) 3 bar (Erdoğan ve diğ., 2020)



Şekil 2.52. 45° çarpma açısı, 3 bar püskürtme basıncında yüzey dokusunun izometrik görünümü a) 60 mesh aşındırıcı parçacık, b) 120 mesh aşındırıcı parçacık (Erdoğan ve diğ., 2020)



Şekil 2.53. 1,5 bar ve 3 bar püskürtme basıncı altında pürüzlülük ortalaması ile çarpma açısı arasındaki ilişki a) 120 mesh, b) 60 mesh (Erdoğan ve diğ., 2020)

Aşındırıcı parçacık boyutlarına göre aşınma mekanizmasının değişimine bakıldığında aşındırıcı boyutları küçük olduğunda malzemede oluşturduğu aşınma mikro kesme mekanizması ile gerçekleşmekte ve kinetik enerjileri düşük olduğu için erozyon oranı düşük olmakta, aşındırıcı boyutları büyük olduğunda ise aşınma mikro çatlama ve mikro kırılma mekanizmaları ile gerçekleşmekte ve yüksek kinetik ve darbe enerjileri sebebiyle malzemede çatlak oluşturarak yüzeyden büyük parçalar koparmasıyla yüksek erozyon oranlarına neden olmaktadır (Sezer, 2017).

2.1.6. Partiküllerin Kütlesel Debisi

Malzeme çalışma ortamındayken deney ortamından farklı olarak, hedef malzemeye gönderilen aynı fiziksel özelliklere sahip aşındırıcı parçacıklardan arkada olan öndekine çarptığında kinetik enerjisinin bir kısmını öndekine aktarıp arkadaki parçacıkta

yavaşlama gözlenirken öndeki parçacığın hızlanması sebebiyle aynı etkiyi yaratmaz. Buna benzer bir etki hedef malzemeye çarpıp geri dönen bir parçacığın, arkasından gelen, henüz malzemeye temasta bulunmamış parçacıklara çarpmasıyla hızlarının düşmesi veya hedef malzemeye hiç ulaşamamaları gibi durumların söz konusu olması sebebiyle parçacıkların hedef malzemeye çarpmasından sonraki süreçte de gerçekleşir. Parçacıkların kütsel debisi bu etkiler sebebiyle erozyona etki eden faktörler arasında yer almakta ve birincil bir etken olmayıp partikül boyutunun büyümesi, nozul çapının genişletilmesi, hızın veya akışın artması gibi parametrelerin değişimi sonucunda ortaya çıkan, birim zamanda hedef malzemenin birim alanına çarpan aşındırıcı parçacıkların toplam kütsesidir (Arslan, 2017).

Birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı parçacık kütsesine parçacık akış debisi denir. Belirli bir eşik değere kadar parçacık akış debisi arttıkça erozyon oranı da artmaktadır. Elastomerler için 100 kg/m^2 kadar düşük parçacık akış debisi eşik değeri görülürken metallerde büyük ve hızlı parçacıkların etkisiyle oluşan erozyon için 10000 kg/m^2 kadar yüksek değerler görülebilmektedir. Akış debisi bu eşik değeri aştığında hem hedef malzemeye çarpan aşındırıcı parçacığın oluşturduğu bozulma reaksiyonunun gerçekleşmesine fırsat verilmeden diğer aşındırıcı parçacıklar hedef malzemeye çarptırılmış olur ve istenilen bozulma reaksiyonlarının gerçekleşmesi için zaman tanınmaması sebebiyle bozulmanın derecesi ve ona bağlı olarak erozyon oranları düşük olur hem de birim alana çarpan parçacık sayısı artacağından sonradan gelen parçacıklar hedef malzemeye çarpıp yüzeyden ayrılan parçacıklarla etkileşime girerek hedef malzemeye temasta dahi bulunamadan ortamdan uzaklaşır, böylece malzeme yüzeyine daha az aşındırıcı parçacık çarparak daha az aşınma gerçekleştirilir (Yıldıran, 2013).

Katı partikül erozyonunda akış etkilerinin incelendiği bir çalışmada (Anand ve diğ., 1987) 1018 düz karbon çelik numune ve 63, 143, 270 μm ortalama boyutunda alümina aşındırıcı partiküller kullanılarak gerçekleştirilen katı partikül erozyonunda geliştirdikleri parçacık çarpışma modelinde başlangıçta partikül debisindeki artışla erozyonun arttığı fakat kritik bir değer sonrasında partiküllerin geri tepmesiyle saçılma meydana gelip numune yüzeyi korunduğundan erozyon oranında artış olmadığı ve bu kritik değerin partikül çarpma açısı, hızı, boyutu ve hedef malzemenin davranışı gibi değişkenlere bağlı olduğu gözlemlenmiştir (Arslan, 2017).

Çalışmalardan anlaşıldığı üzere hedef malzemenin erozyon davranışını etkilememek amacıyla aşındırıcı parçacıkların etkileşimde bulunmasına sebep olacak debilerden kaçınılarak uygun bir debi miktarı seçilmesi önemlidir (Sezer, 2017).

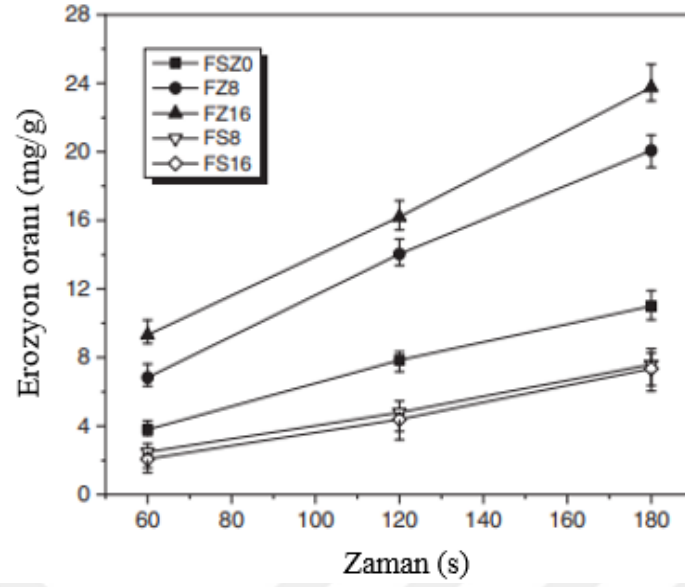
2.1.7. Maruz Kalma Süresi

Maruz kalma süresi, hedef malzemenin aşınma meydana getiren ortamda bulunduğu süreç olarak ifade edilebilir. Gevrek malzemelerde maruz kalma süresinin artmasıyla kaldırılan malzeme miktarı da doğrusal olarak artış gösterirken sünek malzemelerde inkübasyon periyodu sebebiyle başlangıçta aşındırıcı parçacıklar hedef malzemeye gömülerek ağırlık artışına sebep olabilmekte fakat maruz kalma süresindeki artışla inkübasyon periyodu son bularak malzeme kaldırma miktarı sabit bir denge durumuna ulaşmaktadır (Öztürk ve diğ., 2019).

E-cam fiber takviyeli silika ve çinko oksit dolgulu epoksi reçine kompozitlerin erozif aşınma özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Öztürk ve diğ., 2019) Tablo 2.3'te tanımlanan, miktarının ağırlıkça %0 ila %16 aralığında değişen ve ortalama partikül boyutu sırasıyla 135 nm ve 220 nm olan silika (nanosilika) ve çinko oksit (ZnO) dolgulu çift yönlü (0/90°) E-cam dokuma kumaş takviyeli epoksi reçine kompozitlere farklı boyutlarda (72 µm, 175 µm ve 348 µm) silisyum karbür (SiC) aşındırıcı partikülleri kullanılarak, farklı çarpma açıları (20°-90°) ve çarpma hızlarında (70, 100, 150 ve 200 m/s) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.54'te gösterildiği üzere dolgusuz, silika ve çinko oksit dolgulu tüm cam dokuma kumaş takviyeli kompozit numuneler 90° çarpma açısında maksimum erozyon oranı sergileyerek gevrek aşınma davranışı gösteren malzemeler olduğundan deney süresince herhangi bir inkübasyon periyodu göstermediği dolayısıyla başlangıçta bir ağırlık artışı gerçekleşmeden maruz kalma süresiyle doğru orantılı olarak erozyon oranında artış gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

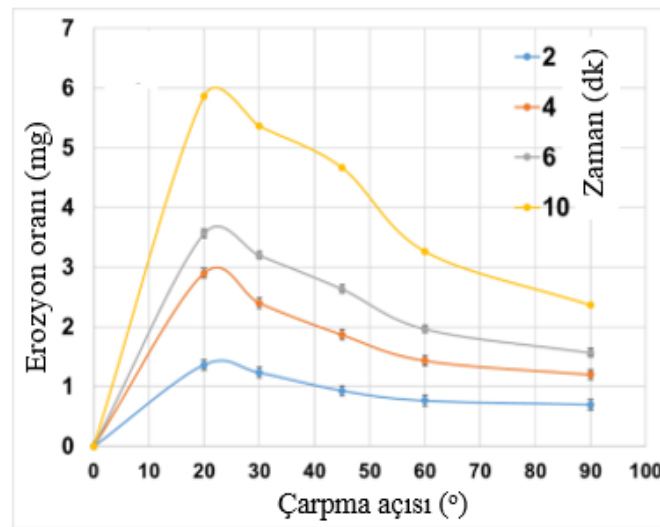
Tablo 2.3. Numunelerin detaylı bileşimi ve tanımlamaları (Öztürk ve diğ., 2019)

	Kompozit tanımları				
Malzemeler ağırlıkça %	FSZ0	FS8	FS16	FZ8	FZ16
Epoksi reçine (EP)	45	37	29	37	29
E-cam fiber	55	55	55	55	55
Silika	0	8	16	0	0
Çinko oksit	0	0	0	8	16



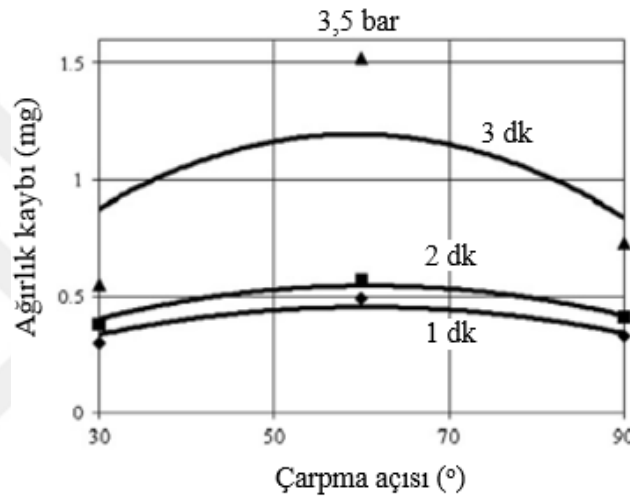
Şekil 2.54. Çalışmada kullanılan kompozitlerin maruz kalma süresine bağlı olarak erozyon oranları (aşındırıcı boyutu= 72 μm , çarpma açısı= 90°, çarpma hızı= 100 m/s) (Öztürk ve diğ., 2019)

AA6061 alaşımının katı partikül erozyonu davranışı üzerine yapılan bir çalışmada (Acar ve diğ., 2017) 0,5 mm kalınlığındaki AA6061 alaşımının ortam sıcaklığında, aşındırıcı olarak ortalama boyutu 50 μm olan alümina partikülleri kullanılarak farklı çarpma açıları (20°, 30°, 45°, 60°, 90°) ve çarpma hızlarında (74, 100, 150, 195 m/s) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.55'te görüldüğü üzere tüm çarpma açılarında maruz kalma süresinin artmasıyla erozyon oranının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.55. Maruz kalma süresine bağlı olarak AA6061 alaşımının 74 m/s çarpma hızında erozyon oranları (Acar ve diğ., 2017)

Epoksi esaslı tek yönlü cam fiber takviyeli plastik kompozit malzemelerin erozyon davranışının incelendiği bir çalışmada (Fouad ve diğ., 2011) farklı püskürtme basınçları (1, 1,75, 2,2, 3, 3,5 bar), çarpma açıları (30°, 60° ve 90°), maruz kalma süreleri (1, 2, 3 dk) ve 150± 15 µm partikül boyutunda silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.56’da ifade edildiği üzere GFRP kompozitin çarpma açısı ve maruz kalma süresinin bir fonksiyonu olarak elde edilen ağırlık kaybı grafiğine bakıldığında maruz kalma süresi arttıkça ağırlık kaybının da artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



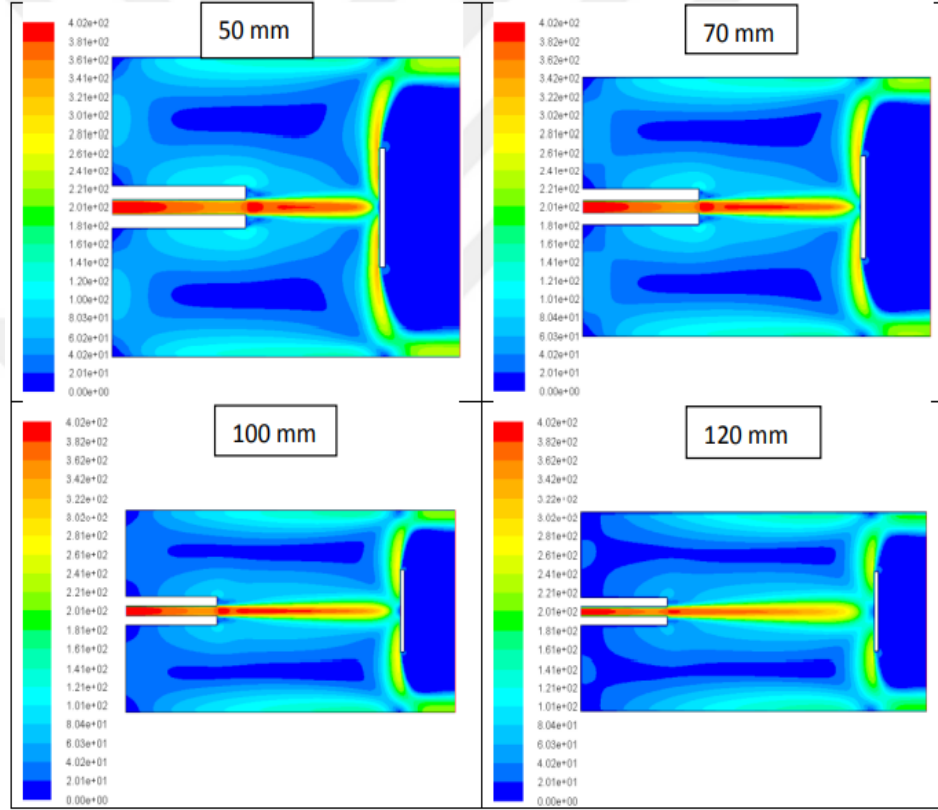
Şekil 2.56. Farklı maruz kalma sürelerinde çarpma açısının bir fonksiyonu olarak GFRP kompozitin ağırlık kaybı (3,5 bar çarpma basıncında) (Fouad ve diğ., 2011)

2.1.8. Püskürtme Mesafesi

Nozul mesafesi de katı partikül erozyonunda önemli bir parametredir. Parçacıkları hızlandıran hava nozul çıkışından sonra aşındırıcı parçacıkları hızlandırmaya devam eder, kendi hızına getirmeye çalışır ve kritik bir uzaklıkta bir hız dengesi oluşturur. Bu kritik püskürtme mesafesinin aşıldığı durumlarda hava sürtünmesinin etkilerine bağlı olarak partikül hızında düşme gerçekleşir (Önen, 2016). Dolayısıyla malzemeye çarpan aşındırıcıların malzemeyi aşındırma miktarı az olur.

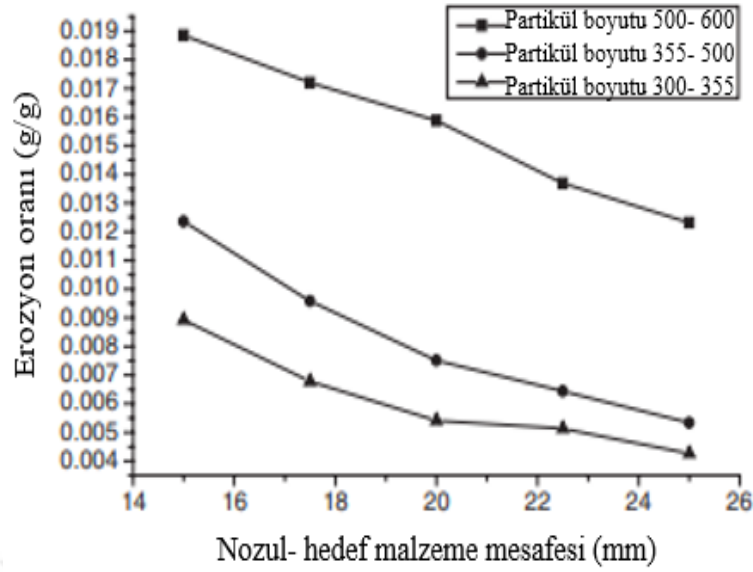
Farklı nozul geometrilerinin polimetil metakrilat (PMMA) yüzeyinde katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Önen, 2016) Şekil 2.57’de gösterildiği üzere çeşitli nozul mesafelerinden püskürtülen aşındırıcı parçacıkların nozul girişinden hedef malzemeye ulaşana kadarki hız konturlarından nozul mesafesi arttıkça aşındırıcı

parçacıkların hızlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Nozul çıkışı ile hedef malzeme arasındaki mesafe arttıkça parçacığın yerçekimi ve havayla olan sürtünmesi sebebiyle hızı azalacaktır (Önen, 2016). Buradan püskürtme mesafesinin aşındırıcı partiküllerin hızlarını belirlemede etkili olduğu sonucuna varabiliriz.



Şekil 2.57. Çeşitli püskürtme mesafeleri altında nozul girişinden hedef malzemeye gelen gaz ve partikül hız konturları (partikül boyutu= 206 μm , ivmelenen basınç= 3 bar) (Önen, 2016)

Farklı operasyon koşulları altında Teflonun erozyon özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Debnath ve diğ., 2015) farklı çarpma açıları (15° - 90°), çarpma hızları (30, 40, 50 m/s), aşındırıcı boyutları (300–355 μm , 355–500 μm , 500–600 μm), nozul-numune mesafeleri (15, 20, 25 mm) ve ortam sıcaklığı altında gerçekleştirilen testte, Şekil 2.58’de görüldüğü üzere nozul-hedef malzeme arasındaki mesafe arttıkça erozyon oranının azaldığı, bunun mesafe arttıkça parçacıkların kinetik enerjisinin daha az olduğundan kaynaklandığı ve parçacık akışının daha düşük konsantrasyonda olarak hedef malzemenin daha büyük bir bölgesine çarptığı, mesafenin daha az olmasıyla daha yüksek konsantrasyonda parçacık akışı olduğu ve hedef malzemenin daha küçük bir bölgesine çarptığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.58. Farklı partikül boyutlarında nozul ve hedef malzeme arasındaki mesafeye bağlı olarak erozyon oranları (30° çarpma açısı, 50 m/s çarpma hızında) (Debnath ve diğ., 2015)

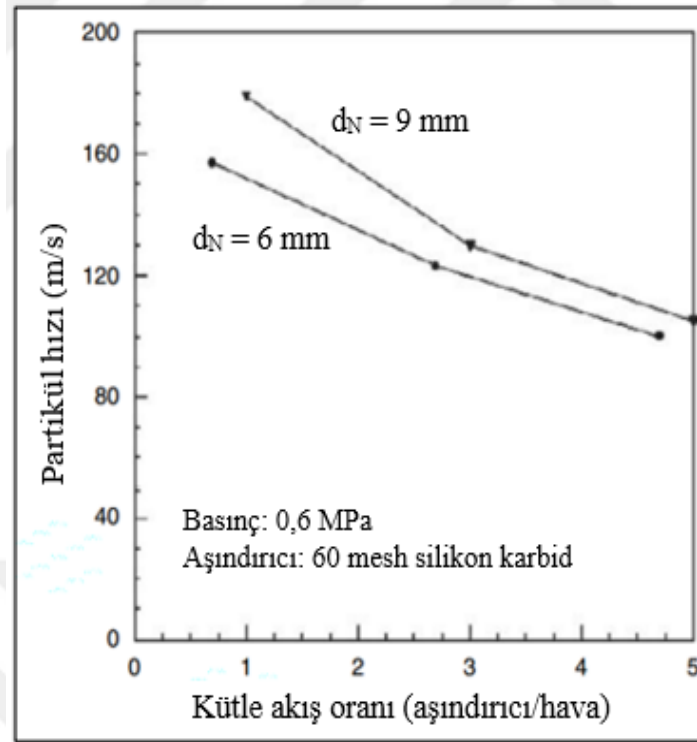
2.1.9. Nozul Tasarımı

Nozul uzunluğu, şekli, giriş çapı ve çıkış çapı gibi değişkenlere sahip olan nozul geometrileri aşındırıcı parçacıkların malzemeye çarpma öncesinde hız kazanmasını ve çarparken nasıl yayılım göstereceğini etkileyen önemli bir faktördür (Önen, 2016).

Nozul uzunluğunun artması aşındırıcı parçacıkların nozul içindeki basınçlı havayla temas süresini de artırarak parçacığın hızının artmasına sebep olur. Fakat optimum nozul uzunluğu aşıldığı takdirde hava akışının etkisiyle parçacık üzerindeki sürtünme kuvveti artar (Önen, 2016).

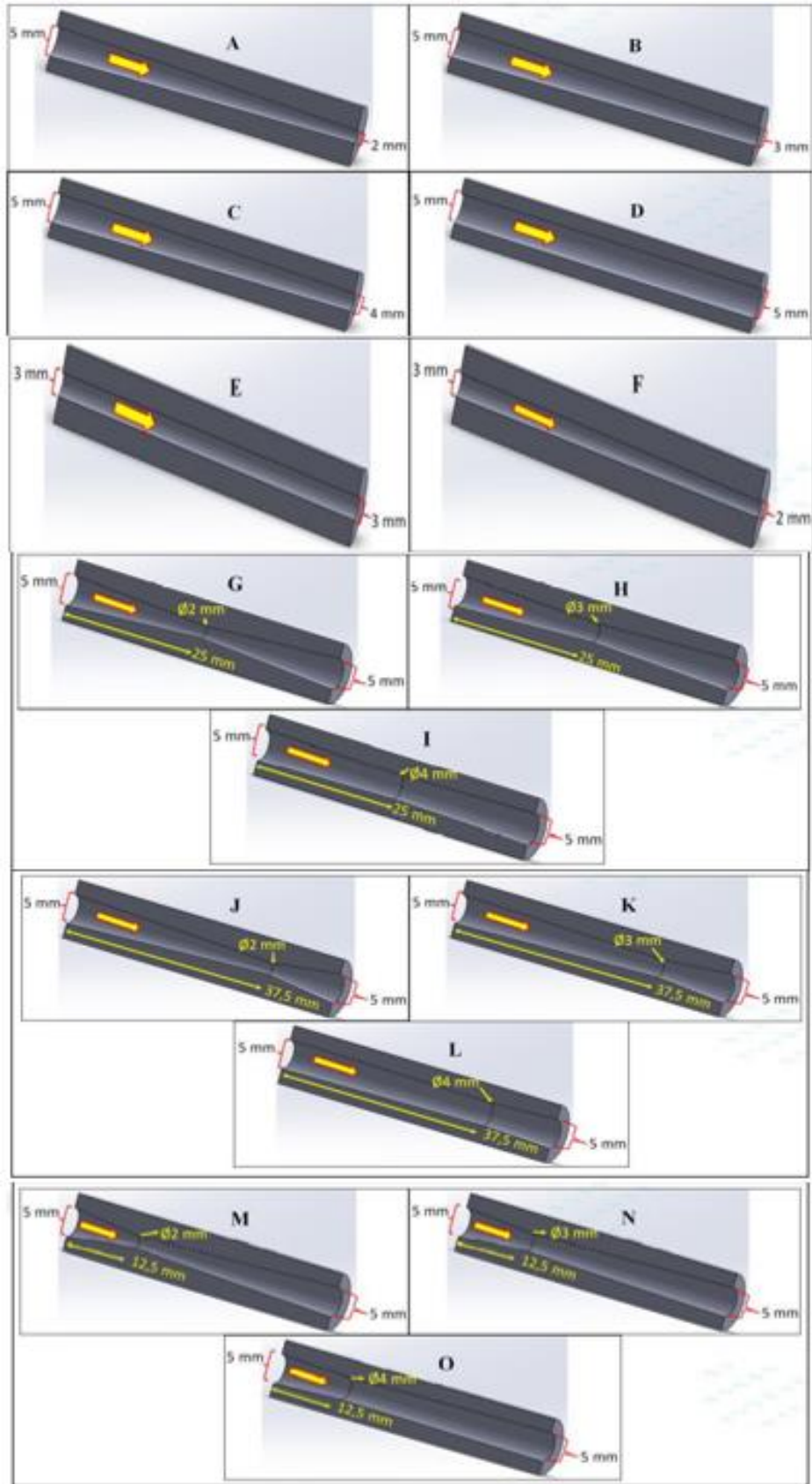
Aşındırıcı parçacık boyutları nozul seçiminde dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Farklı nozul geometrilerinin PMMA yüzeyinde katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Önen, 2016), Şekil 2.59’da nozul çapı (dN) artışının aşındırıcıların hızlarına etkisi gösterilmektedir. Nozul çapı dar olduğunda içerisinden geçen aşındırıcı parçacıklar birbirleriyle etkileşime gireceğinden hızları daha düşük olabilmektedir.

Nozuldan hava ve katı partikül karışımının verimli olarak püskürtülebilmesi adına aşındırıcı boyutunun en az 10 katı olacak çapta nozul kullanılması gerekir (Önen, 2016).

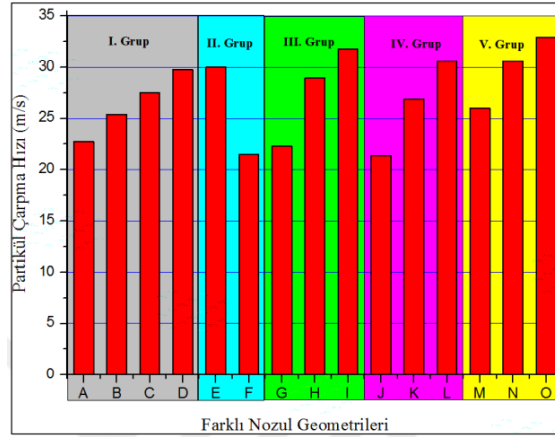


Şekil 2.59. Nozul çapının kütle akış oranı (aşındırıcı/hava) ve partikül hızına etkisi (Önen, 2016)

Farklı nozul geometrilerinin PMMA yüzeyinde katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Önen, 2016), 50 mm uzunluğu ve 5 mm giriş çapları sabit tutularak Şekil 2.60'ta gösterilen çıkış çapları, boğaz çapları ve boğaz konumları değişiklik gösteren nozullarda aynı basınç ve aşındırıcı partikül kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.61'de görüldüğü üzere, çıkış çapı ve boğaz çapı büyüdüğü ve boğaz konumunun nozul girişine yakın olduğu durumlarda parçacık hızlarının diğer nozul tiplerine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Nozul çıkışına kadar hızlanan aşındırıcı parçacıkların yüksek hızlarda dar bir boğazdan geçerken birbirlerine çarparak yön ve doğrultularını değiştirmeleriyle enerjilerini yitirmeleri ve akış düzenlerini de karmaşıktırarak birbirleriyle etkileşimlerinin artması sebebiyle nozul içerisindeki boğazın nozul çıkışına yakın olmasının partikül çarpma hızını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Boğaz konumu nozul girişine yakın olduğu durumda ise giriş kısmında aşındırıcı parçacıkların yön ve doğrultuları birbirine yaklaşarak düzenli halde akmakta ve hızlandırılma sırasında birbirleriyle etkileşimleri azalmakta bu sebeple partikül çarpma hızında artış gözlenmekte olduğu ve böylece tüm nozul tasarımları arasında en yüksek parçacık hızlarına ulaştığı belirtilmiştir (Önen, 2016).



Şekil 2.60. Çalışmada kullanılan çeşitli nozul geometrileri (Önen, 2016)

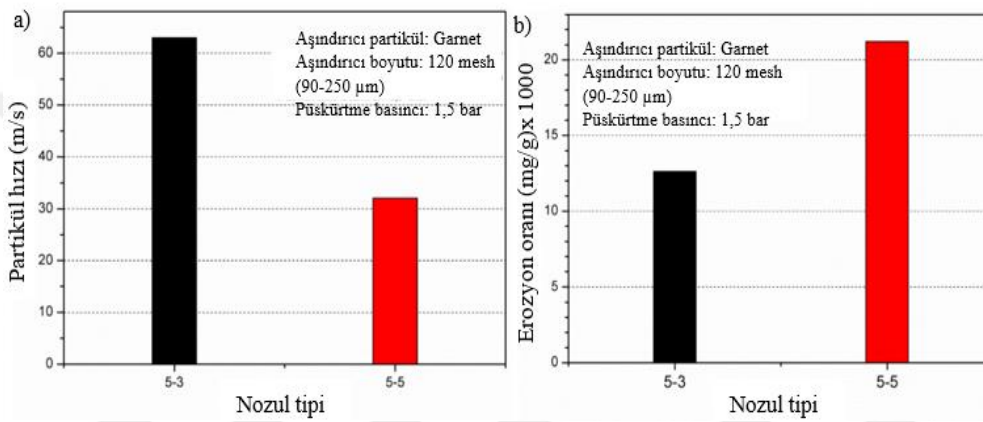


Şekil 2.61. Farklı nozul geometrilerinin partikül çarpma hızına etkisi (Önen, 2016)

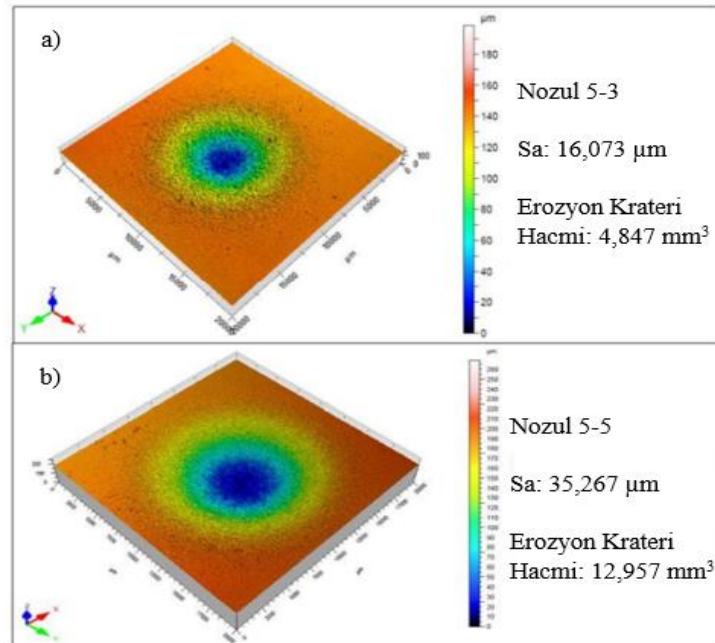
Erozif aşınma davranışına nozuldaki çap daralmasının etkilerinin incelendiği bir çalışmada (Önen ve diğ., 2016) Şekil 2.62’de gösterilen, giriş çapları 5 mm ve çıkış çapları 3 ile 5 mm olan farklı çap daralmasına sahip iki nozulun aşındırıcı parçacık hızı ve termoplastik bir polimer olan PMMA malzemesine 1,5 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısında, 20 saniye maruz kalma süresinde, 50 mm nozul-numune mesafesinde, 120 mesh (90-250 μm) boyutunda garnet aşındırıcı partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 2.63a’da görüldüğü üzere 5-3 nozulunda çap daralması sebebiyle partikül hızlarının daha fazla olduğu bunun yanı sıra 5-3 nozulunda numune daha dar bölgeyi erozyon krateri oluşturarak ve nozuldan çıkan aşındırıcılar daha küçük hacimli püskürme konisinde hareket ederek hedef malzemeye çarpıp seken aşındırıcı parçacıkların arkadan gelen aşındırıcı partiküllerle daha fazla etkileşimde bulunarak sonradan gelen partiküllerin hasar oluşturma durumunu düşürdüğünden dolayısıyla partiküllerin nozul içindeki hızlanmasıyla nozuldan çıkıp hedef malzemeye çarptıktan sonraki davranışlarının farklı olmasından ve Şekil 2.63b’de görüldüğü üzere nozulda çap daralması olduğunda nozuldan çıkan partiküllerin kütesel debisi daha az olduğundan kütesel debisi daha fazla olan 5-5 nozuluyla hedef malzemeye çarpan partikül sayısı daha fazla olarak 5-3 nozulundan daha fazla erozyon oranına sebep olduğu, Şekil 2.64’ten görüldüğü üzere partiküllerin nozuldan hedef malzemeye ulaşana kadarki püskürtme konisinin 5-3 nozulundan daha geniş olarak daha geniş bir alana yayılması ve parçacıkların kütesel debisinin daha fazla olması sebebiyle daha fazla parçacığın numuneyi aşındırması dolayısıyla 5-5 nozuluyla daha geniş ve derin bir hasar geometrisi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.62. Çalışmada kullandıkları nozulların geometri ve ölçüleri (Önen ve diğ., 2016)



Şekil 2.63. Farklı geometriye sahip nozulların a) partikül hızları, b) erozyon oranları (Önen ve diğ., 2016)

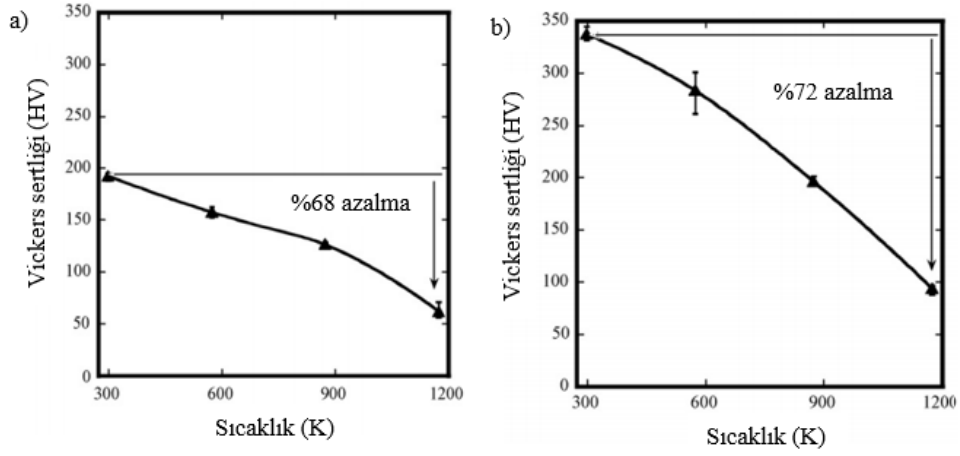


Şekil 2.64. Farklı çıkış çapına sahip nozullar kullanılarak numune yüzeylerinden elde edilen hasar kraterlerinin topografyaları a) 5-3 nozulu, b) 5-5 nozulu (Önen ve diğ., 2016)

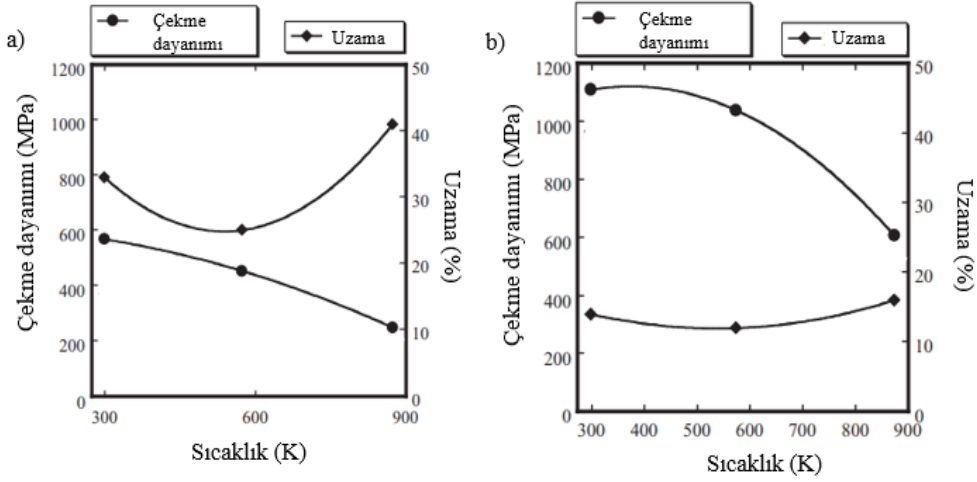
2.1.10. Sıcaklık ve Nem

Katı partikül erozyonunda malzemenin sıcaklığı ve ortamın nemi erozyon davranışlarını etkileyen faktörlerdir. Malzemelerin sıcaklığı arttığında genleşir ve sünek bir davranış gösterirken malzeme soğuduğunda ise büzülerek kırılganlık kazanır. Nemli ortama maruz kalmış bir malzemenin erozyona uğrama ihtimali nemin beraberinde korozyonu getirmesi dolayısıyla artar. Öte yandan hedef malzeme ve parçacık arasında yüksek sıcaklık farkı olduğunda aşındırıcı parçacıklar hedef malzemeye yapışabilir böylelikle ağırlık artışı gerçekleşebilir (Arslan, 2017).

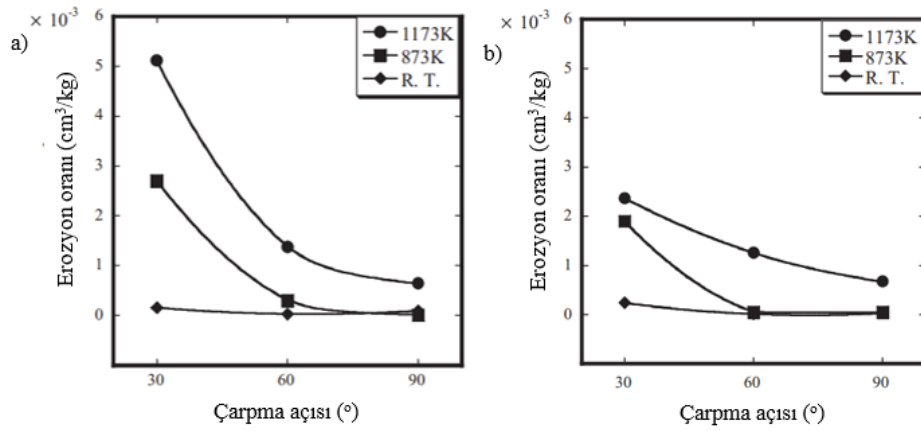
Paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıkta katı parçacık erozyonu ve mekanik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Shimizu ve diğ., 2011) SUS403 ve SUS630 paslanmaz çeliklerine farklı sıcaklık (oda sıcaklığı, 573K, 873K ve 1173K), çarpma açıları (30° ve 90°), 100 m/s çarpma hızı ve 300 s test süresinde, 1 mm boyutundaki alümina aşındırıcı partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, oda sıcaklığında sertlikleri sırasıyla 193 HV ve 338 HV olan SUS403 ve SUS630 çeliklerinin test sıcaklığı arttıkça Şekil 2.65 ve 2.66’da görüldüğü üzere, malzemelerin uzama değerlerinde artış, çekme mukavemetlerinde ve sertliklerinde azalma meydana gelerek sünek davranış gösterdiği, Şekil 2.67’den görüldüğü üzere iki malzemenin de sıcaklık arttıkça sünekliklerinin artarak 30° çarpma açısında maksimum erozyonun gözlemlendiği sünek erozyon davranışı sergilediği ve iki malzeme için de sıcaklığın artmasıyla tüm çarpma açılarında erozyon oranlarının daha yüksek olmasını yüksek sıcaklıkta yumuşama ile kesme aşınmasının dikkat çekici olması sebebiyle, 90° çarpma açısında sertliğin azalması sebebiyle, 30° çarpma açısında ise uzamada meydana gelen artış sebebiyle olduğu, SUS630’un SUS403’e göre tüm test sıcaklıklarında sertlik ve çekme dayanımlarının daha yüksek, uzama değerlerinin daha düşük olması sebebiyle malzeme yüzeyinin plastik deformasyona uğraması ve büyük bir çıkıntı oluşturmaya rağmen erozyon çıkıntı oluşumu, uzaması ve malzemeden uzaklaştırılması ile gerçekleştiğinden ve SUS630 malzemesinde çarpma etkisiyle oluşturulan çıkıntıların genişleyemeyerek malzeme kaldırılmasını sınırladığı gözlemlenmiş, sıcaklık arttıkça daha yüksek uzamaya sahip olarak çarpma ile malzemede meydana gelen çıkıntının daha kolay oluşturulması sebebiyle erozyon oranları artmıştır. Sonuç olarak, iki malzeme için de test sıcaklığı arttıkça erozyon oranlarında artış meydana gelmiştir.



Şekil 2.65. Test sıcaklığının bir fonksiyonu olarak malzemelerin Vickers sertliği a) SUS403 için, b) SUS630 için (Shimizu ve diğ., 2011)



Şekil 2.66. Yüksek sıcaklıkta malzemelerin çekme testi sonuçları a) SUS403 için, b) SUS630 için (Shimizu ve diğ., 2011)



Şekil 2.67. Çeşitli test sıcaklıklarında çarpma açısının bir fonksiyonu olarak erozyon oranı a) SUS403 için, b) SUS630 için (Shimizu ve diğ., 2011)

3. POLİMER MALZEME

Mühendislik malzemeleri Şekil 3.1’de gösterildiği gibi sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre yapı çelikleri, dökme demir ve takım çelikleri gibi malzemeler demir esaslı; alüminyum, nikel ve bakır gibi malzemeler demir dışı metal malzemeler; seramik, cam, beton gibi malzemeler inorganik malzemeler grubunda yer alırken deri, ağaç, polimer gibi malzemeler ise organik malzemeler grubunda yer almaktadır (İpek, 2011).

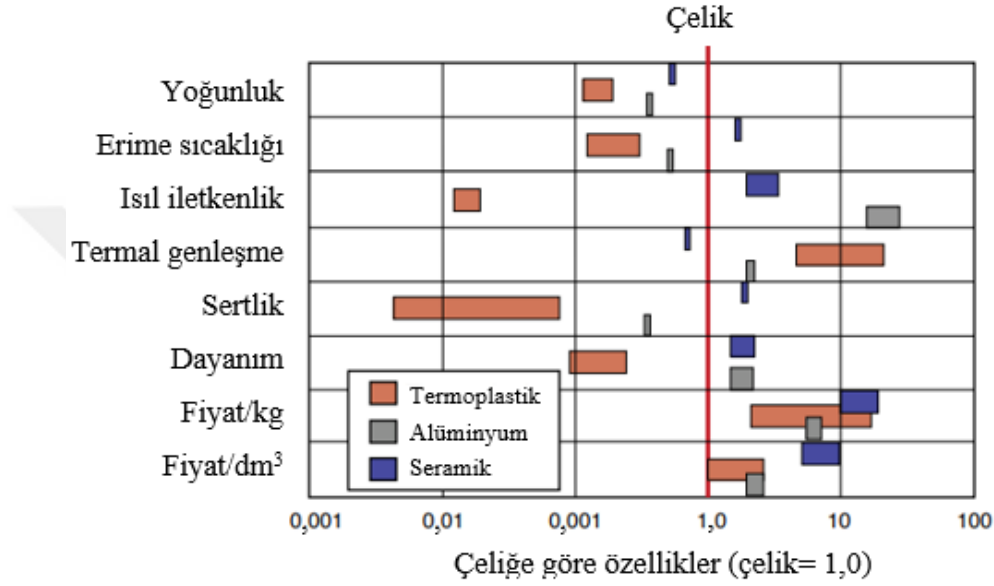


Şekil 3.1. Mühendislikte malzeme sınıflandırılması (İpek, 2011)

Polimerler, monomer denilen küçük birimlerin polimer molekülünü oluşturmak için kimyasal bağlarla bağlandığı, çok sayıda atomik grubun az veya çok düzenli halde kimyasal bağlarla bağlanmasıyla oluşan zincir yapılarına sahip olup bu yapılara göre adlandırılan malzeme çeşididir. Sağlam olmaları, düşük yoğunluğa sahip olmaları, tribolojik özelliklerinin geleneksel malzemelerden daha iyi olması, elektrik ve termal yalıtkanlığa sahip olmaları, basınç ve ısı kullanılarak mekanik yöntemlerle şekillendirilebilmeleri veya kalıplanabilmeleri, kolay şekil verilebilmeleri, düşük sıcaklıklarda şekillendirilerek kalıplanabilmeleri dolayısıyla işlenme kolaylığı sağlayan ve daha ucuz olduğundan günümüzde makine, uçak, elektrik/elektronik endüstrileri gibi birçok uygulamada en çok kullanılan mühendislik malzemeleridir (Debnath ve diğ., 2015; Osswald ve Menges, 2010; Şimşek, 2020; Turgut, 2012; Yanatma, 2011). Ancak polimerlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine molekül ağırlığı, yapısı, çapraz bağ derecesi ve sahip olduğu fonksiyonel gruplar etki ettiğinden metalik ve diğer mühendislik malzemelerine göre farklı özellikleri bulunmaktadır (Turgut, 2012).

Özellikle endüstriyel ve mühendislik uygulamalarında ağırlıktan tasarruf istenilen yerlerde geleneksel metal ve alaşımlarına alternatif olarak tercih edilen polimerlerin kullanımı artmaktadır (Debnath ve diğ., 2015). Çelik malzemeye kıyasla polimer

malzeme olan termoplastiklerin özelliklerinin alüminyum ve seramik gibi malzemelerle karşılaştırılması Şekil 3.2’de görülmektedir. Buradan diğer malzemelerin mekanik özelliklerinin termoplastik malzemelerden daha iyi olduğu görülürken termoplastiklerin yoğunluğunun daha düşük olması sebebiyle daha hafif olduğu, termal yalıtkanlıklarının iyi olduğu ve düşük sıcaklıklarda işlenebilirliğinin iyi olduğu görülmektedir (Osswald ve Menges, 2010).



Şekil 3.2. Çelik malzemeye göre termoplastik, alüminyum ve seramiklerin özelliklerinin kıyaslanması (Osswald ve Menges, 2010)

Polimerler dayanıklılık ve düşük özgül ağırlık, elektrik ve ısı yalıtımı, hava ve korozyona karşı direnç, tokluk, kolay imal edilme ve tasarım esnekliği, karmaşık yapıların tasarımı, kolay renklendirme özelliğinden dolayı estetik görünüm, düşük enerjili üretim teknikleri kullanımı ile seri üretim imkanı, kalıplaması ve işlemesi kolay olması ve üretiminin düşük maliyetli olması gibi özelliklere sahip olup yüksek performans sağlamaktadır (İbrahim, 2020; Şimşek, 2020).

Polimerlerin dayanım ve süneklik özellikleri farklılık göstermektedir (İpek, 2011). Polimerler zincirleri arasındaki karmaşık fiziksel dolaşma, zincir düzeni, çeşitli moleküller arası bağlar, bağlanma kuvvetleri, farklı moleküler ağırlık gibi çok sayıda etkileşimden dolayı farklı özellikler kazandıklarından birbirlerinden oldukça farklıdırlar. Farklı polimer türleri farklılık gösterirken aynı polimerin farklı örnekleri dahi farklı özellikler sergilemektedir (İbrahim, 2020).

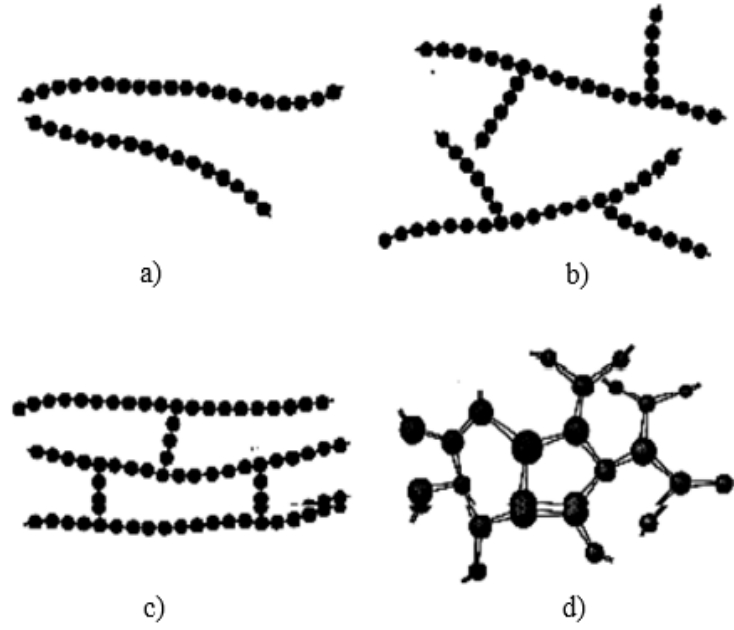
Polimerler termoplastik, termoset ve elastomerler olmak üzere üçe ayrılır, ortak noktaları büyük moleküllere sahip olmaları olup vulkanize kauçuklar veya elastomerler ve termosetler çapraz bağlı yapıya sahipken termoplastikler ve vulkanize edilmemiş elastomerler çapraz bağlı olmaz, lineer moleküler yapıya sahiptir (Osswald ve Menges, 2010).

Çapraz bağlı olanlarda moleküller birbirine köprü veya fiziksel bağlantılar ile bağlıyken çapraz bağlı olmayanlar komşu moleküllerine göre serbest olarak hareket edebilmektedir (Osswald ve Menges, 2010).

Termoplastik malzemelerin zincirleri arasında zincirlerin birbirlerine göre hareketlerini kısıtlayan ve ısıya karşı duyarlı olan zayıf elektrostatik çekme (Van der Waals kuvvetleri) kuvveti bulunmakta ve plastiğin sıcaklığı yükseldikçe Van der Waals kuvvetlerinin etkisi azalmaktadır. Böylelikle ısıtıldıklarında moleküllerinin hareketliliği artarak belli bir sıcaklığın üstüne çıkıldığında malzeme eriyerek akışkan hale gelir ve yumuşak, kalıplanabilir bir duruma geçer, eriyik haldeki akışkan plastiğe verilen şekil soğutulduğunda katılaşır ve böylece uzun molekül zincirleri serbestçe hareket edemez fakat tekrar tekrar ısıtılarak akma kabiliyeti kazanır, böylece moleküller birbiri üzerinden kayar ve tekrardan şekillendirilerek işlemin tekrarlanmasına izin veren bağ yapılarına sahip olarak istenilen şekil kolayca verilebilir, ısı ve basınç uygulandığı zaman plastik özelliklerini kaybetmeyerek defalarca şekillendirilebilme özelliğine sahiptir (İbrahim, 2020; Osswald ve Menges, 2010; Şimşek, 2020; Turgut, 2012). Bu işlemler polimerlerin kimyasal özelliklerini değiştirmemekle birlikte mekanik özelliklerde değişime sebep olabilmektedir, katkı maddelerinin eklenmesiyle elde edilen kompozit malzemeler ile daha iyi mekanik özellikler gösterebilmektedirler (İbrahim, 2020; Osswald ve Menges, 2010; Şimşek, 2020).

Polimerler kimyasal mimarisine göre farklılık göstermektedir, Şekil 3.3'te polimer zincir yapıları gösterilmektedir. Burada doğrusal yapıdaki polimerlerin merleri Van der Waals bağlarıyla birarada tutulmaktadır, zincirleri lineer yapıdadır (İpek, 2011).

Çapraz bağlı polimerler merler arasında zayıf bağların olduğu (Van der Waals) fakat polimer zincirleri arasında kuvvetli kovalent bağların bulunduğu yapıdadırlar (İpek, 2011).



Şekil 3.3. Polimerlerin kimyasal mimarisini a) doğrusal, b) dallanmış, c) çapraz, d) ağ (İpek, 2011)

Örneğin polietilen (PE) kimyasal mimarisine göre lineer, dallanmış ve çapraz bağlı olmak üzere üç şekilde bulunabilmektedir. Düz zincirli yapıdan oluşuyorsa yapısında daha çok kristal bölgeler olduğundan dolayı yoğunluğu daha yüksek olmakta ve yüksek yoğunluklu olarak adlandırılmaktadır, bu sebeple erime sıcaklıkları daha yüksektir ($T_m = 165^\circ\text{C}$). Polimerlerin düz zincirli, az dallanmış ve çok dallanmış haldeyken erime sıcaklıklarının (T_m) farklı olması kristaliniteyle ilgilidir. Dallanma arttıkça yine kristallenebilir ama dallanmış bölgeler kristallenmeyi baskıladığından kristallenme yüzdesi daha düşük olmakta dolayısıyla erime sıcaklığı daha düşük olmaktadır ($T_m = 135^\circ\text{C}$). Çapraz bağlı polimerler kristallenemez, %100 amorf yapıdadır.

Isıl enerji verildiğinde eriyenler aslında kristal yapılardır. Bu sebeple bir polimerin erime sıcaklığından bahsediliyorsa o polimerin yapısında kristaller vardır. Çapraz bağlı bir yapıda zincirler arasında kuvvetli kovalent bağlar olduğundan zincirler birbiri üzerinden akıp kayamazlar dolayısıyla çarpaz bağlı polimerler erimezler. Aslında erime sıcaklıkları vardır fakat molekül ağırlıkları sonsuza gittiğinden erime noktaları da sonsuza gider ancak belli bir sıcaklıkta degrades olduğundan eritmenin bir anlamı yoktur çünkü ürüne dönüştürülemezler. Bir yapı çapraz bağlandığında hem ısı dayanımı hem de mekanik özellikleri iyileşmektedir. Örneğin otomobil lastiği imalatı sırasında çapraz bağlanır. Eğer çapraz bağlanmazsa lastik yolla temas ettiğinde meydana gelen sıcaklık artışıyla ısınan

lastik eriyip akmaya başlar ama çapraz bağlandığında lastik yük taşımaya başlar, ısıl enerjiyle kolay kolay deforme olmama gibi üstün özellikler kazanmaya başlar. Diş dolguları da çapraz bağlı polimerlere örnek verilebilir. Dolgu denilen seramik katkı akrilik reçine UV ışınına maruz bırakılarak reçinenin zincir yapısının çarpaz bağlanması amaçlanır böylece ısıya, soğuğa, mekanik kuvvete karşı dayanıklı olarak dağılıp parçalanmaz. Bunun yanı sıra çapraz bağlama malzemeye iyi derecede mekanik ve ısıl özellikler kazandırır da aradaki çapraz bağlardan dolayı ısıl enerjiye maruz bırakılıp tekrar eritilerek şekillendirilemez, tekrar ısıl işlemlere tabi tutulamazlar.

Polimerler morfolojilerine göre kristal ve amorf yapılı olmak üzere iki gruba ayrılır. Metallerin neredeyse hepsi, polimer ve seramik malzemelerin ise bir kısmı kristal, diğerleri amorf yapılıdır (Khalfan, 2008). Fakat polimerlerin çoğu bünyesinde amorf ve kristalin yapıyı birlikte barındırdığından amorf yapının içerisinde kristalin bölgeler bulunmaktadır dolayısıyla polimerlerin çoğu yarı kristalin yapıdadır (Turgut, 2012).

Sarmal yapı oluşturarak düzensiz zincirlerin olduğu polimerler amorf yapıdadır, bir polimer %100 amorf olabilmektedir. Kristalin yapı içerisinde kendi kendini tekrar eden düzenli birimler vardır, yani zincirler belirli bölgelerde üst üste katlanmıştır. Bu birbiri üzerinde katlandıkları yerlerde düzenli bölgeler oluştururlar, bunlara kristal adı verilir fakat polimerler %100 kristalin yapıda bulunamazlar dolayısıyla bu polimerlere yarı-kristalin polimerler denir.

Kristal yapıdaki malzeme sık paketlenmesi için kristal yapı ışığı geçiremez bu nedenle opaktır ama %100 amorf polimerlerde kristal bölgeler olmadığı için ışığı geçirebilirler dolayısıyla şeffaf olurlar fakat bu durum saf polimerler için geçerlidir çünkü içerisine katkı maddeleri konularak şeffaflığı veya opaklığı değiştirilebilir.

Dallanmış zincir yapısına sahip polimerlerde zincirler birbirine pek yaklaşmadığından iyi paketlenemeyerek kristalin yapıya kolayca sahip olamayıp genellikle amorf yapıda olur, bu sebeple lineer molekül zincir yapısına sahip polimerlerde kristalinite derecesi daha yüksek olmaktadır. Kristalin yapıdaki polimerler, daha yumuşak ve tok olan ancak kalıpta şekillendirilmesi zor olan amorf yapıdakilere kıyasla daha rijit, yüksek erime sıcaklığı, sürtünme ve ısıya karşı dayanıklılığa sahip yüksek yoğunluklu ve kalıplandırılarak şekil verilmesi kolaydır (Turgut, 2012).

Sadece polimerlerde gözlenen bir sıcaklık geçişi olan camsı geçiş sıcaklığından (T_g) bahsediliyorsa amorf yapıdan bahsediliyordur, bu amorf yapının bir özelliğidir. %100 amorf polimerler sadece camsı geçiş sıcaklığına sahiptir. Camsı geçiş sıcaklığı zincirlerin hareketlilik kazandığı sıcaklıktır, her polimer farklı camsı geçiş sıcaklığına sahiptir. Camsı geçiş sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta malzeme cam gibi davranır, kırılmandır. Ancak polimer yarı kristalin ise T_g 'nin üzerine çıkıldığında zincir hareketliliği başlar ama bu hareketlilik kristal bölgelerin bulunması sebebiyle polimeri işlemek için yeterli değildir, kristal bölgelerin yok edilmesi gerekir bu sebeple ısıtmaya devam edilerek kristal bölgelerin yok edildiği erime sıcaklığına (T_m) ulaşılması gerekir. Dolayısıyla %100 amorf polimerler sadece T_g , yarı kristalin polimerler ise hem T_g hem de bunun üzerinde olan T_m sıcaklığına sahiptir. Düz zincirli yapılar daha kolay kristallenebildiğinden, dallanmış yapılar kristallenmeyi baskıladığı için daha az kristallenebildiğinden ve kristalin bölgeler zincir hareketliliğini zorlaştırdığından dallanmış zincir yapısındaki polimerin T_g 'si daha düşüktür, daha kristalin yapıdaki polimerlerin T_g 'si de yüksektir. Çapraz bağlı polimerlerde molekül ağırlığı fazladır, moleküller arası etkileşimleri yüksek olduğundan zincir hareketliliği zorlaşır böylelikle T_g 'leri yüksek olur.

Amorf yapıda olan termoplastikler rastgele molekül zincirlerine sahip düzensiz yapılardır ve camsı geçiş sıcaklığı olan T_g 'nin altında katı ve camsı halde olarak kırılğan yapıdadır. Polimer zincirlerinin üst üste gelerek paklendiği, molekül zincirleri düzenli şekilde olan ve amorf bölgeleri de bulunan yarı kristalin polimerler, amorf bölgelerinin camsı, sert halden elastik hale geçiş sıcaklığı olan camsı geçiş (T_g) ve kristalin yapısının tamamen ortadan kalkarak polimerin sıvı hale geçme sıcaklığı olan erime sıcaklığına (T_m) sahip olup T_g 'si genelde sıfırın altındaki sıcaklıklardadır böylelikle oda sıcaklığında kauçuk veya derimsi davranış göstermektedir, T_g 'nin altında da amorf bölgeleri akışkanlığını yitirirken belirli bir düzende katılaşır dolayısıyla soğuduğunda erime sıcaklığı olan T_m 'nin altında belirli bir düzende sertleşirler (Osswald ve Menges, 2010; Şimşek, 2020; Turgut, 2012). Buradan, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığının (T_m) polimerlerin kullanılabilme sınırlarını belirleyen önemli etkenler olduğunu ve malzemenin katı olarak kullanılacağına T_m ve T_g 'nin altında, plastik olarak kullanılacağına ise T_m 'nin altı, T_g 'nin üstünde çalışma sıcaklığına sahip olması

gerektiğini söyleyebiliriz (Yanatma, 2011). Polimer zincirleri arasındaki kuvvetlerin ve çapraz bağ miktarının artmasıyla camsı geçiş sıcaklığı artmaktadır (Turgut, 2012).

Termoplastik malzemeler ısı ile şekillendirilebilmektedir. Amorf veya yarı kristalin yapıda bulunabilirler. Malzemeye ısı enerjisi verilir, amorf bir termoplastikse camsı geçiş sıcaklığının üzerine ısıtılır, yarı kristalin bir termoplastikse erime sıcaklığına kadar ısıtılır ve eriyik hale getirilir, uygun bir kalıp kullanılarak şekillendirilir. Elde edilen ürün ısıyla eritilip tekrar şekillendirilebilir, geri dönüştürülebilir. Termoplastik malzemelere örnek olarak polistiren, polipropilen, poliamid, polietilen verilebilir.

Termoset malzemeler kimyasal kürleme işlemi ile zincirleri arasında sertlikleri ve verilen şekli uzun süre koruyabilmelerini sağlayan yoğun çapraz bağ yapısı oluşumu ile birbiri üzerinden kayamayan ağlara sahip olan ve yeniden ısıtılrsa bile akma kabiliyetini geri kazanamayan, ısı ile yumuşamayan ve erimeyen aksine sertleşerek tekrar eski haline dönemeyen, bir kez ısı ve basınç altında şekillendirilip sonrasında kimyasal değişim ile plastik özelliğini yitirerek sert bir madde haline geldiğinden tekrardan şekillendirilemeyen, bozunmaları için yüksek sıcaklığa maruz kalması gereken, torna, freze gibi makinelerde işlenebilen polimer malzemelerdir (Osswald ve Menges, 2010; Şimşek, 2020; Turgut, 2012). Buradaki çapraz bağlar kimyasal bağlar olan kovalent ve iyonik bağlardır. Bunlara ek olarak polimer malzemelerde fiziksel bağ olan Van der Waals bağları ve hidrojen ile elektronegatif atom olan oksijen veya nitrojen arasındaki çekimle meydana gelen hidrojen bağları bulunmaktadır. Bu bağlardan bağ kuvveti en yüksek olan bağ türü kimyasal bağlar iken en düşük olan ise fiziksel bağlardır (Osswald ve Menges, 2010; Şimşek, 2020). Morfolojisine göre sınıflandırılırsa çapraz bağlar paketleme olayını engellediğinden kristallenemezler, tamamı amorf yapıdadır. Zincir yapısı bakımından ise tamamı çapraz bağlıdır. Molekül ağırlıkları termoplastiklere göre daha fazladır.

Elastomerler çapraz bağ içermeleri dolayısıyla molekülleri birbirleri üzerinden kayamaz, vulkanize edildiğinde veya çapraz bağlandığında akma kabiliyetlerini kaybederler fakat termoset malzemelere nazaran daha az çapraz bağ içerirler, zincir yapılarında çapraz bağları birbirine yakın olmadığından elastikiyet kazanırlar, çok elastiklerdir. Elastomerik malzemelerin camsı geçiş sıcaklığı olan T_g 'si oda sıcaklığının altında olduğundan oda sıcaklığında oldukça yumuşak ve çok uyumlu elastik yapılardır (Osswald ve Menges,

2010). Bir elastomerik malzeme deforme edildikten sonra ilk boyutuna geri dönebilir. Molekül ağırlıkları yüksektir böylece elastomerden elde edilen ürünün ısı dayanımı çok yüksektir ve mekanik özellikleri iyidir.

Polimerlerin parça imalatı, ulaşım, tekstil, otomotiv gibi kullanım alanları bulunmakla birlikte otomotiv sektöründe valf kapakları, hava filtreleri, tamponlar, ön paneller, farlar, bagaj kapakları, yan ve iç döşemeler, koltuklar ve hava yastıkları, halılar, lastikler, motor kapakları, önceden metalden yapılan hava giriş boruları, yakıt depoları ve diğer birçok otomobil parçası polimer malzemeden üretilmektedir, artık aşınmaya daha dayanıklı ve daha kolay montaj edilen, daha hafif parçalardır (Şimşek, 2020). Otomotiv sektörü ve diğer sektörlerde mukavemet/ağırlık oranı bakımından aynı kullanım alanındaki diğer malzemelere kıyasla daha hafif olmasından, daha düşük maliyetli olmasından dolayı üretim ve kullanım giderlerinin az olmasından, kolay şekil verilmesi sebebiyle yenilikçi tasarımlara elverişli olmasından, konfor, yakıt verimi taleplerini karşılamasından dolayı polimerler sıklıkla kullanılmaktadır (Şimşek, 2020). Bazı yaygın termosetler, amorf ve yarı kristalin termoplastikler ve elastomerlerin kullanım alanları Tablo 3.1’de görülmektedir.

Tablo 3.1. Bazı yaygın polimerlerin kullanım alanları (Osswald ve Menges, 2010)

Polimer		Uygulamalar
Termoplastik	Amorf	Polistiren (PS)
		Seri üretilen şeffaf ürünler, ısıyla şekillendirilmiş ambalajlar, köpüklü ambalajlar ve ısı yalıtım ürünleri vb.
		Polimetil metakrilat (PMMA)
	Yarı kristalin	Çatı pencereleri, uçak pencereleri, lensler, kurşun geçirmez pencereler, otomotiv stop lambaları vb.
		Polikarbonat (PC)
		Kasklar, gözlük camları, CD'ler, kurşun geçirmez camlar, farlar vb.
		Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)
		Süt ve sabun şişeleri, tüpler, kağıt kaplama vb.
		Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)
		Sıkma şişeleri, bakkal poşetleri vb.

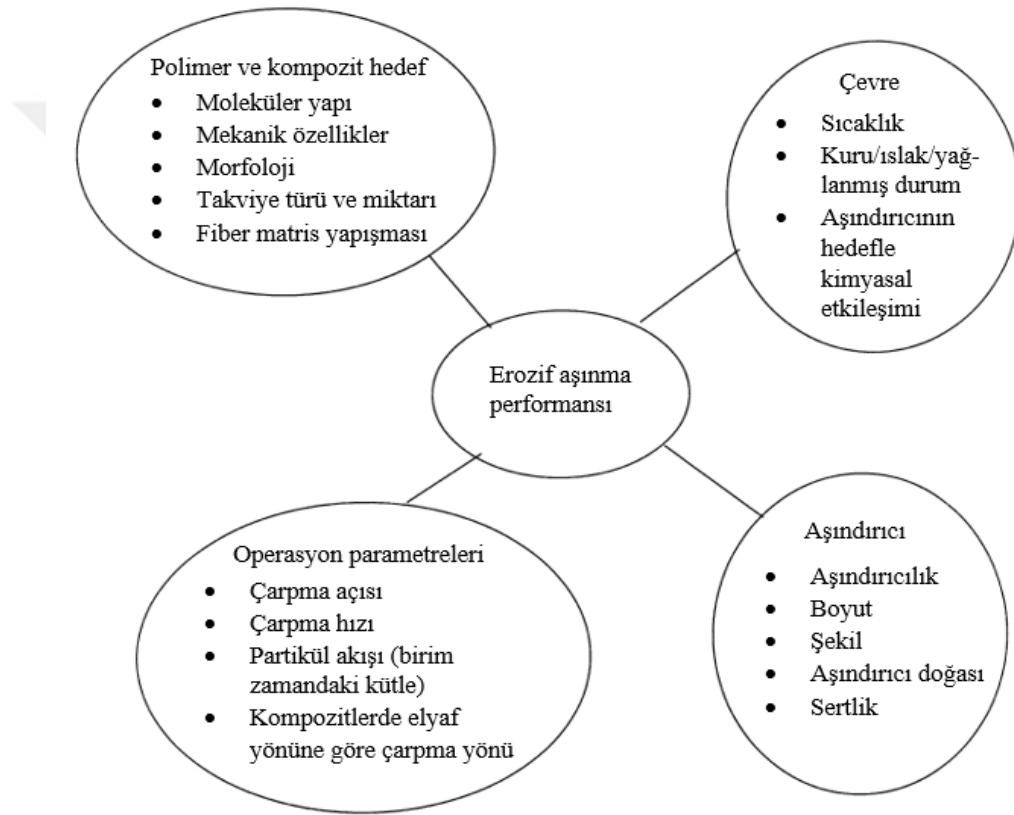
Tablo 3.1. (Devam) Bazı yaygın polimerlerin kullanım alanları (Osswald ve Menges, 2010)

Polimer			Uygulamalar
Termoplastik	Yarı kristalin	Polipropilen (PP)	Bavullar, mühendislik uygulaması (cam fiber takviyeli), elektrikli cihazlar için muhafazalar vb.
		Poliamid (PA)	Rulmanlar, dişliler, cıvatalar, paten tekerlekleri, borular, misinalar, halatlar vb.
Termoset	Epoksi (EP)		Yapıştırıcı, cam fiber takviyeli otomotiv yaprak yayları, karbon fiber takviyeli bisiklet çerçeveleri, uçak kanatları ve gövdesi vb.
	Fenolik (fenol-formaldehit, PF)		Tavalar, ütüler ve tost makineleri için ısıya dayanıklı kulplar, elektrik prizleri vb.
Elastomer	Doğal kauçuk (poliizopren, NR)		Otomotiv lastikleri vb.
	Silikon kauçuk		Contalar, membranlar, ısıya dayanıklı mutfak kapları vb.
	Poliüretan elastomer		Paten tekerlekleri, spor arena zeminleri, kayak botları, otomotiv koltukları (köpük), ayakkabı tabanları (köpük) vb.

3.1. Polimerlerde Katı Partikül Erozyonu

Günümüzde polimerler yüksek mukavemet/ağırlık, yüksek sertlik/ağırlık oranları, düşük sürtünme katsayısı, spesifik yani yoğunlukla ilgili özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamalarında yapısal malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılan oldukça çeşitli malzeme sınıfıdır. Toz, kum, malzeme kıymıkları, katı partikül bulamacı gibi parçaların aşındırıcılara maruz kaldığı çalışma ortamları olan radomlar, sörf tekneleri, gaz ve buhar türbin kanatları, helikopter kanatları gibi uygulama alanlarında polimer ve kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır ve çalışma ortamlarında erozif aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Bu sebeple farklı operasyon

koşullarında polimer esaslı malzemelerin erozif aşınma davranışının incelenmesi gerekir. Şekil 3.4'te polimer ve kompozitlerin erozif aşınma performansına etki eden parametreler gösterilmektedir (Rajesh ve diğ., 2001). Metallere kıyasla polimerik malzemeler ve onların kompozitlerinin düşük maliyetleri, kolay işlenebilirlikleri, üretilebilme kolaylıkları nedeniyle kullanımı hızla artmaktadır (Barkoula ve Kocsis, 2002; Kumar ve diğ., 2020). Polimer kaplamaların çoğu mühendislik uygulamasında erozif aşınmaya maruz kalan bileşenlerin ömürlerini artırmak amacıyla kullanımı yaygındır (Arjula ve diğ., 2008).



Şekil 3.4. Polimer ve kompozitlerin erozif aşınma performansına etki eden parametreler (Rajesh ve diğ., 2001)

Sertlik, süneklik, gevreklik, gerilme seviyeleri, aşındırıcı özellikleri ve operasyon koşulları gibi faktörlerin polimer ve kompozit malzemelerin erozif aşınma davranışı üzerindeki bazı genel etkileri mevcutken bu, tüm polimer ve kompozit malzeme için mutlak değildir, değişiklik gösterebilir. Esneklik, sertlik, kırılma enerjisi gibi özelliklerin malzemenin erozif aşınma davranışını etkilediği düşünülse de herhangi bir ilişkinin olmadığını belirten çalışmalar da bulunmaktadır (Rajesh ve diğ., 2001).

Erozif aşınmada malzemelerin özellikleri, erozyon oranı ve malzeme kaldırma mekanizmasını önemli ölçüde etkiler (Arjula ve diğ., 2008; Barkoula ve Kocsis, 2002). Sünek ve kauçuksu malzemelerin tüm çarpma açılarında gevreklerle göre erozyon dirençleri daha yüksek olup aşınma gerçekleşebilmesi için daha fazla erozyona maruz kalması gerekir, inkübasyon periyodunun varlığı da erozyon dirençlerinin daha iyi olduğunun kanıtıdır (Barkoula ve diğ., 2001). Elastomerler, sünek moda benzer şekilde eğik açılı darbelerde maksimum erozyon gösterir fakat sünek termoplastiklere göre daha düşük bir ağırlık kaybı meydana getirir. Elastomerlerde elastikiyetlerine bağlı olarak partiküllerin kinetik enerjisi çok daha yüksek miktarda emilir, malzeme kaldırmak için tek bir aşındırıcı partikülün darbesiyle elde edilen gerinmenin yetersiz olduğu varsayılmaktadır. Elde edilen gerinimin malzeme kaldırmaya yol açması için tekrarlı darbeler gerekir. Bu sebeple elastikiyeti daha yüksek olan elastomerlerin erozyon direnci daha yüksek olur (Arjula ve diğ., 2008; Barkoula ve Kocsis, 2002). Malzemelerde genel olarak dik çarpma durumunda aktarılan enerjinin tümü çarpma ve mikro çatlama ile dağıtıldığı ve eğik açılarda partikülün yatay hız bileşeni ile mikro kesme ve mikro sürme mekanizmalarıyla malzeme kaldırmanın meydana geldiği bilinirken elastomerlerde bu durum geçerli olmayıp dik çarpma açılarında yorulma çatlağı yayılmasıyla, eğik çarpma açılarında ise yırtılma ve yorulma çatlağı yayılmasıyla malzeme kaldırma gerçekleşmektedir (Barkoula ve diğ., 2001). Polimerlerde katı partikül erozyonu sonrası ağırlık kaybı olmasa bile deforme olan kısım çarpma bölgesinden uzağa itilir ve hasar ilerler (Arjula ve diğ., 2008; Barkoula ve Kocsis, 2002).

Hedef malzemeye aşındırıcı partikülün çarpmasıyla darbe kuvvetinin oluşturduğu yerel enerji konsantrasyonu aşınmayı etkileyerek parçacığın çarpmadan önceki enerjisi normal, elastik darbe; normal, plastik darbe; normal, elastik/plastik darbe; eğik, elastik/plastik darbe gibi başka enerji terimlerine dönüştürülür. Örneğin, kauçuk malzemelerde normal elastik çarpma ile darbe enerjisinin tamamı geri tepme ile dışarıya bırakılır. Öte yandan, tüm enerjinin plastik deformasyona dönüştürülmesi kırılma başlangıcı gerçekleşmeden pek mümkün olmayacağı için normal plastik çarpma çok gerçekleşen bir durum olmamaktadır. En sık gerçekleşen durum ise enerjinin birazının geri tepme ile dışarıya bırakılıp diğer kısmının hedef malzemenin ve aşındırıcı parçacığın özelliklerine bağlı olarak plastik enerjiye dönüştürüldüğü normal elastik/plastik darbedir. Hedef malzeme ve aşındırıcıların sünekliği ne kadar düşük olursa kırılmaya sebep olacak gerilme

döngüleri ve kırılma için gereken enerji de o kadar az olacağından erozif aşınma fazla olacaktır. Eğik, elastik/plastik darbe ise özellikle keskin kenarlı aşındırıcı partiküller ile mikro kesme ve mikro sürme aşınma mekanizmalarının meydana geldiği en yaygın darbe çeşitlerinden biridir. Mikro kesme ve mikro sürme aşınma mekanizmaları esasında parçacıkların sertliği ile ilgili olduğundan aşındırıcılar gevrek malzemeleri kolay kolay kesemez bu sebeple daha az enerjiyi aktarabilir ve hızın dikey bileşeni vasıtasıyla malzemeye enerji aktarılabilir (Patnaik ve diğ., 2010).

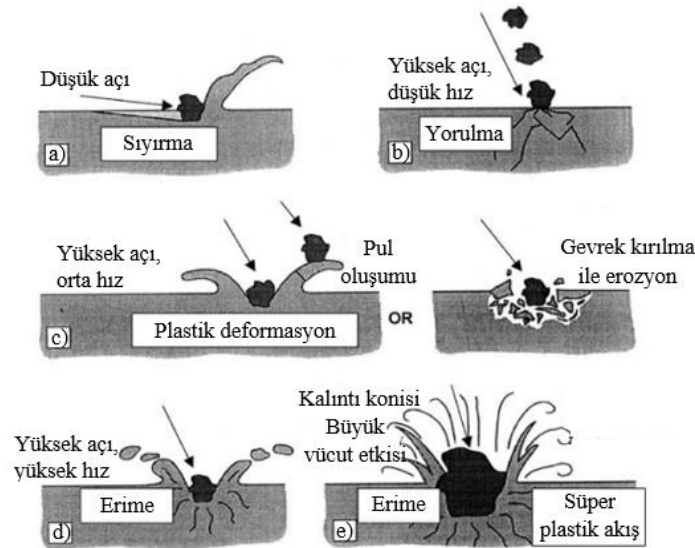
Genellikle kauçuk malzemelerde dik açılı çarpma durumunda başlangıçtaki parçacık enerjisinin elastik enerjiye ve parçacığın malzemeye çarpıp ayrılırken de tekrar parçacıkta kinetik enerjiye dönüşerek erozyonun olmadığı bir davranış gözlenmektedir. Bu malzemelere çarpan aşındırıcı parçacıklar köşeli yapıya sahipse makromoleküllerin yırtılması veya ayrılma gerçekleşir. Malzemelerin yüksek mukavemetli ve sert olduğu, aşındırıcı parçacıkların ise kütlesi veya hızının düşük olması sebebiyle enerjisinin düşük olacağı durumdaki katı partikül erozyonlarında genelde elastik darbe hakim olmaktadır. Dik açılı çarpmalarda hedef malzeme ve aşındırıcı parçacıkların sünekliğinin düşük olduğu durumda hasara neden olan döngülerin sayısı da o kadar az olup erozif aşınma miktarı fazla olur, süneklik arttıkça darbe kuvveti ve gerilmelerin etkisi daha düşük olur (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Polimerlerin ve bunların kompozitlerinin katı partikül erozyonu süreçleri ve etkileyen parametrelerin gözden geçirildiği bir çalışmada (Barkoula ve Kocsis, 2002) polimerler ve kompozitlerinin katı partikül erozyonu üzerine bilinen erozif aşınma mekanizmaları Şekil 3.5'te görüldüğü gibi beş temel tipte özetlenmiş, deneysel koşullar ve malzeme özelliklerinin baskın mekanizmaların tipini, enerji dönüşümünü belirlediği belirtilmiştir.

Katı partikül erozyonunda mekanik etkinin yanı sıra, hedef malzemedeki meydana gelen erozyon hasarını karmaşık hale getiren termal, kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar da meydana gelebilmektedir. Çarpma açısını, aşındırıcı olarak tabir edilebilen düşük ve darbeleri olarak tabir edilebilen yüksek çarpma açıları olarak sınıflandırmak mümkündür (Cai ve diğ., 2015). Yüksek ve düşük açılarda erozif aşınma mekanizmaları farklılık göstermektedir, darbe kuvvetinin teğetsel bileşeni erozif aşınmadan önemli oranda sorumludur. Eğik açılı çarpmalarda baskın erozyon mekanizmaları olarak mikro kesme ve mikro sürme görülürken, normal çarpmada plastik deformasyon ve mikro çatlama

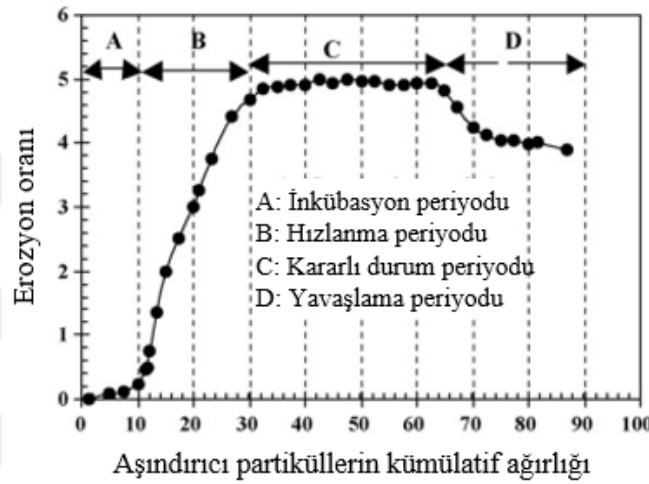
görülmektedir. Ancak çok sünek bir polimer malzeme olan PEEK'in (Polietereterketon) çatlak oluşumuyla erozyonun gözlemlendiği gevrek aşınma davranışı göstermesiyle ve aromatik poliamidin kırılgan, sert ve amorf bir polimer olmasına karşın 30° çarpma açısında maksimum erozyon oranı veren sünek erozyon davranışı göstermesinden kırılma mekanizmasının her zaman polimer malzemenin süneklik veya gevreklik durumunu yansıtmayabileceğini anlamış oluruz (Rajesh ve diğ., 2001).

Katı partikül erozyonunda hedef malzemede meydana gelen erozyon mekanizmaları aşındırıcı çarpma hızından etkilenmektedir, düşük hızlarda aşındırıcının malzemeye aktaracağı enerji daha düşük olduğundan plastik deformasyon oluşturmak için yetersiz kalmaktadır, orta hızlarda aşınma sünek malzemede plastik deformasyonlar ve bu plastik deformasyonların tekrarlanmasıyla meydana gelirken gevrek malzemelerde çatlak oluşumu ve gevrek kırılmayla meydana gelmektedir. Çok yüksek çarpma hızlarında ise hedef malzemenin yüzeyinde erimeye sebep olabilmektedir. Aşındırıcı şekli de erozyon mekanizmalarına etki etmektedir, küresel veya kör aşındırıcı parçacıklar aşırı plastik deformasyon ile ince pul şeklindeki kalıntıların kaldırılmasına sebep olurken köşeli aşındırıcı partiküller kesme, sürme veya kırılgan parçalanma erozyon mekanizmalarına sebep olmaktadır (Cai ve diğ., 2015).



Şekil 3.5. Katı partikül erozyonunun olası mekanizmaları a) düşük çarpma açılarında aşınma, b) düşük hız, yüksek çarpma açısı sırasında yüzey yorulması, c) orta hız, yüksek çarpma açısı sırasında çoklu plastik deformasyon veya gevrek kırılma, d) yüksek çarpma hızlarında yüzey erimesi, e) ikincil etkileri olan makroskopik erozyon (Barkoula ve Kocsis, 2002)

Polimerlerde katı partikül erozyonuyla gözlemlenen tipik erozyon davranışları çarpan aşındırıcı partiküllerin kümülatif ağırlığına karşı erozyon oranıyla Şekil 3.6'da gösterilmektedir. İnkübasyon periyodu ağırlık kaybından ziyade ağırlık artışının gözlemlendiği; hızlanma periyodu erozyon oranının hızla artış gösterdiği ve tepe değerinin elde edildiği; kararlı durum periyodu erozyon oranının yaklaşık olarak sabit olduğu; yavaşlama periyodu ise tepe veya sabit erozyon oranının düşüş gösterdiği süreçtir (Harsha ve Thakre, 2007).



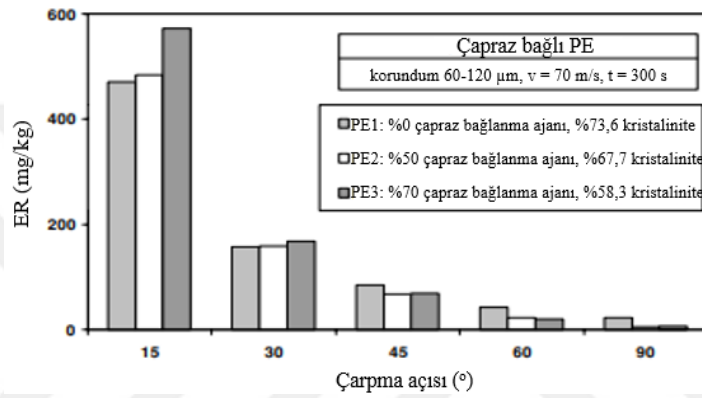
Şekil 3.6. Polimerlerin çarpan aşındırıcı partiküllerin kümülatif ağırlığına bağlı olarak tipik erozyon davranışları (Harsha ve Thakre, 2007)

Polimerlerin ve elastomerlerin katı partikül erozyonu davranışıyla ilgili yapılan çalışmalarda erozyon direncinin morfolojik, mekanik, termomekanik ve kırılma özellikleriyle olan ilişkileri üzerinde durulmuştur (Barkoula ve Kocsis, 2002).

a) Morfolojik Özellikler: Morfolojik olarak polimerlerin amorf ve kristalinlik durumu, molekül ağırlığı, çapraz bağların varlığı önem arz etmektedir. Kristaliniteyle ilgili olarak, amorf polimerler daha gevrek özellikler gösterirken, yarı kristalin polimerler daha belirgin bir viskoelastik karaktere sahip olmaktadır. Bu sebeple amorf polimerlerin genellikle yarı kristalinlere göre daha hızlı aşındığı belirtilmiştir (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Kimyasal Olarak, Çapraz Bağlı Termoplastikler: Bileşimleri sırasında farklı miktarlarda çapraz bağlama ajanı kullanılarak farklı çapraz bağlanma oranlarında elde edilmiş PE1, PE2 ve PE3 polimerlerinin katı partikül erozyonu sonucu elde edilen erozyon oranlarının

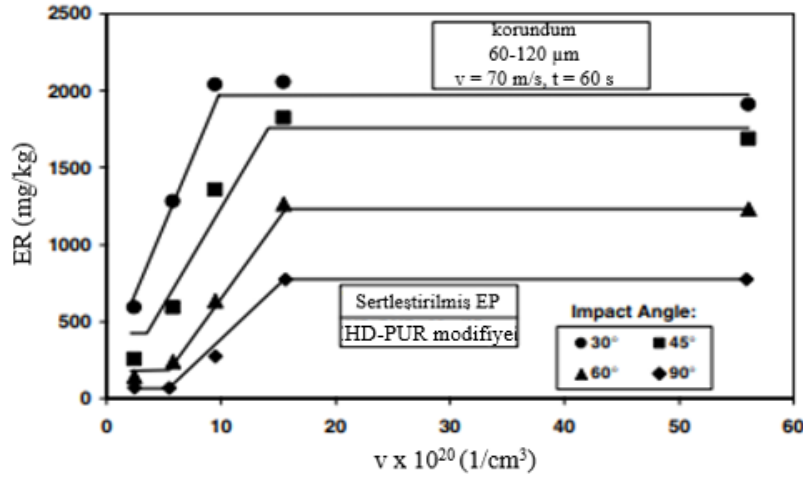
bulunduğu Şekil 3.7'deki grafiğe bakıldığında çapraz bağlanmanın kristalinlikte değişikliklere yol açtığı, düşük çarpma açılarında erozyon direncini kötüleştirdiği, yüksek çarpma açılarında ise çapraz bağlı polimerde çatlak büyümesinin başlaması için daha yüksek bir gerinim enerjisi yoğunluğu gerektiği, çapraz bağlı olmayan polimerde oldukça düşük gerinim enerjisi yoğunluklarında çatlak büyümesi başladığı bilindiğinden kırılma tokluğunda meydana gelen bu artış yorulma çatlağı büyümesiyle sınırlı olan koşullar altında daha iyi aşınma direnci göstererek erozyon direncini geliştirdiği gözlemlenmiştir (Barkoula ve Kocsis, 2002).



Şekil 3.7. Çeşitli çapraz bağ derecelerine sahip PE numuneleri için çarpma açısının bir fonksiyonu olarak erozyon oranları (Barkoula ve Kocsis, 2002)

Kimyasal Olarak, Çapraz Bağlı Termosetler: Çapraz bağlanmanın katı partikül erozyonuna etkisini incelemek amacıyla EP'deki HD-PUR (Higrotermal olarak ayrılmış polyester-üretan) miktarı değiştirilerek elde edilen EP/HD-PUR sistemlerindeki çapraz bağ yoğunluğunun (v) erozyon oranı üzerindeki etkisi Şekil 3.8'de gösterilmektedir (Barkoula ve Kocsis, 2002).

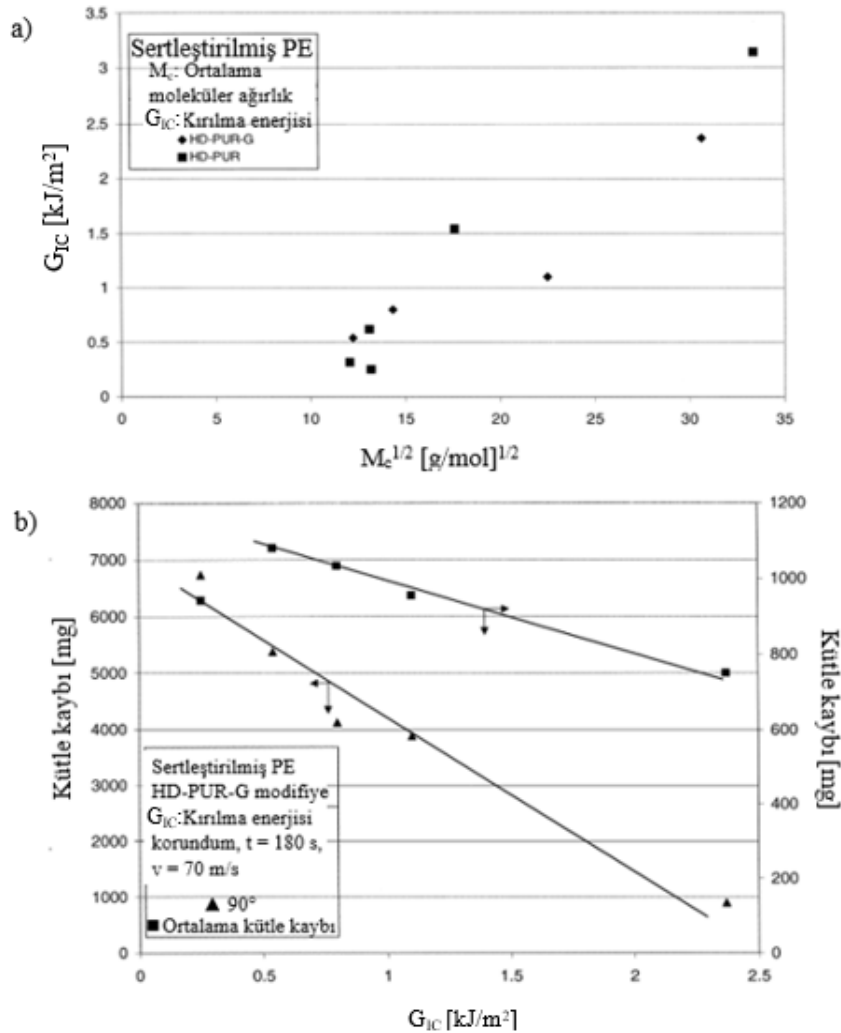
Şekil 3.8'de görüldüğü üzere genel olarak tüm açılarda ER- v değişiminin başlangıcı bir platodur ve çapraz bağ yoğunluğunun artmasıyla belirli bir değere kadar erozyon artışı gözlenir. Bu değerden sonraysa yine bir plato oluşumu gözlenir. İlk plato çarpma açısı düştükçe küçülürken hatta 30°'de kaybolurken ikinci plato çarpma açısı düştükçe büyüme eğilimindedir. İki platonun oluşu, düşük ve yüksek çapraz bağlı malzemelerde çapraz bağın erozyon oranına etki etmediğini ifade ederken platolar arasında bulunan erozyon oranında gözlemlenen artışın çapraz bağ yoğunluğunda artış olması sebebiyle erozyondaki hasar modunda meydana gelen geçişten kaynaklandığını ifade etmektedir (Barkoula ve Kocsis, 2002).



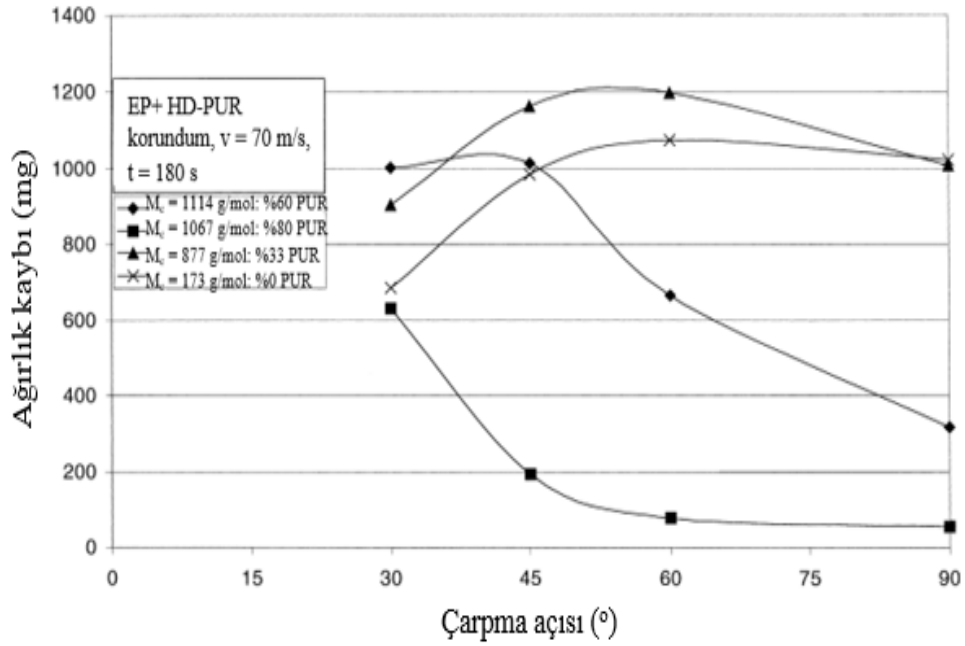
Şekil 3.8. EP/HD-PUR sistemleri için çapraz bağ yoğunluğunun (v) bir fonksiyonu olarak erozyon oranları (Barkoula ve Kocsis, 2002)

Higrotermal olarak ayrılmış poliüretan ile modifiye edilmiş bir epoksi reçinenin katı partikül erozyonunun çapraz bağ yoğunluğuna bağlılığının incelendiği bir çalışmada (Barkoula ve diğ., 2001) çeşitli miktarlarda higrotermal olarak ayrılmış polyester-üretan (HD-PUR) ile modifiye edilen epoksi reçineye (EP) eğik (30° , 45° ve 60°) ve normal çarpma açılarında (90°), ortalama boyutu $60-120 \mu m$ arasında olan keskin köşeli korundum parçacıkları ile katı partikül erozyonu uygulanarak çarpma açısı ve malzemenin çapraz bağ yoğunluğunun erozyon davranışına etkileri araştırılmış, çapraz bağ, çapraz bağlar arasındaki ortalama moleküler ağırlık (M_c) ile karakterize edilerek başlangıçta M_c 'nin düşük olduğu saf EP'nin sıcaklığının katı partikül erozyonu sırasında T_g 'ye ulaşmayarak ve yoğun çapraz bağlı yapısı ($M_c \leq 200 \text{ g/mol}$) nedeniyle kırılğan erozyon gözlenerek 90° maksimum malzeme kaybı gerçekleştiği, inkübasyon gözlenmediği ve erozyon mekanizmasının gevrek kırılma olduğu, yapıdaki HD-PUR modifikasyonu artırılarak hedef malzemenin T_g sıcaklığında düşüş gerçekleştiği ve M_c 'nin yüksek olduğu daha düşük çapraz bağ yoğunluğu ($M_c > 1000 \text{ g/mol}$) nedeniyle kauçuksu erozyonun gözlenerek 30° çarpma açısında maksimum malzeme kaybının gerçekleştiği, aşındırıcı partiküllerin gömülmesinin meydana geldiği ve erozyon mekanizmasının yorulma çatlağı büyümesi olduğu böylece HD-PUR miktarı aracılığıyla erozyonda çapraz bağlı termoset ve kauçuk arasında özellikler elde edilebildiği ve çarpma açısına da bağlı olarak erozif aşınmaya karşı geliştirilmiş dirençli malzemeler elde edildiği, erozyon davranışının hem çarpma açısı gibi dış hem de çapraz bağlar arasındaki ortalama moleküler ağırlık (M_c) gibi iç faktörlerden etkilendiği gözlemlenmiştir.

Elde edilen verilere göre Şekil 3.9'a bakıldığında ortalama molekül ağırlığındaki (M_c) artışla kırılma enerjilerinin (G_{IC}) arttığı, bunun da erozyon dirençlerini artırdığı belirtilmiştir. Şekil 3.10'a bakıldığında saf EP'nin, 60° – 90° çarpma açılarında maksimum ağırlık kaybı gösterdiği ve ağırlıkça en fazla oranda HD-PUR ile modifiye edilen EP'lerin maksimum erozyon direnci sergilediği, ağırlıkça HD-PUR oranının artırılmasıyla maksimum erozyonun gerçekleştiği çarpma açısının 30° 'ye kaydığı böylece erozyonun gevrek erozyon davranışından kauçuk benzeri bir davranışa geçiş yaptığı gözlemlenmiştir (Barkoula ve diğ., 2001). Dolayısıyla erozyon direnci ve erozif aşınma davranışının ortalama molekül ağırlığı (M_c) ve daha genel bakılırsa çapraz bağ yoğunluğuna önemli derecede bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.9. HD-PUR ile modifiye edilmiş EP malzemeleri için a) M_c 'nin bir fonksiyonu olarak kırılma enerjisinin (G_{IC}) değişimi, b) G_{IC} 'nin bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybının değişimi (Barkoula ve diğ., 2001)



Şekil 3.10. Çeşitli oranlarda HD-PUR ile modifiye edilmiş EP malzemelerin çarpma açısına bağlı ağırlık kayıpları (Barkoula ve diğ., 2001)

b) Termal ve Termomekanik Özellikler: Malzemenin termal iletkenliği ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) katı partikül erozyonunu etkileyen parametrelerdir. Aşındırıcı partiküller hedef malzemeye çarptığında çarptığı bölgede gerçekleşen deformasyon ve malzemenin düşük ısı iletkenliğe sahip olduğu durumda yüksek gerilme oranlarındaki adyabatik koşullar sebebiyle yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir ve yüksek sıcaklıklara çıkıldığı takdirde malzeme bir süre yumuşayabilir. Burada yapılan iş, aşındırıcı parçacıkların çarpması sırasındaki maksimum basıncın bir fonksiyonudur, hedef malzeme ve aşındırıcı partikül sertliğinden etkilenir. Hedef malzemenin özgül ısı ve yapılan iş miktarı bu sıcaklığı etkilemektedir. Isının malzemenin çarpma bölgesinden daha hızlı transfer olma durumuna bağlı olarak daha düşük sıcaklık artışı gerçekleşebilir. Yüksek sıcaklıkta meydana gelen yumuşama mekanik stres alanı üzerine bindirilen bir termal stres alanı yaratabilir. Sonuçta, bu hasar modları bozulma ve malzeme kaybı meydana getirir (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Camsı geçiş sıcaklığının (T_g) polimerlerin erozyonu üzerindeki etkisine bakıldığında, erozyon oranı oda sıcaklığının (RT) üzerinde bir camsı geçiş sıcaklığına (T_g) sahip polimerlerde oda sıcaklığının altında camsı geçiş sıcaklığına sahip olanlara göre daha yüksektir ve RT 'nin altındaki T_g için, deneysel sıcaklık ile T_g arasındaki farkın artması ile azalır (Barkoula ve Kocsis, 2002).

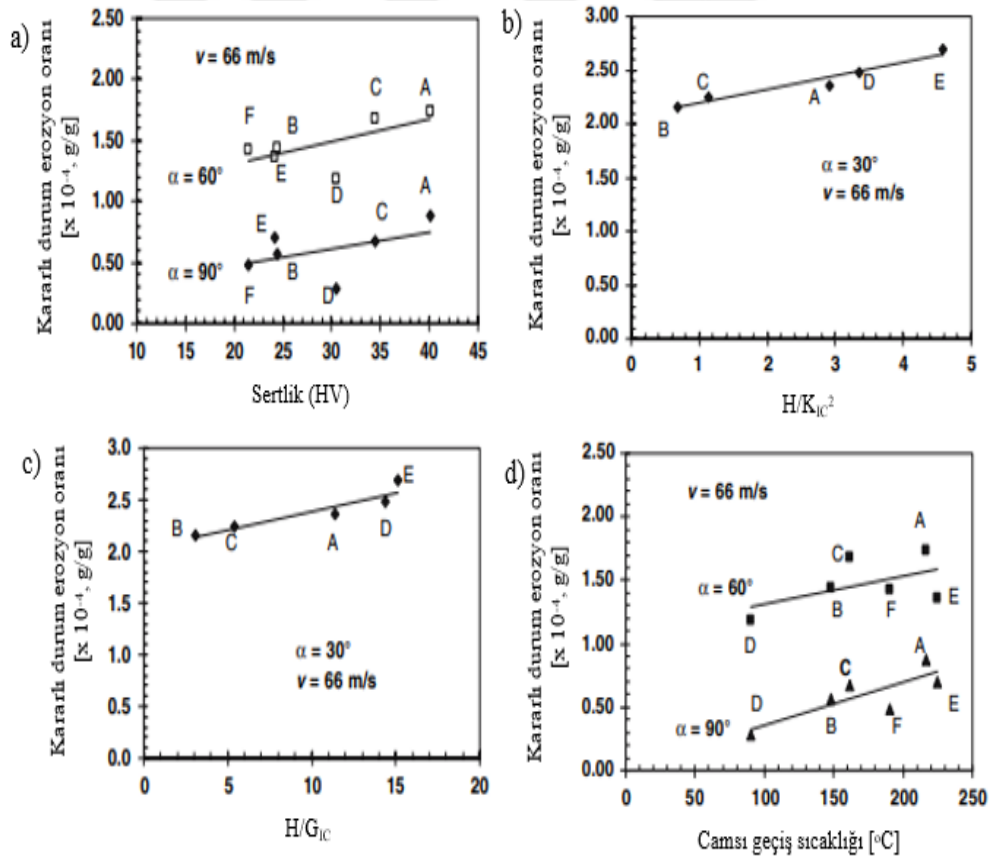
c) Mekanik Özellikler: Polimerler genellikle mühendislik parçasının veya yapının mekanik performansını iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Mekanik özelliklerdeki gelişmeler her zaman üstün aşınma direnci sağlamamaktadır (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Araştırmacılar sertlik, gerilme mukavemeti, elastisite modülü, kırılma tokluğu, akma gerilimi, geri tepme direnci, sürtünme katsayısı ve uzama gibi mekanik özellikler ve erozif aşınma arasındaki olası ilişkiye odaklanmıştır fakat daha az başarı elde etmiştir. Sertlikle ilgili olarak, eğik açılarda ve gevrek erozyonun hakim olduğu katı partikül erozyonunda genellikle artan sertlik ile erozyon direnci iyileşirken elastomerik malzemelerde ise genellikle düşük sertlik değerlerinde daha iyi erozyon dirençleri meydana gelmektedir. Elastomerlerin erozyon direnci için belirleyici bir parametre olan yırtılma enerjisinin ise yorulmadaki çatlak büyüme hızını etkileyen bir parametre olduğu iyi bilinmektedir (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Polimer malzemelerin sertlik (H), çekme dayanımı (S), elastiklik modülü (E), kopmada çekme uzaması (e), kırılma tokluğu (K_{IC}) veya kırılma enerjisi (G_{IC}) ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) gibi özellikleri erozyon oranlarını etkilemektedir fakat tek bir özelliğe bağlı olmadığından polimerlerin erozif aşınmasının mekanik özelliklere bağımlılığı karmaşıktır (Arjula ve diğ., 2008). Erozif aşınmada metal malzemelerin sertliği daha düşük olduğunda erozyon oranları daha yüksek olan ters orantılı bir durum söz konusu olurken genel anlamda sertliği daha düşük bir polimer plastik deformasyon, çatlak oluşumu, yerel kırılma davranışları sergilerken darbenin büyük bir kısmı elastik deformasyon ile absorbe edilir. Polipropilen üzerindeki katı partikül erozyon hasarının incelendiği bir çalışmada (Walley ve diğ., 1984) sertliğin erozif aşınmayla doğru orantılı olduğu ve PE, PP ve PEEK'in sünekliği ile erozyon oranının ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik ve kırılma tokluğu korelasyonunun erozif aşınmaya etkisinin incelendiği bir çalışmada (Lamy, 1984) sertlik ve kırılma tokluğu korelasyonunun erozif aşınmaya bir etkisi olduğu, polimerlerin kırılma indeksi (sertlik (H)/statik kırılma tokluğu (K_{IC})) artışla erozif aşınmayı artırdığı ifade edilmiştir (Rajesh ve diğ., 2001).

Yüksek performanslı termoplastik polimerlerin katı partikül erozyonu davranışının incelendiği bir çalışmada (Arjula ve diğ., 2008) farklı çarpma açıları (15° , 30° , 60° , 90°) ve çarpma hızlarında (25, 37, 50, 66 m/s), 10 mm nozul-numune mesafesinde, oda

sıcaklığında, 200 ± 50 μm boyutunda silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, bazı polimerlerin sertliğinin erozyon oranına etkisi araştırılmış, Şekil 3.11a’da elde edilen veriler incelendiğinde sertliği daha yüksek olan polimerlerin kararlı durum erozyon oranlarının da fazla olduğu, sertlikleri azaldıkça aşındırıcı parçacıkların enerjisinin daha büyük bir kısmının elastik deformasyon için harcanıp plastik deformasyon, çatlak başlatma ve yerel kırılma gibi diğer işlemler için daha düşük darbe enerjisi mevcut olarak daha az malzeme kaldırma gerçekleştiği ve bu durumun erozyon dirençlerini iyileştirdiği, Şekil 3.11b ve Şekil 3.11c’de ise polimer malzemelerin (H/K_{IC}^2) veya (H/G_{IC}) formundaki kırılma indeksi içinde olan değişimle kararlı durum erozyon oranları arasındaki ilişkiden malzemelerin kırılma tokluğu (K_{IC}) veya kırılma enerjisi (G_{IC}) yüksek oldukça erozyon dirençlerinin de daha iyi olduğu, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ile erozyon oranı arasındaki ilişkiyle ilgili olarak ise Şekil 3.11d’de camsı geçiş sıcaklığı daha yüksek olan polimerlerin erozyon oranının da fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.11. Çeşitli polimerlerin farklı çarpma açıları ve çarpma hızlarında kararlı durum erozyon oranları ile çeşitli özellikleri arasındaki ilişki a) sertlik (HV) ile, b) kırılma tokluğu (H/K_{IC}) ile, c) kırılma enerjisi (H/G_{IC}) ile, d) camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ile (Arjula ve diğ., 2008)

Oda sıcaklığının (RT) üzerinde camsı geçiş sıcaklığı (Tg) olan polimer malzemelerin oda sıcaklığının altında Tg'ye sahip olan polimerlere göre erozyon oranlarının daha yüksek, oda sıcaklığının altında Tg'ye sahip olan polimerler için deneyin gerçekleştirildiği sıcaklık ile Tg arasındaki farkın artmasıyla erozyon oranlarının azaldığı bilinmektedir. Bunların hepsinden polimer malzemelerin erozyon direncini etkileyen tek bir faktör olmadığını dolayısıyla polimer erozyonunun karmaşık bir süreç olduğunu ve erozyon oranlarını tüm mekanik özellikleriyle bağdaştırmanın pek mümkün olmadığını söylemek mümkün (Arjula ve diğ., 2008).

Erozyon verimi olarak adlandırılan Denklem (3.1)'de gösterilen parametre malzemenin kaldırılan hacmin, hedef malzeme yüzeyinde yer değiştiren kısma oranı olup malzemelerin sünek veya gevrek erozyon yanıtını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Denklem (3.1)'de ER: erozyon oranı, H: aşınan malzemenin sertliği, ρ : aşındırıcı yoğunluğu, v: darbe hızıdır (Arjula ve Harsha, 2006; Barkoula ve Kocsis, 2002).

$$\eta = \frac{2 \times ER \times H}{\rho \times v^2} \quad (3.1)$$

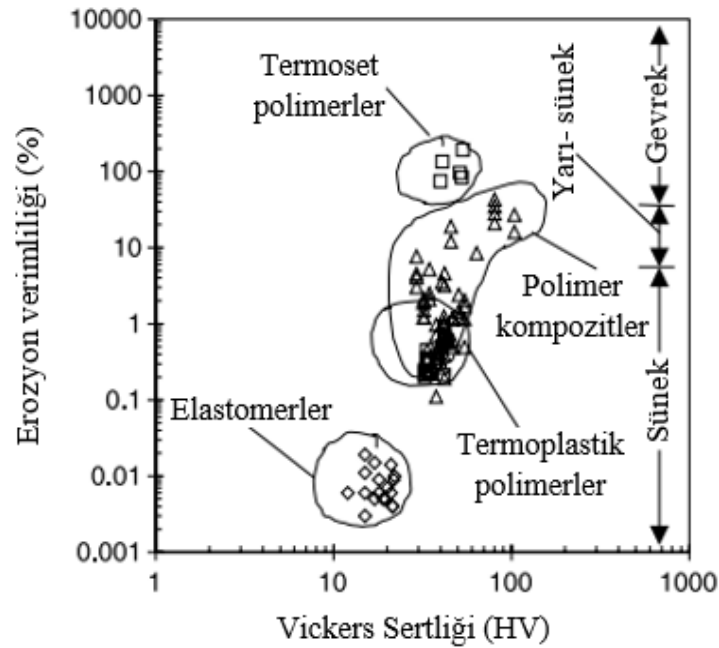
Erozyon veriminin değeri, erozyonun doğası ve mekanizmalarını karakterize etmek için kullanılabilir. İdeal mikro kesme durumunda η bir iken, kırılma, dolayısıyla erozyon olmadan malzemenin sadece mikro sürme hareketleriyle yer değiştirdiği durumda meydana gelen ideal bir mikro sürmede $\eta=0$ 'dır. Dudak oluşumu ve sonrasında kırılması dolayısıyla meydana gelen erozyonda verimlilik 0 ile 1 arasındadır (Barkoula ve Kocsis, 2002; Debnath ve diğ., 2015).

Erozyon verimliliği, yanal veya radyal çatlakların birbirine bağlanması gibi erozyonun malzeme parçalanması ve büyük malzeme yığınlarının parçalanarak çıkarılmasıyla gerçekleştiği kırılmalı malzemelerdeki davranışlar gözlemlendiğinde %100'den bile daha büyük olabilmektedir (Barkoula ve Kocsis, 2002; Debnath ve diğ., 2015).

Bazı polimer malzemeler katı partikül erozyonu sırasında sünek erozyon davranışı gösterirken bazıları da gevrek erozyon davranışı göstermektedir (Brandstädter ve diğ., 1991). Polimerik malzemelerde erozyon davranışı büyük ölçüde reçinenin doğasına bağlı olduğundan malzemenin termoplastik veya termoset olmasına göre farklı erozyon davranışları gözlenmektedir. Genel bir ifadeyle termoplastik polimerlerde sünek erozyon

davranışı görülürken epoksi (EP), fenolik reçineler gibi termoset malzemelerde kırılkan davranış görülmektedir (Arjula ve diğ., 2008; Arjula ve Harsha, 2006; Barkoula ve diğ., 2001). Elastomerlerin erozyon verimi düşükken, termoset malzemelerin erozyon verimi en yüksek olmaktadır. Termoplastik malzemelerde sünek erozyon davranışı gözlenmekle birlikte aşınma mekanizması olarak mikro sürme, plastik deformasyon ve ardından kırılma gözlenir ve dolayısıyla erozyon verimliliğinin %3'ten daha düşük olduğu görülür. Epoksi ve fenolik reçine gibi termoset polimerler ise kırılkan erozyon davranışı gösterir, aşınma mekanizması olarak mikro kesme, yanal ve radyal çatlaktan kaynaklanan parçalanma gözlenir dolayısıyla erozyon verimlilikleri %100 civarında olmaktadır (Arjula ve Harsha, 2006; Arjula ve diğ., 2008).

Polimerlerin erozyon verimliliğinin incelendiği bir çalışmada (Arjula ve Harsha, 2006) sertliğe bağlı olarak elastomerlerin, termoplastik ve termoset polimerlerin, polimer kompozitlerin erozyon verimliliğindeki farklılıklara bakıldığında sertliğin artmasıyla η 'nin artış gösterdiği Şekil 3.12'de ifade edilmiştir. Böylece sertlik artınca kaldırılan hacim de büyük olmaktadır. Elastomerler sünek erozyon davranışı gösterirler ve erozyon verimliliği değerleri düşük olduğu için erozyona karşı dirençlerinin en yüksek olduğunu görürüz.



Şekil 3.12. Polimerler ve polimer kompozitlere karşılık gelen rejimleri gösteren sertlik-erozyon verimliliği haritası (Arjula ve Harsha, 2006)

Aynı zamanda polimer bir malzeme olan Teflonun erozyon verimliliği sertlik ve diğer operasyon parametrelerine göre Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen verilerden erozyon verimliliğinin çarpma açısı ve çarpma hızı gibi diğer operasyon parametrelerine de bağlı olduğu gözlemlenmiştir (Arjula ve Harsha, 2006).

Buna ek olarak Arjula ve Harsha yaptıkları bu çalışmada (Arjula ve Harsha, 2006) literatürde çalışılmış olan bazı polimerlerin aşınma mekanizmalarını derlemiştir, bunlardan bazıları Tablo 3.2’de gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Literatürde çalışılan bazı polimerlerin aşınma mekanizmaları (Arjula ve Harsha, 2006; Rajesh ve diğ., 2001)

Malzeme	Tepe Erozyon Açısı (α , ^o)	Çarpma Açısı (α , ^o)	Aşınma mekanizmaları
Poliamid	15-30	90	Hedef malzemede partikül gömülmesi, dudak oluşumu, plastik deformasyon ve mikro çatlama gözlemlenmiştir.
UHMWPE	30	90	Dik açılı çarpmada görülen ana aşınma mekanizmaları plastik deformasyon ve mikro çatlama değildir.
Naylon	30	90	Hedef malzemenin yüzeyinde oyulma sebebiyle dudak ve tümsek oluşumu görülmüştür.
PEEK	30	30	Hedef malzemede mikro kesme ve mikro sürme aşınma mekanizmaları gözlemlenmiştir.
PEI	60	60	Mikro kesme ve mikro sürme malzeme kaldırma mekanizmaları gözlenmiştir.

Literatürde termoplastik, elastomer ve kompozitlerle ilgili yapılan erozyon çalışmalarında partikül hızının erozyon oranıyla yakından ilişkili olduğu kabul edilirken polimer esaslı malzemelerde genel olarak mikro sürme ve mikro kesme aşınma mekanizmaları görüldüğü belirtilmiştir (Anderson ve diğ., 2021). Saf PEEK termoplastik polimer malzemeye katı partikül erozyonu uygulandığında 90° çarpma açısında meydana gelen erozyon mekanizmalarının geniş plastik deformasyon ve oluşan çatlakların yayılması olduğu fakat bu mekanizmaların malzemeyi etkin bir biçimde kaldıramadığı ve

çarpma açısının 90°'den 30°'ye düşürüldüğünde plastik deformasyonun daha az gerçekleştiği, mikro kesme ve mikro sürme erozyon mekanizmalarının baskın hale geldiği bildirilmiştir (Suresh ve diğ., 2009).

Maksimum erozyon oranının genellikle sünek polimerler için 30° gibi eğik çarpma açılarında, gevrek polimerler için ise 60°- 90° gibi yüksek çarpma açılarında gerçekleştiği ifade edilmektedir (Barkoula ve diğ., 2001). Elastomerler genel olarak eğik açılarda yüksek ve dik çarpma açılarında düşük erozyon oranının gözlemlendiği sünek erozyon davranışı ve yüksek erozif aşınma direnci gösterir. Düşük elastiklik modülü ve yüksek geri tepme esnekliği olan elastomerlerin erozyon dirençleri yüksektir ve elastomerlerde malzeme kaldırma mekanizmasının ardışık partikül darbesiyle meydana gelen çekme gerilmelerinin oluşturduğu çatlakların büyümesi ve malzeme kaldırılmasına neden olacak şekilde kesişmesiyle meydana geldiği bilinmektedir (Arnold ve Hutchings, 1990). Kauçuk gibi elastik yapıda olan malzemelerde dik çarpma açısında erozyon oranları ihmal edilebilirken malzeme özellikleri genel anlamda maksimum ve minimum aşınma oranlarının gözlemlendiği açılar bakımından da ifade edilebilmektedir (Barkoula ve diğ., 2001).

Malzemenin sünekliliği ve esnekliği ne kadar fazlaysa maksimum erozyon oranının elde edildiği açı da küçük olmaktadır, bu maksimum erozyon oranının elde edildiği açı kauçuklar için genellikle 30° civarlarında olup erozyon mekanizmaları termoplastik malzemelerden daha farklı olurken, termoset olan epoksi ve PI (poliimid) gibi kırılğan malzemeler için 90° civarlarında olmaktadır (Barkoula ve diğ., 2001). Geleneksel olarak kırılğan olduğu düşünülen malzemeler olan seramikler, camlar ve bazı polimerler genellikle dik çarpma açılarında en yüksek erozyon oranına sahip olur (Nayak ve diğ., 2021).

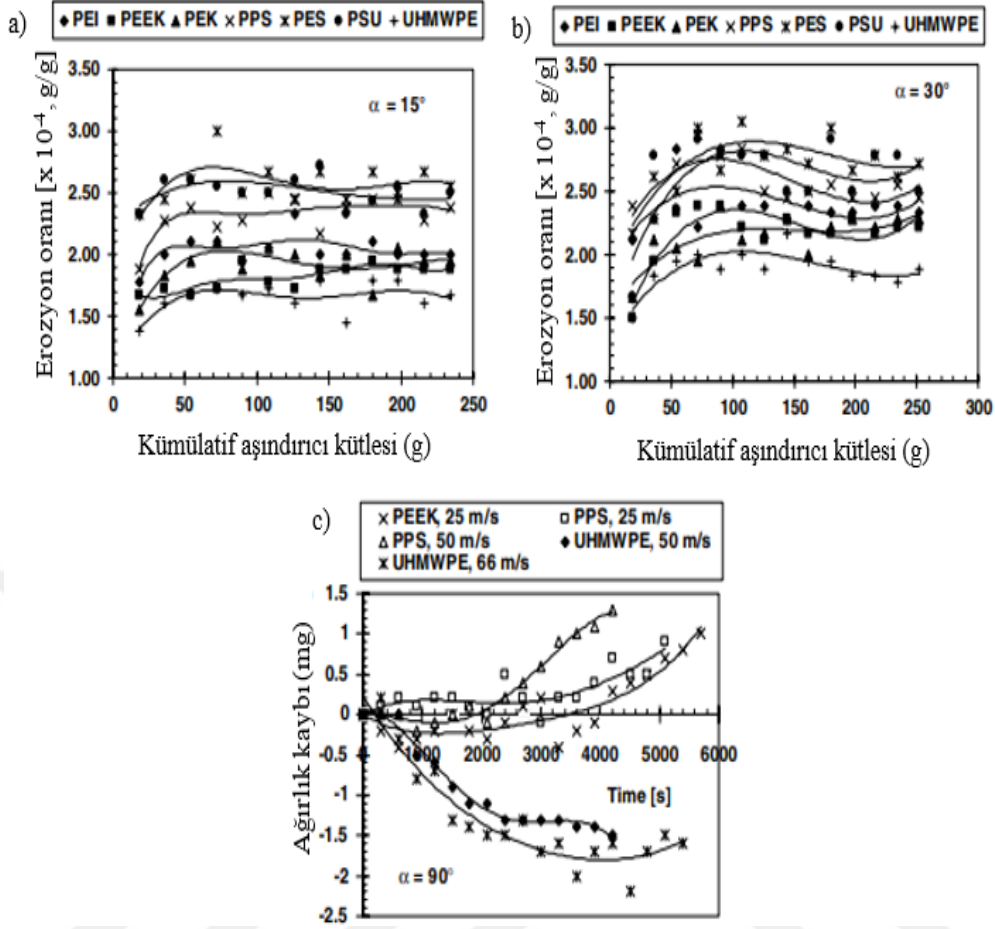
Yüksek performanslı termoplastik polimerlerin katı partikül erozyonu davranışının incelendiği bir çalışmada (Arjula ve diğ., 2008) saf polimerlerin mekanik özelliklerinin erozyon oranlarını nasıl etkilediğini araştırmak için çeşitli mekanik özelliklere sahip olan bazı termoplastik polimerlere (yani polieterimid (PEI), polietereterketon (PEEK), polieterketon (PEK), polifenilen sülfid (PPS), polietersülfon (PES), polisülfon (PSU) ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE)) farklı çarpma açıları (15°, 30°, 60°, 90°) ve çarpma hızlarında (25, 37, 50, 66 m/s), 5 dakika maruz kalma süresinde, 10

mm nozul-numune mesafesinde, oda sıcaklığında, 200 ± 50 μm boyutunda silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, bu polimer malzemelerin en yüksek erozyon oranına 30° çarpma açısında sahip olması sebebiyle sünek erozyon davranışı gösterdiği ve bazı polimerlerde 90° çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin çarpma hızlarının daha düşük olduğu durumlarda inkübasyon periyodu sebebiyle ağırlık artışı gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Tablo 3.3'te bu polimerlerin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Çalışmada kullandıkları polimerlerin fiziksel, termal ve mekanik özellikleri (Arjula ve diğ., 2008)

Özellik	PEI	PEEK	PEK	PPS	PES	PSU	UHMWPE
Yoğunluk (g/cm^3), ρ	1,27	1,30	1,30	1,40	1,37	1,24	0,93
Camsı geçiş sıcaklığı ($^\circ\text{C}$), T_g	217	148	162	90	225	190	-
Çekme dayanımı (MPa), S	105	95	110	86	90	80	48
Kopmada çekme uzaması (%), e	60	>50	20	36	30	>50	>350
Elastisite modülü (MPa), E	3450	3800	4000	3600	2800	2500	689
Eğilme dayanımı (MPa)	152	160	183	145	120	100	-
Çentikli Izod darbe (J/m)	32	60	55	30	50	50	1600
Sertlik (HV), H	40	28	34,4	26,5	24,2	21,4	-
Kırılma tokluğu ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), K_{IC}	3,8	6,0	5,5	3,0	2,3	-	-
Kırılma enerjisi (kJ/m^2), G_{IC}	3,5	8,0	6,4	2,1	1,6	-	-

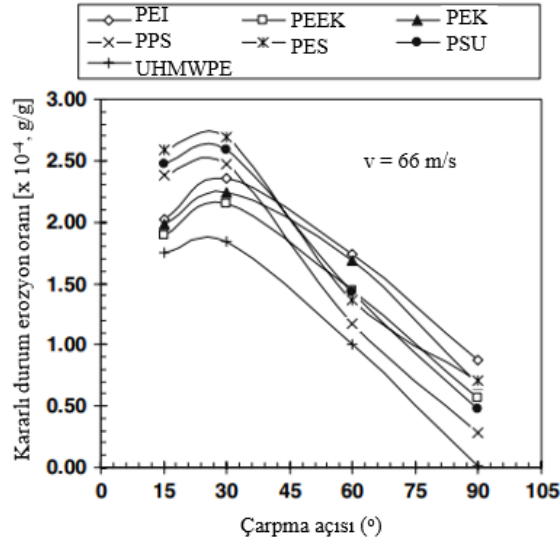
Yapılan çalışmada (Arjula ve diğ., 2008) Şekil 3.13'te görüldüğü üzere, malzemelerin kararlı durum erozyonuna gelene kadar erozyon oranlarının başta düşük bir değerden yükselme gösterip sonrasında biraz düşerek sabit bir duruma geldiği, böylelikle hızlanma, tepe erozyon oranı, yavaşlama ve kararlı durum periyodu evrelerini gösterdiği, buna ek olarak 90° çarpma açısı için farklı çarpma hızlarında PEEK, PPS ve UHMWPE gibi çeşitli polimerlerin inkübasyon periyodu gösterdiği gözlemlenmiştir. Buradan inkübasyon periyodunu polimerlerin özellikleri ve deney koşullarının etkilediği açıkça görülmektedir.



Şekil 3.13. Malzemelerin farklı çarpma açılarında kümülatif aşındırıcı ağırlığına bağlı olarak erozyon oranları a) 15° , b) 30° , c) 90° (Arjula ve diğ., 2008)

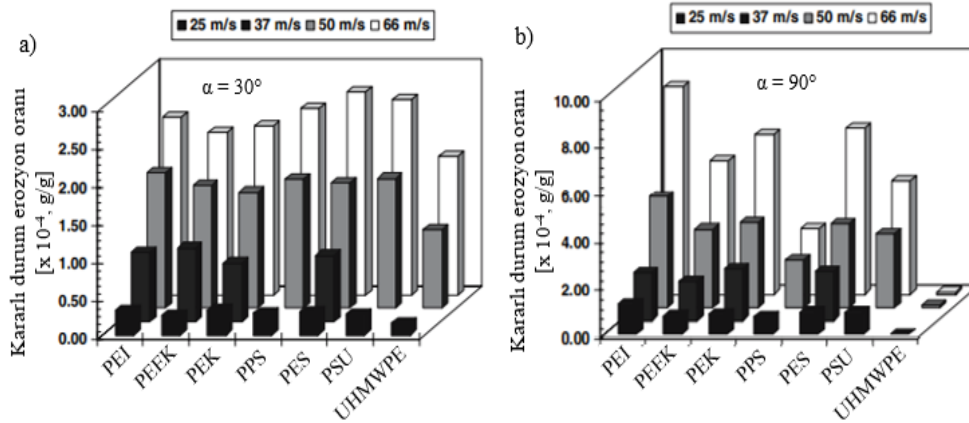
PEEK, PPS gibi camsı geçiş sıcaklığı (T_g) düşük olan yarı kristal termoplastik polimerlerin katı partikül erozyonuna maruz kaldığında başta inkübasyon periyodu sebebiyle ağırlık artışına eğilimli olup tek darbe ile oluşturulan gerinmenin malzeme kaybı elde etmek için yetersiz olduğu ve malzeme kaybı için gereken gerilmeyi oluşturmak için ardışık darbelerin gerekmesi sebebiyle elastomer ve UHMWPE gibi daha esnek malzemelerde inkübasyon periyodunun daha uzun sürerek erozyon dirençlerinin de daha fazla olduğu ifade edilir. Camsı geçiş sıcaklığı daha yüksek olan PEI, PES ve PSU gibi amorf ve daha sert polimerlerde ise inkübasyon periyodu dolayısıyla da ağırlık artışı gözlemlenmemekte, aşındırıcı partiküllerin çarpması esnasında hedef malzemeden daha büyük bir malzeme hacmi çıkarılmaktadır (Arjula ve diğ., 2008).

Elde edilen verilerden Şekil 3.14'te görüldüğü üzere polimer malzemelerin hepsi için maksimum erozyon oranının 30° , minimum erozyon oranının ise 90° çarpma açısında meydana geldiği gözlemlenmiştir (Arjula ve diğ., 2008).



Şekil 3.14. Çarpma açısının çeşitli polimerlerin erozyon oranına etkisi (Arjula ve diğ., 2008)

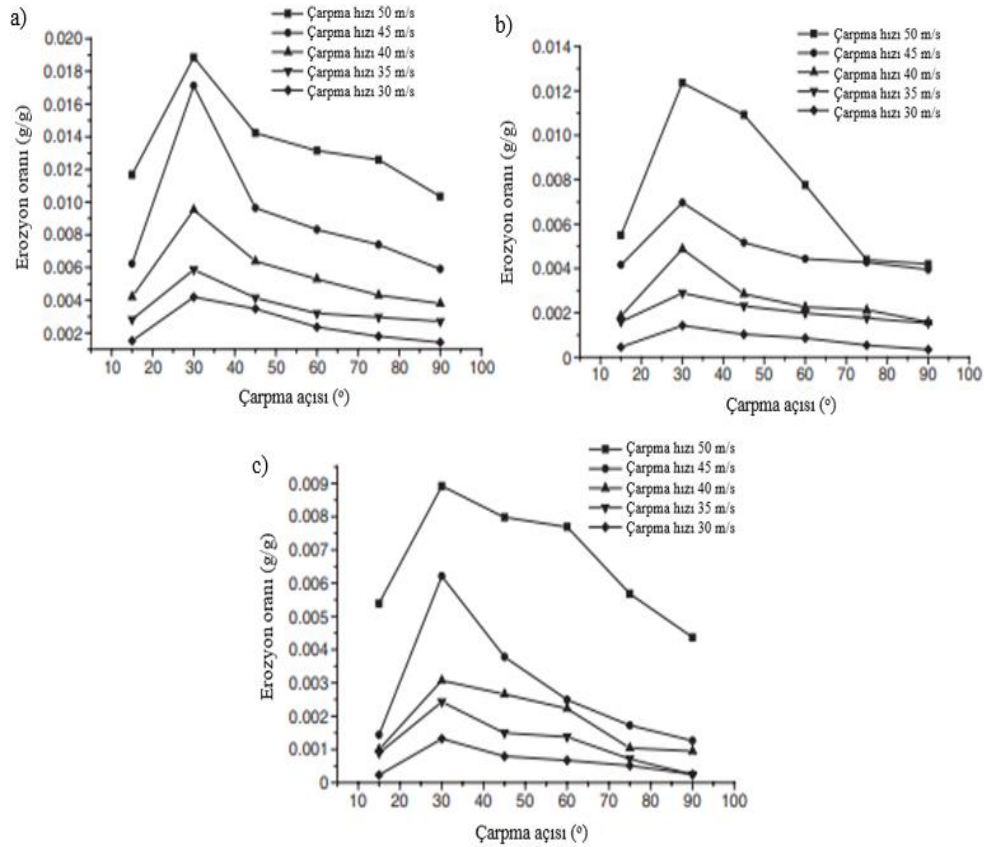
Şekil 3.15'ten görüldüğü üzere UHMWPE'nin düşük modül ve yüksek geri tepme esnekliği sebebiyle yüksek erozyon direncinin olduğu, aşındırıcı parçacık çarpma açısı ve hızındaki değişimle tüm malzemelerin erozyon oranlarında önemli değişimlerin meydana geldiği dolayısıyla deneysel parametrelerin malzemelerin performansını belirlemede çok etkili olduğu gözlemlenmiştir. UHMWPE malzemesinde görülen gözlemlerin elastomer malzemelerde de benzer türde meydana geldiğini söylemek mümkündür (Arjula ve diğ., 2008).



Şekil 3.15. Farklı çarpma hızları ve çarpma açılarında çeşitli polimerlerin kararlı durum erozyon oranını gösteren histogramlar a) 30° çarpma açısında, b) 90° çarpma açısında (Arjula ve diğ., 2008)

Farklı operasyon koşulları altında Teflonun erozyon özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Debnath ve diğ., 2015) farklı çarpma açıları (15°-90°), çarpma hızları (30, 40,

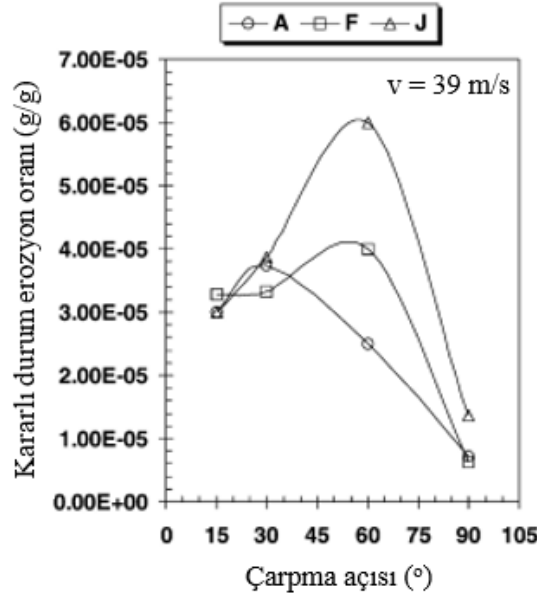
50 m/s), aşındırıcı boyutları (300–355 μm , 355–500 μm , 500–600 μm), nozul-numune mesafeleri (15, 20, 25 mm) ve ortam sıcaklığı altında gerçekleştirilen testte, Şekil 3.16’da gösterildiği üzere farklı operasyon parametreleri kullanıldığında tüm çarpma hızlarında Teflon malzemesinde 30° çarpma açısında maksimum erozyon oranının meydana gelerek sünek erozyon davranışı sergilediği ve baskın aşınma mekanizmalarının mikro kesme, mikrosürme ve plastik deformasyon olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.16. Farklı partikül boyutunda çarpma açısı ve çarpma hızına bağlı olarak erozyon oranları a) 500–600 μm , b) 355–500 μm , c) 300–355 μm (Debnath ve diğ., 2015)

Çeşitli poliarileterketon ve kompozitlerinin katı partikül erozyonu davranışının incelendiği bir çalışmada (Harsha ve diğ., 2003) PEEK (%33 keton), PEK (%50 keton) ve PEKK (%67 keton) gibi farklı keton içeriğine sahip çeşitli poliarileterketonların (PAEK'ler) aşındırıcı olarak 150-212 μm arasında değişen büyüklüklerde köşeli silis kumu kullanılarak farklı çarpma açıları (15°, 30°, 60° ve 90°) ve hızlarda (39, 68, 90 m/s), 10 mm nozul-numune mesafesinde, oda sıcaklığında katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 3.17’de gösterildiği üzere maksimum erozyon oranının saf PEEK’de (A malzemesi) 30° çarpma açısında gerçekleşirken keton grubunun eter

grubuna göre daha rijit davranış göstererek keton içeriğindeki artışın zincir sertliğini artırdığı bilindiğinden saf PEK (F malzemesi) ve PEKK (J malzemesi) matrislerinin sünekliğinin düşük olması sebebiyle gerçekleştiğine dayandırdıkları maksimum erozyon oranının 60° çarpma açısında elde edildiği gözlemlenmiştir.

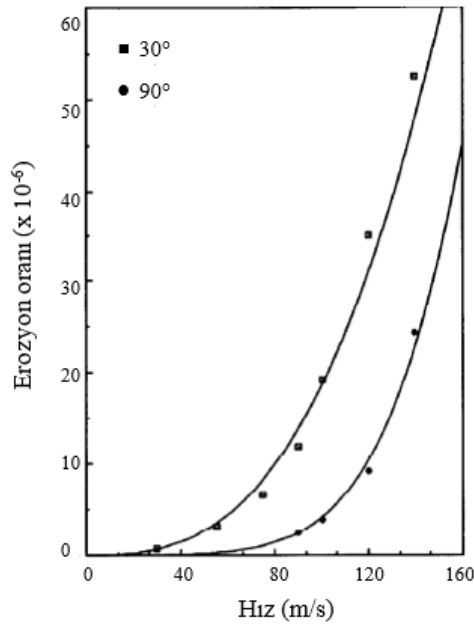


Şekil 3.17. PAEK matrislerinin 39 m/s çarpma hızında çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları (A malzemesi: PEEK, F malzemesi: PEK, J malzemesi: PEKK) (Harsha ve diğ., 2003)

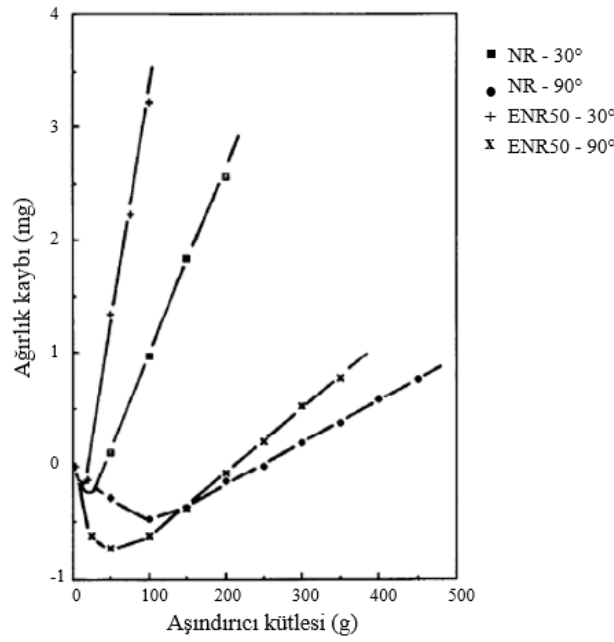
Bismaleimid polimerlerin katı partikül erozyonu ile ilgili bir çalışmada (Brandstädter ve diğ., 1991) çeşitli bileşimlerdeki bismaleimid termoset polimer malzemenin 60 m/s çarpma hızında, farklı boyutlardaki (42, 63, 143 ve 390 μm) köşeli Al_2O_3 aşındırıcı parçacıkları kullanılarak 90° çarpma açısında katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, malzeme kaldırmanın esas olarak gevrek kırılmadan kaynaklı olup çatlak oluşumu ve yayılması ile gerçekleşen gevrek erozyon davranışı ve plastik deformasyon ile meydana geldiği bildirilmiştir.

Katı partikül etkisiyle dolgulu olmayan elastomerlerin erozyon mekanizmalarının incelendiği bir çalışmada (Arnold ve Hutchings, 1990) 30° ve 90° çarpma açısında, 130 μm ortalama parçacık boyutuna sahip silis kumu aşındırıcı partikülleri kullanılarak gerçekleştirilen katı partikül erozyonu ile elastomerlerin erozyon mekanizmaları incelenmiş, ana erozyon mekanizmasının aşındırıcı partikülün çarpmasıyla yüzeyde meydana gelen çekme gerilmeleri ile ince yorulma çatlaklarının oluşma ve büyümesi

olduğu, yüzeyde bir hasarın meydana gelebilmesi için art arda darbelerin gelmesi gerektiği ve elastomer numunelerde inkübasyon periyodu ile parçacık gömülmesinin meydana geldiği, Şekil 3.18'den görüldüğü üzere doğal kauçuğun 30° çarpma açısındaki erozyon oranının 90°'den daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Aşındırıcı ağırlığına bağlı olarak meydana gelen kümülatif ağırlık kaybının gösterildiği Şekil 3.19'a bakıldığında yüksek geri tepme esnekliğine sahip doğal kauçukta (NR) da çok daha düşük geri tepme esnekliğine sahip olan epoksitlenmiş doğal kauçukta (ENR50) da kararlı durum erozyonuna ulaşmadan önce inkübasyon periyodu ile parçacık gömülmesi dolayısıyla ağırlık artışının meydana geldiği ancak 90° çarpma açısında daha fazla ağırlık artışı meydana geldiği, inkübasyon periyodundan sonra aşındırıcı partiküllerin malzemeye gönderilmeye devam etmesiyle kararlı durum erozyon oranının gözlenmeye başladığı ve daha az esnek olan ENR50 elastomer numunesinin erozyon oranının doğal kauçuğa göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Doğal kauçuğun erozyon oranının daha düşük olmasının nedeni düşük modül sebebiyle daha sert bir elastomere göre aşındırıcı çarpmasının oluşturduğu gerilimlerin daha az olarak çatlak başlangıcı ve büyümesi ile hasarın daha yavaş gerçekleşmesi ve hasar meydana gelebilmesi için daha çok tekrarlı aşındırıcı darbesine maruz kalarak malzeme kaldırma için gerekli gerilme oluşumunun sağlanabilmesidir.

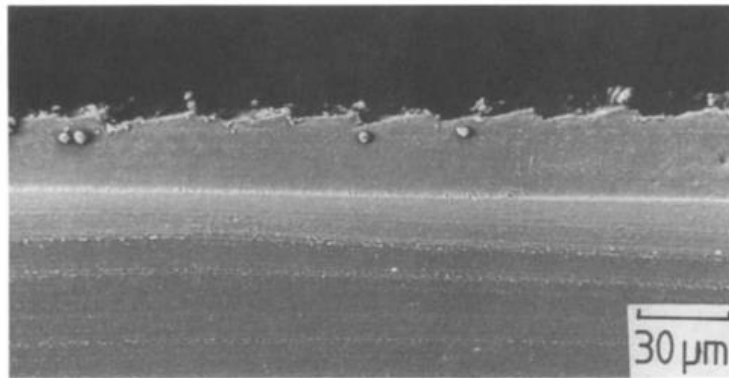


Şekil 3.18. 30° ve 90° çarpma açılarında NR için çarpma açısı ve hızına bağlı olarak erozyon oranındaki değişim (Arnold ve Hutchings, 1990)



Şekil 3.19. 30° ve 90° çarpma açılarında NR ve ENR50 için aşındırıcı kütlesine bağlı olarak ağırlık kaybındaki değişim (Arnold ve Hutchings, 1990)

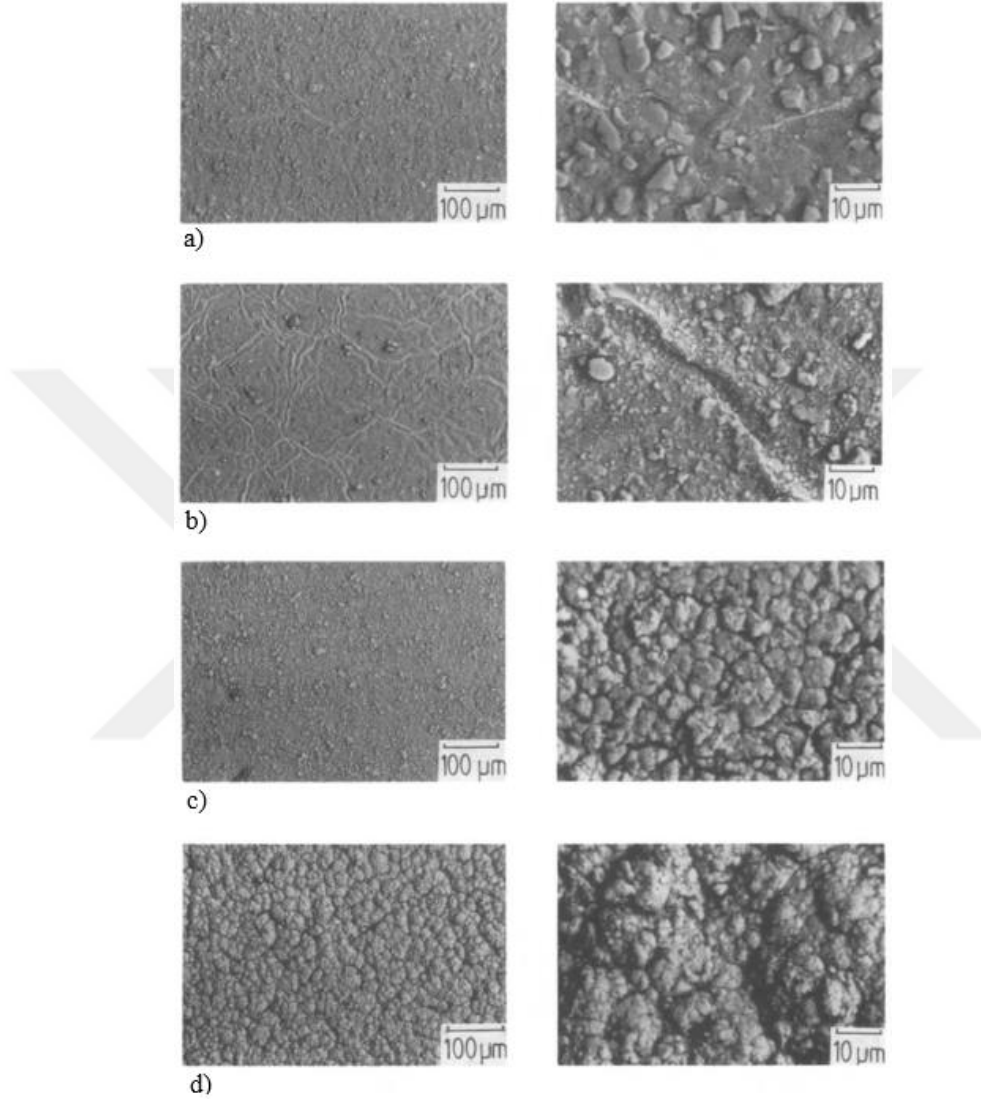
Erozyon yönünün sağdan olduğu ve 30° çarpma açısında gerçekleştirilen katı partikül erozyonunda doğal kauçuğun aşınmış alandaki enine kesitin gösterildiği Şekil 3.20'ye bakıldığında erozyonun testere dişi gibi olduğu görülmektedir (Arnold ve Hutchings, 1990).



Şekil 3.20. 30° çarpma açısı ve 100 m/s çarpma hızında aşınmış bir NR numunesinin aşınmış alanından bir kesitin SEM mikrografı (erozyon yönü sağdan) (Arnold ve Hutchings, 1990)

Şekil 3.21'de 90° çarpma açısında kararlı erozyon durumuna gelene kadar kullanılan kümülatif aşındırıcı ağırlığı arttıkça daha pürüzlü yüzeyler elde edildiği ve 30° çarpma açısında da olduğu gibi bu pürüzlülüğün oluşan çatlakların kesişip birleşmesi ile malzeme

kaldırılmasından meydana geldiği gözlemlenmiş olup malzeme yüzeylerinde kayda değer miktarda aşındırıcı silis parçacıklarının gömülü olduğu gözlemlenmiştir (Arnold ve Hutchings, 1990).



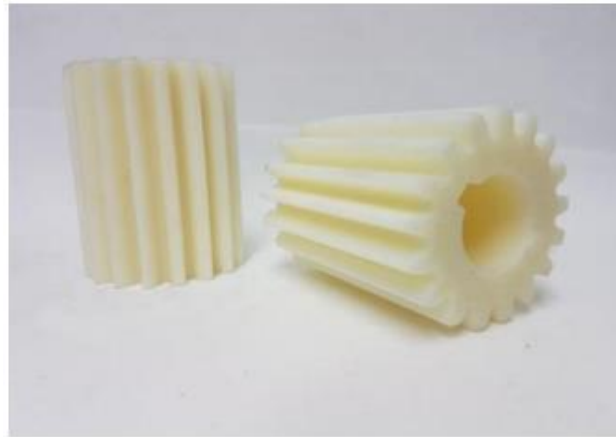
Şekil 3.21. 90° çarpma açısında ve 100 m/s çarpma hızında erozyon sırasında çeşitli aşamalarda NR numunelerinin yüzeyinin SEM mikrografları a) 0,1 g sonra, b) 0,5 g sonra, c) 5 g sonra, d) 200 g sonra (kararlı hal) (Arnold ve Hutchings, 1990)

3.2. Poliamid (PA) Malzeme

Polimer ve kompozit malzemeler, mühendislik uygulamalarında mükemmel sertlik, yüksek ısı ve mekanik dayanım, iyi yüzey kalitesi gibi mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyi olması, hafiflikleri ve kolay işlenebilirlikleri dolayısıyla geleneksel metallere alternatif olarak yaygın bir kullanıma sahiptir (Neis ve diğ., 2017; Turgut,

2012). Polimer malzemeler her türlü şekle getirilebildiği, kalıplanabildiği, metallere kıyasla daha kolay işlenebildiği, boya ve kaplama gerektirmediği için tüm sanayi kollarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Mühendislik plastikleri farklı çeşit ve özelliklere sahip olup en yaygın kullanılan mühendislik plastiklerinden biri doğal olarak (proteinler, yün, ipek) da oluşabilen, suni olarak (nylon, kevlar) da yapılabilen poliamid malzemelerdir (Turgut, 2012).

Termoplastik bir polimer olan ve birçok türü olan poliamidler (PA) sert, tokluğu yüksek, yorulma dayanımı, kimyasal dayanımı iyi, aşınma direnci yüksek, hafif ve erime sıcaklığı yüksek olan malzemeler olup sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda sertliğini koruyan yüksek mukavemet ve düşük sürtünmenin istendiği dişli, yatak gibi parçaların imalatında kullanılabilen malzemelerdir. Poliamidler birçok alanda kullanımı yaygın olan polimerlerdir. Günümüzde makine endüstrisi, tekstil, elektrik ve elektronik, spor ürünleri, gıda endüstrisi, tıbbi cihazlar, beyaz eşya sanayi, inşaat sanayi ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe kullanılan metal parçalar yerine daha hafif olan polimer, alüminyum gibi malzemeler kullanılmaya başlamıştır, daha yüksek kütleli çelikler yerine daha düşük kütleyle sahip poliamidler dişli, kavrama, kısma valfleri, motor kapakları, emme manifoldları, kapı tutamakları gibi otomobil bileşenlerinde, istenilen bölgelerde sertliği artırmak için de kullanılabilmekle beraber kimyasallara karşı yüksek dayanımı sayesinde kimyasal etkileşimin olduğu benzin boruları gibi yerlerde de kullanılabilmektedir. Bu durum araç ağırlığında düşüş elde edilerek yakıt tasarrufu sağlamaya yardımcı olmaktadır. Otomotiv sektöründe kullanılan bir poliamid dişli Şekil 3.22’de gösterilmektedir (Şimşek, 2020; Turgut, 2012).



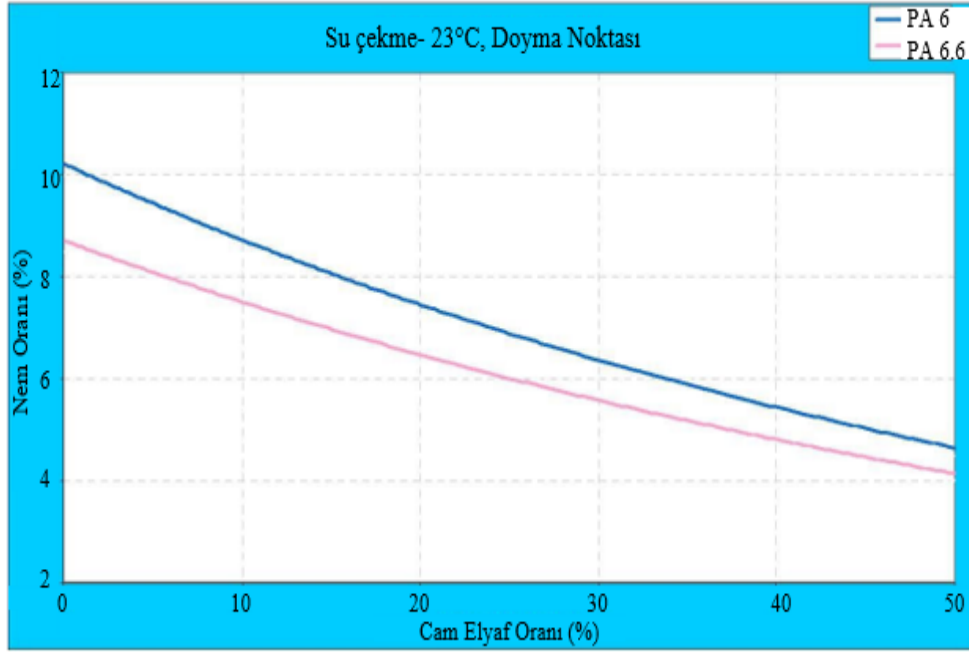
Şekil 3.22. Poliamid dişli (Şimşek, 2020)

En sık kullanılan poliamid 125°C'ye kadar mekanik özelliklerini kolaylıkla koruyabilen, yatak, cıvata, dişli çark gibi yüksek mukavemet ve düşük sürtünme gerektiren, mekanik yüklenen ve ölçü tamlığı arzu edilen uygulamalarda yaygın olarak kullanılan, kuvvetli ve oldukça elastik yapıdaki naylon olup otomotiv, elektrik ve elektronik, ev eşyaları, inşaat, mobilya sektörü ve sanayide en çok kullanılan türleri halka açma polimerizasyonu ile üretilen, yalnızca tek tür monomer gerektiren naylon 6 ve diamin ile diasidin yoğunlaşma polimerizasyonu sentezine dayanan, iki çeşit monomer gerektiren naylon 6,6'dır ve sayıları monomerdeki karbon sayısını temsil etmektedir (Turgut, 2012). Örneğin Poliamid 6.12, 6 karbonlu diamin ve 12 karbonlu diasitten oluşan poliamide verilen addır (Şimşek, 2020).

En sık kullanılan poliamid türlerinden biri olan poliamid 6 (PA 6), iyi mekanik (kuvvet, sertlik, tokluk, sönümlenme) ve tribolojik (kayma, aşınma direnci) özellikleri dolayısıyla yatak burçları, kasnak, dişli gibi çeşitli makine parçalarında kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda polimerlerin performansını artırmak amacıyla çeşitli takviyeli bileşikler ve katkı maddeleri (dolgu maddeleri, yağlayıcılar, yangına dayanıklı ve antioksidasyon maddeleri) kullanılabilen, bünyesine politetrafloroetilen (PTFE), silikon sıvıları, grafit, molibden disülfid (MoS_2) gibi yağlayıcı katkı maddeleri eklenebilmektedir (Neis ve diğ., 2017). Diğer poliamid grubu ise çelik ile aynı mukavemette ve %20 daha hafif olan aromatik poliamid veya Kevlar olarak da adlandırılan aramidlerdir (Turgut, 2012).

Poliamidler bazı niteliklerinin nemli ortamlarda değişikliğe uğraması ve kuvvetli asitlere karşı dayanımının iyi olmaması gibi olumsuz özellikler gösterebilmektedir (Şimşek, 2020). Poliamid malzemeler açık hava koşullarında bekletildiğinde hafif sararır ve mekanik özelliklerinde düşüş meydana gelir fakat petrol yağları, alifatik ve aromatik hidrokarbonlar ve esterlere karşı dirençlidir. Boyut stabilitesi bakımından nem alma oranı az olan polimer malzemeler diğerlerine göre daha üstün olmaktadır. Mekanik özellikleri üzerinde nem miktarı ve kristallinité derecesi ciddi anlamda etkilidir. Poliamidler kimyasal yapıları dolayısıyla higroskopik malzemeler olup maruz kaldıkları ortama göre nem çekebildikçe, nem alma özelliklerinden mekanik ve elektriksel özelliklerinin yanı sıra boyutları da etkilenebildiği için kalıp tasarım ve üretiminde bu durumun dikkate alınması gerekir, su emme miktarları poliamid malzemenin çeşidi, kalınlığı, kristallinitesi, takviye veya dolgu maddesi tipi ve oranı, neme maruz kalma süresi gibi çeşitli etmenlere

bağlıdır. Poliamid malzemeden üretilen parçaların darbe dayanımı ve esnekliğinin artırılması, sertliğinin azaltılması, montaj sırasında ortaya çıkabilecek kırılma probleminin önüne geçilmesi amacıyla nemli ortama maruz kalması sağlanarak bu durumun faydaya çevrilmesi mümkün olacağı gibi parçanın ağırlığı ve boyutlarında artışa sebep olarak ölçü tamlığı istenen yerler için uygulanmaması gerekir. Poliamidlerin bileşimi özelliklerini doğrudan etkilediğinden su alma özelliklerini de etkilemekte, örneğin PA 6.6'ya kıyasla PA 6 moleküler yapısından kaynaklı olarak daha fazla nem çekmektedir fakat Şekil 3.23'te gösterildiği üzere cam fiber takviyesi ile nem alma oranları azaltılabilmektedir, nemli ortamda ölçü tamlığı istendiğinde yaklaşık %10 su ile doymaya ulaşan PA 6 yerine yalnızca %1,5 su ile doymaya ulaşan poliamid 11 tercih edilmektedir (Turgut, 2012).



Şekil 3.23. PA 6 ve PA 6.6 düz ve cam fiber takviyeli tiplerinin nem doyma oranları (Turgut, 2012)

3.2.1. Poliamid Malzemelerde Katı Partikül Erozyonu

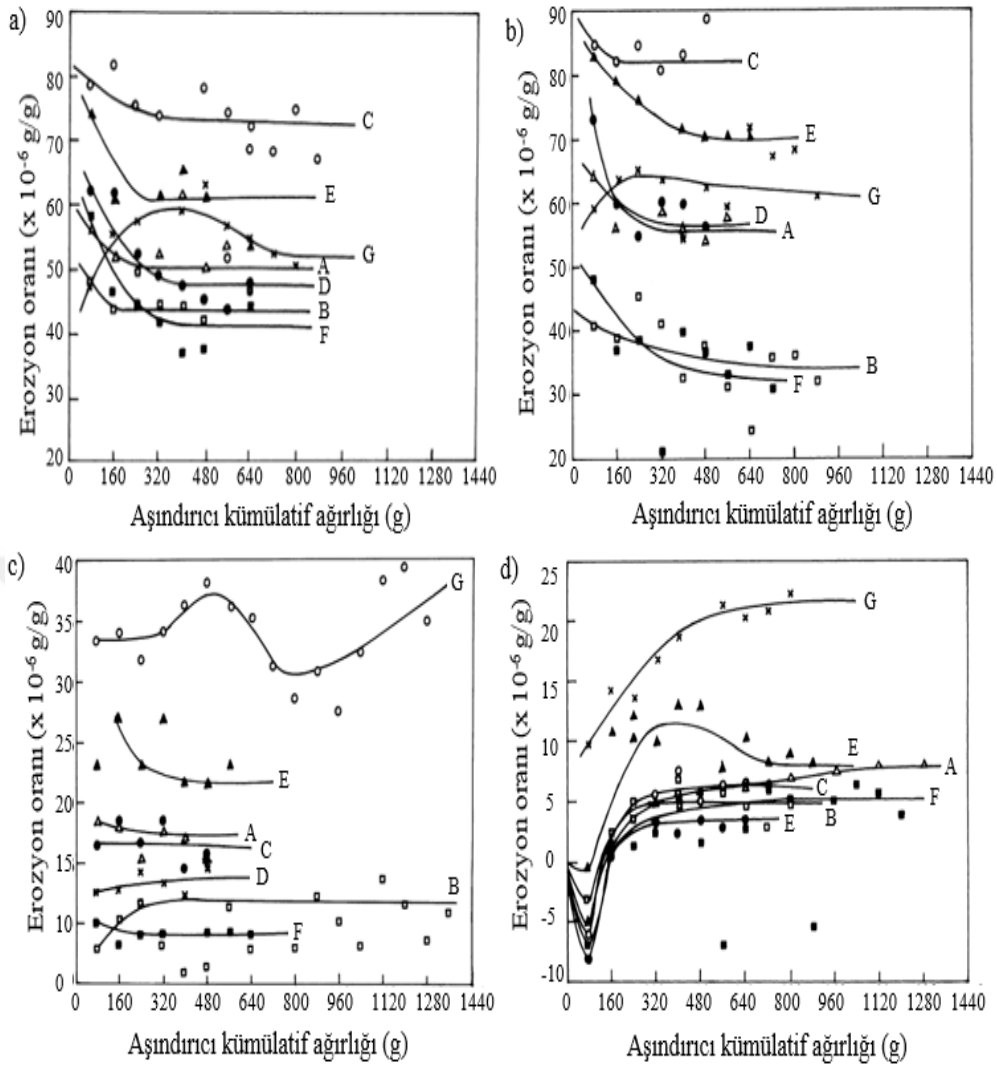
Çeşitli poliamidlerin erozif aşınma davranışının incelendiği bir çalışmada (Rajesh ve diğ., 2001) farklı çarpma açıları ve aşındırıcı miktarlarında, 80 m/s çarpma hızında, 90-180 µm boyutlarındaki silika kum partikülleri ile PA 6, PA 66, PA 66/610, PA 11, PA 12 ve aromatik PA (kırılgan, sert ve amorf) olmak üzere özellikleri Tablo 3.4'te gösterilen bir

dizi poliamid malzemeye katı partikül erozyonu uygulanarak aşındırıcı partikül miktarı ve çarpma açısının bu PA türlerinin erozif aşınma performanslarına etkileri incelenmiştir.

15°, 30°, 60° ve 90° çarpma açılarında kullanılan aşındırıcı partikül miktarına bağlı olarak Şekil 3.24'te elde edilen verilerden tüm PA çeşitleri için kararlı durum erozyonuna ulaşana kadar kullanılan aşındırıcı miktarı ve elde edilen eğrilerin yapısının farklılık gösterdiği, 90°'de Malzeme G (amorf, sert ve kırılğan PA) haricinde tüm PA türlerinde başlangıçta inkübasyon periyodu görülmekle beraber yüksek çarpma açılarında maksimum erozyon oranını Malzeme G'nin gösterdiği gözlemlenmiştir (Rajesh ve diğ., 2001).

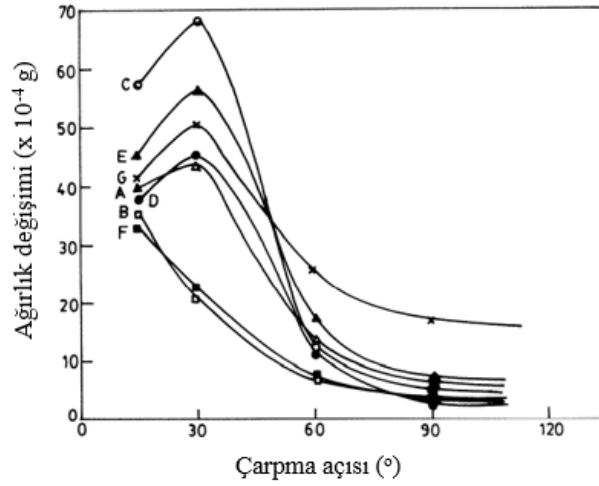
Tablo 3.4. Kullanılan poliamidlerin özellikleri (Rajesh ve diğ., 2001)

Özellik	PA 6	PA 11	PA 12 (L 16 GM)	PA 12 (L 20)	PA 66	PA 66/610	Aromatik PA
Numune adı	A	B	C	D	E	F	G
Ticari ismi	Zytel	Rilsan	Grilamid L 16 GM	Grilamid L 20	Zytel	Grilon BM20 SBG	Cristamid
Çekme dayanımı (MPa)	58	48	36	37	42	31	57
Kopmada uzama (%)	325	393	173	282	207	100	30
Çentikli darbe dayanımı (kg/m)	4,92	5,90	5,90	10,82	3,93	5,90	1,96
Shore D sertliği	74	66	79	76	80	76	85
Camsı geçiş sıcaklığı, T _g (°C)	50	46	46	46	57	-	170
Erime sıcaklığı, T _m (°C)	223	194	178	178	225	200	230



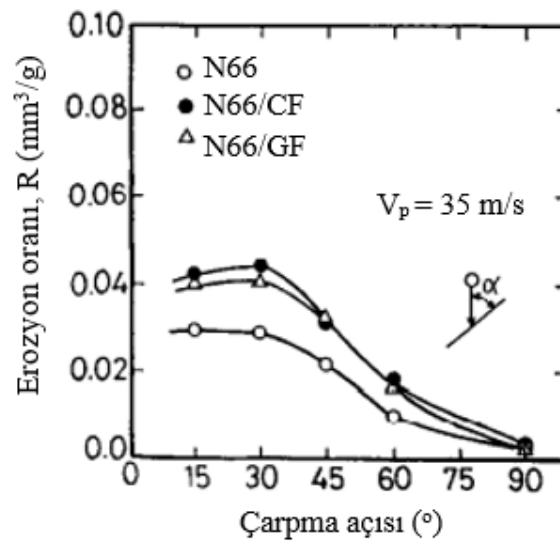
Şekil 3.24. 80 m/s çarpma hızında aşındırıcının kümülatif ağırlığının bir fonksiyonu olarak erozyon oranları (A= PA 6, B= PA 11, C= PA 12 (L 16), D= PA 12 (L 20), E= PA 66, F= PA 66/610 ve G= aromatik PA) a) 15°, b) 30°, c) 60°, d) 90° çarpma açısında (Rajesh ve diğ., 2001)

Şekil 3.25'te belirtildiği üzere bu yedi farklı poliamid türünden A, C, D, E malzemelerinde ve ayrıca G malzemesi sert ve kırılkan yapıda olmasına rağmen maksimum erozyon oranının 30° çarpma açısında diğer ikisinin de 15° çarpma açısında gerçekleşerek sünek erozyon davranışı gösterdikleri ve malzemelerin erozif aşınma performansının çarpma açısına bağlı olarak değişim gösterdiği, 90°'de PA'ların ihmal edilebilecek kadar az aşınma göstermediğinden kauçuktan ziyade metal ve termoplastiklerin gösterdiği erozif aşınma davranışını göstererek sünek metaller ve kauçuklar arasında bir malzeme davranışı sergiledikleri gözlemlenmiştir (Rajesh ve diğ., 2001).



Şekil 3.25. 80 m/s çarpma hızında çarpma açısının bir fonksiyonu olarak kararlı durum erozyon oranları (A= PA 6, B= PA 11, C= PA 12 (L 16), D= PA 12 (L 20), E= PA 66, F= PA 66/610 ve G= aromatik PA) (Rajesh ve diğ., 2001)

Fiber takviyeli plastiklerin katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Miyazaki ve Takeda, 1993) kısa cam veya karbon fiber takviyeli termoplastik reçine olan naylon 66 (N66) reçinesine farklı çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 90°) ve 35 m/s çarpma hızında, 100-150 μm boyutunda SiC aşındırıcı partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 3.26'ya bakıldığında, saf N66 poliamid malzemesinin karbon ve cam fiber takviyeli kompozitlerine göre erozyon direncinin daha yüksek olduğu ve 15° çarpma açısında tepe erozyon oranına sahip olduğu, takviyeler ile tepe erozyon oranının daha yüksek bir açığa kaydığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.26. Saf N66 poliamid malzemesinin ve takviyeli kompozitlerinin çarpma açısına bağlı erozyon oranları (Miyazaki ve Takeda, 1993)

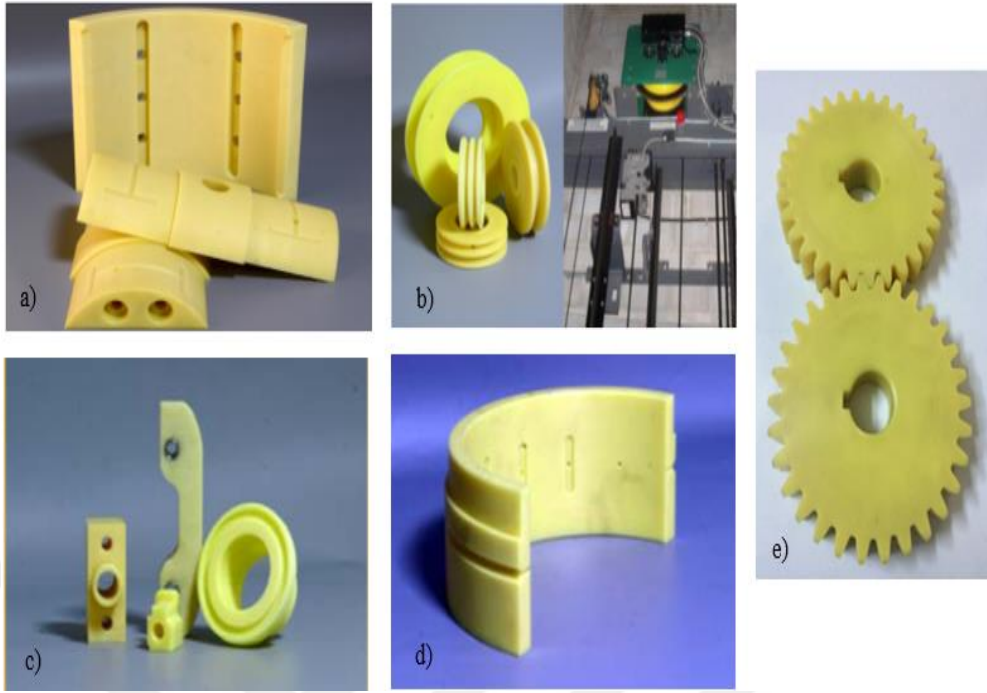
3.2.2. Kestamid Malzeme

Poliamid malzemeler üstün mekanik, fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri olması sebebiyle çok tercih edilen bir mühendislik plastiğidir. Mühendislik uygulamalarında çok kullanılan plastiklerden biri olan ve makine tasarımında yaygın olarak kullanılan, poliamidin dökümü ile elde edilen, döküm poliamid veya döküm naylon olarak da adlandırılan kestamid polimer malzeme kristalin yapıda olması, yüksek moleküler ağırlığı ve çapraz bağlı moleküler yapısı sayesinde sert dokuya sahip ve üstün özellikleri olan, mekanik dayanım değerleri iyi olan, çekme ve basma dayanımları yüksek olan, düşük yoğunluk ve sürtünme katsayısına sahip, metal malzemelerle sürtünme durumunda bile yüksek aşınma dayanımı sergileyen, darbe, korozyon ve bükülmeye dayanıklı, uzun polimer zincirleri nedeniyle yüksek kaliteli, takım tezgâhlarında kolay işlenebilen, ucuz, sessiz çalışabilen bir poliamid olan termoplastik malzemedir (Can ve Tan, 2018; Formisano ve Bonten, 2019; <https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; Ibrahim ve diğ., 2020; Şimşek, 2020; Turgut, 2012). Kimyasal açıdan bakıldığında bir naylon türü olan kestamid (PA6G), belli seviyede çapraz bağlı molekül yapısı dolayısıyla bazı daha üstün özellikleri olan bir poliamid çeşidi olup kestamid (PA6G) malzemeler diğer benzer poliamid ve polimer malzemelere göre dayanımları daha yüksek olan, daha kolay işlenen, pas ve kimyasallara karşı dayanıklı olan malzemeler olduğundan havacılıktan tekstil sanayine kadar birçok endüstri uygulamasında yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Sarı ve Nteziyaremye, 2016; Turgut, 2012). Poliamidler suyu emme özelliği dolayısıyla su ile temasta bulunan ortamlarda tercih edilmezken kestamid, nylon 6'ya (ekstrüzyon poliamid) göre daha az nem absorbe etmesi dolayısıyla ölçü stabilitesi bakımından daha iyi olan, kimyasal maddelere dayanımı iyi bir mühendislik plastiğidir (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; Turgut, 2012). Kestamidin saf hali sarı renk olmakla birlikte mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla bünyesine çeşitli katkıları yapılabilmektedir, içeriğindeki katkı maddelerine göre rengi değişim göstermektedir ve universal metal işleme tezgahlarında işlenebilmektedir (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>).

Kestamid malzemeler kimya, gıda, tekstil, demir-çelik, demiryolları, iş makineleri gibi sanayi kollarında kullanımı yaygın olan, üstün mekanik, fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri, daha ucuz ve hafif olması sayesinde alüminyum, bakır, bronz, çelik, pirinç ve diğer metallerin yerine kullanılabilmeyle birlikte karıştırıcı pervanesi, makara, döner ve kayar hareketli makine parçaları, yağlamasız ve sessiz çalışan dişli çarklar, hadde yatakları, burç ve kızaklar gibi çeşitli makine parçaları ve tüm sanayi kollarında kullanılan, mukavemeti, yoğunluğu ve yüksek sertliği sebebiyle çok tercih edilen bir mühendislik plastiğidir. (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; <https://www.polikim.com.tr/>; Ibrahim ve diğ., 2020; Turgut, 2012).

Yüksek aşınma, yorulma ve darbe dayanımına, düşük sürtünme katsayısına sahip, darbesiz çalışma imkanı sunan, korozyon dayanımı yüksek olan hafif bir termoplastik malzemedir (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; <https://www.polikim.com.tr/>).

Şekil 3.27’de kestamidin kullanım alanlarından bazıları gösterilmektedir. Haddehanelerde uygulamalar için mekanik dayanım ve sıcaklık dayanımının iyi olması istenir. Kestamid malzemeler mekanik dayanım ve sıcaklık dayanımlarının yüksek olmasının yanı sıra yağlamaya ihtiyaç duymaması sebebiyle hadde yatak ve kızaklarında kullanılmaktadır. Sessiz çalışması, aşınma, yorulma ve korozyon dayanımının iyi olması sebebiyle çelik halat ve tel iletiminde, asansör ve teleferiklerde makara ve kasnak olarak kullanılmaktadır. Hafif, darbe ve korozyon dayanımının yüksek olması sebebiyle çeşitli makine parçalarında metal malzemelerin yerine kullanılmaktadır, araba tekerlekleri, manifoldlar gibi parçalarda da kullanılmaktadır. Sessiz ve yağlamaya gerek duymadan çalışması ve darbe dayanımının yüksek olması sebebiyle makinenin darbesiz çalışmasını sağlayarak mekanik hareket iletiminde dişli çark olarak kullanılmaktadır. Aşınma dayanımının iyi olması ve düşük sürtünme katsayısı sebebiyle yağlamaya ihtiyaç duymadığı ve darbesiz çalışma imkanı sağladığı, bakım istemediği ve kolay montaj edilebildiği için yatak ve burçlarda kullanılmaktadır (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; Şimşek, 2020).



Şekil 3.27. Kestamid malzeme kullanım alanları a) hadde yatak ve kızaklarında, b) makara ve kaskaklarda, c) çeşitli makine parçalarında, d) yatak ve burçlarda, e) dişli çarklarda (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; <https://www.polikim.com.tr/>; http://www.turmetaldisli.com/?attachment_id=1208)

İçeriğinde yağlayıcı olmayan kuru kestamidlerin metallere göre sürtünme kuvveti daha düşük olup daha da azaltılarak dışarıdan bir yağ eklenmesine ihtiyaç duyulmadan kendi kendini sürekli yağlayabilmesi dolayısıyla da makine parçalarının çalışma ömrünün uzaması için içerisine farklı yağlayıcı katkıları eklenebilmektedir (Turgut, 2012).

3.2.3. Kestoil Malzeme

Üretilirken kestamidin bünyesine çeşitli yağlayıcı, darbe ve aşınma dayanımını artırıcı katkıları eklenen, kestoil olarak adlandırılan, yağlayıcı katkısı malzemeye homojen olarak yayılmış olan yağlayıcı dolgu döküm poliamid sürtünme katsayısı düşük olan, kendinden yağlamalı, korozyon dayanımı yüksek, aşınma ve darbe dayanımı yüksek olan, yağlamasız yataklar ve kızaklar için tercih edilen, standart rengi yeşil olan ve kestamide göre aşınma direnci 4 kat daha yüksek olan bir malzemedir (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; <https://www.polikim.com.tr/>). Şekil 3.28’de kestoil malzeme gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Kestoil malzeme (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; <https://www.polikim.com.tr/>)

Malzemeler kendinden yağlamalı olmadığında sürtünmeyi azaltmak amacıyla dışardan yağlama yapılır ama yağ azaldığı veya tamamen yok olduğu durumlarda sürtünmeden dolayı ısı meydana gelerek aşınmayı artırır ve bu durum malzeme ömrünü azaltır. Kestoilin kendinden yağlamalı olması sayesinde sürtünme katsayısı düşüktür dolayısıyla sürtünme esnasında ısı oluşumunu engeller (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; <https://www.polikim.com.tr/>).

Kestamid malzemelerin olumsuz etkilendiği uygulama alanları olan sulu ortamlarda nem alma ve ölçü stabilitesi bakımından kestoil ve kestlubun yağlayıcı katkılarının porlara yerleşmesi sayesinde rutubet ve su alması kestamide göre daha az olur ve ölçülerde tutarlılık sağlaması sebebiyle bu tür uygulama alanlarında kestamid yerine tercih edilerek sulu ortamlarda yüksek performans sergilemektedirler. Fakat büyük yük ve basınçların olduğu yataklama uygulamalarında sıvı yağlayıcı katkılı olan kestoilin sıvı yağlayıcı katkısının dışarı çıkması meydana gelebileceğinden bu tarz uygulamalarda katı yağlayıcı içeren kestlubun tercih edilmesi daha uygun olmaktadır (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>; <https://www.polikim.com.tr/>).

3.2.4. Kestlub Malzeme

Kestamide farklı proseslerle katkı maddeleri eklenmesi ile elde edilen, yağlayıcı dolgu döküm poliamid olan kestlub yüksek korozyon direncine sahip, sürtünme katsayısının düşük olması gereken, yüksek aşınma dayanımı gereken büyük yük ve basınçlar için tercih edilen özellikle yataklamalarda yüksek performans sergileyen, standart rengi kırmızı olan bir malzemedir (<https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>). Şekil 3.29’da kestlub malzeme gösterilmektedir.



Şekil 3.29. Kestlub malzeme (<https://www.polikim.com.tr/>)

Kestamid malzemelerin olumsuz etkilendiği uygulama alanları olan sulu ortamlarda nem alma ve ölçü stabilitesi bakımından kestlubun yağlayıcı katkılarının porlara yerleşmesi sayesinde rutubet ve su alması kestamide göre daha az olur ve ölçülerde tutarlılık sağlaması sebebiyle bu tür uygulama alanlarında kestamid yerine tercih edilerek sulu ortamlarda yüksek performans sergilemektedir. Yağlayıcı katkıları malzemeyle bütünleşip bünyesine homojen olarak dağılmıştır, yüksek basınç ve yük içeren en zor koşullarda bile yağlayıcı katkısının katı olması sebebiyle malzemedan dışarı akamayarak diğer saf ve katkılı döküm poliamidler yerine tercih edilerek malzemenin kuru kalmasına izin vermez (<https://www.polikim.com.tr/>).

Tezi oluşturan deneyler döküm poliamid malzeme olan kestamid, kestoil ve kestlub malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.5'te PA 6 ve mevcut çalışmada kullanılan kestamid, kestoil ve kestlub döküm poliamid malzemelerin teknik değerleri gösterilmekte olup bir polimer için yüksek sayılabilecek bu değerler poliamid malzemelerin yaygın kullanımını açıklamaktadır (Turgut, 2012). Buradan anlaşıldığı üzere döküm poliamid malzemeler PA 6'ya göre daha sert, elastiklik modülleri daha yüksek olduğu için daha rijit, % kopma uzamaları ve sürtünme katsayıları daha düşük olup yağlayıcı katkıları olan kestoil ve kestlub malzemeler en düşük sürtünme katsayısına sahiptir ve döküm poliamidler daha düşük su emme davranışı gösterir.

Tablo 3.5. PA 6 ve mevcut çalışmada kullanılan kestamid, kestoil ve kestlub döküm poliamid malzemelerin teknik değerleri
(https://filizplastik.com.tr/_userfiles/dosyalar/urun/pa6-poliamid/pa6.pdf;
<https://www.polikim.com.tr/>)

	PA 6	Kestamid	Kestoil	Kestlub
Genel Özellikler				
Renk		Sarı	Yeşil	Kırmızı
Yoğunluk (g/cm ³)	1,13	1,15	1,14	1,15
Su emme (%)	9	7	5	5
Mekanik Özellikler				
Çekme Dayanımı (MPa)	-	83,357	73,550	78,453
Elastiklik Modülü (MPa)	3200	4000	4000	4000
Kopma Uzaması (%)	>70	>20	>30	>20
Basma Dayanımı (MPa)	-	93,163	93,163	93,163
Darbe Dayanımı (Charpy çentiksiz) (kJ/m ²)	Kırılma yok	Kırılma yok	Kırılma yok	Kırılma yok
Darbe Dayanımı (İzod, çentikli) (kJ/m ²)	6	5,6	6	6
Sürtünme Katsayısı	0,4	0,39	0,15	0,08
Sertlik (Shore D)	82	84	83	84
Termal Özellikler				
Erime Sıcaklığı (°C)	220	220	220	220

3.2.5. Literatürde Kestamid, Kestoil ve Kestlub Malzemeye İlgili Yapılan Çalışmalar

Güçlendirilmiş döküm poliamidin otomotiv jantı olarak kullanılabilirliğinin incelemesinin yapıldığı bir çalışmada (Şimşek, 2020) özel bir döküm makinesi ile

aktivatör, katalizör, mekanik iyileştirici ve ham maddenin bir araya getirildiği işlemler ile güçlendirilen döküm poliamidin mekanik davranışlarının tespit edilmesi için çeşitli mekanik deneyler gerçekleştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan jantlara göre hafiflik elde edildiği, bunun yakıt tüketiminde azalma sağlayacağı, metal malzemelere göre daha düşük mekanik dayanım gösterdiği fakat dinamik test sonuçlarında jant olarak kullanıldığında düşük araç hızları (70 km/h) için uygun olduğu, yüksek mekanik zorlamalara maruz kalmayan makine parçalarında güçlendirilmiş döküm poliamidin kullanılabileceği belirtilmiştir.

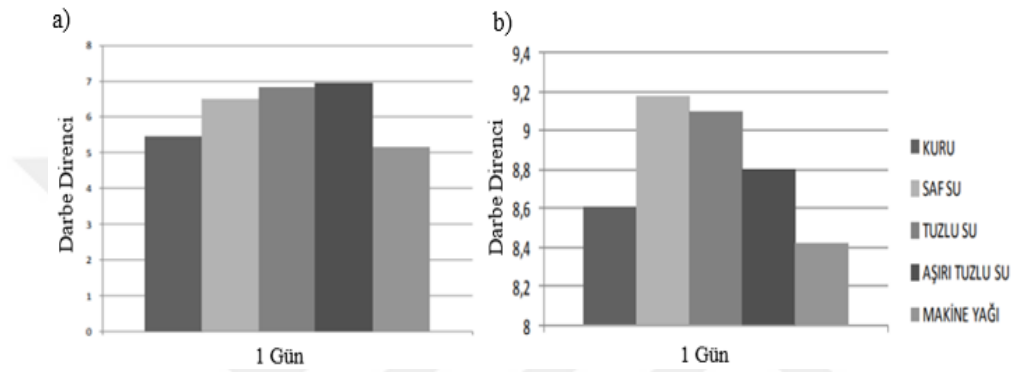
Bir yağlayıcı kullanılarak dökme poliamid 6'nın geri dönüştürülmesinin gerçekleştirildiği bir çalışmada (Formisano ve Bonten, 2019) döküm poliamidden yapılan parçalar üretilirken son işleme sebebiyle belli bir miktar atık madde oluşturarak yıllık atık hacminin yüksek olduğu ve bu yüksek kaliteli atığın ya enerji geri kazanımı için yakıldığı ya da moleküler ağırlığı artırılıp işlenmemiş poliamid 6'ya eklendiği fakat katkı maddesi ya da yanma malzemesi olarak kullanmasından ziyade bu döküm poliamid 6 atıkların geri dönüştürülmesinin ürün verimliliği açısından daha faydalı olacağı düşünülerek işlenebilirliği artırmak amacıyla polyester modifiyeli bir mumdan oluşan bir yağlayıcı katkı maddesi kullanılarak atık döküm poliamid ve farklı oranlarda yağlayıcının kuru karışımının ekstrüderde işlenmesiyle döküm poliamid 6'nın geri dönüştürülmesinin incelendiği çalışmada işlemeyle elde edilen döküm poliamid 6 döküntüleri yüksek moleküler ağırlıklı geri dönüştürülmüş döküm poliamid hale getirilmiş ve işlenmemiş döküm poliamid 6'ya göre çekme dayanımının daha yüksek olduğu, Young modülü, çekme dayanımı ve erime sıcaklığına yağlayıcı miktarının etki etmediği gözlemlenmiş fakat kristalinliği azaltması, moleküler ağırlığı artırması ve darbe dayanımında önemli derecede artış sağlaması sebebiyle çapraz bağlanmaya yardımcı olduğu dolayısıyla yüksek moleküler ağırlıklı poliamid sınıfı elde etmek için kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

Kestamid malzemeler birçok makine parçasının üretiminde kullanılan alüminyum, bronz, bakır vb. malzemelerin yerini almaya başlamış olup üstün özelliklerinin yanında kestamid malzemelerde nem çekme özelliğinin olması olumsuz etki yaratabilmektedir. Kestamid malzemeler depo/istif alanlarında bekletilirken bulundukları ortamın nem oranları dayanımlarını etkilemekte, özellikle nemin etkili olduğu dış ortam koşulları ve deniz

araçlarında kullanılan plastik malzemeler nemden etkilendiğinden mekanik özelliklerinde değişim meydana gelmektedir, nemin kestamid türü malzemelerde çekme mukavemeti üzerinde olumsuz etkisi bulunduğu bilinmekte, talaşlı imalat işlemi sırasında ve sonrasında nem çekmiş kestamid malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinde yaklaşık olarak %10-15 civarlarında değişimler olduğu bilinmektedir. Bu malzeme dişli çark, kaymalı yatak gibi hassas yüzey işleminin gerektiği uygulamalarda kullanıldığı takdirde nem faktörü hesaba katılmazsa yüzey pürüzlülüğü artabilir dolayısıyla kestamidden üretilen makine parçasının çalışma ömrü kısalabilmektedir. Bu sebeple poliamid türü malzemelerin nem alma durumu ve farklı ortam koşullarında mekanik özelliklerindeki değişimin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmektedir (Turgut, 2012).

Farklı türdeki sıvı ortamlarda bekletilen kestamid malzemelerin darbe dayanımı incelemesinin yapıldığı bir çalışmada (Turgut, 2012) kestamid malzemelerin günlük yaşıntıda bulunduğu yerlerde karşılaşılabileceği farklı ortamlardaki nem durumlarını yansıtmak amacıyla kullanılan saf su, tuzlu su (1000 g saf suya 35 g deniz tuzu katılarak oluşturulan karışım), aşırı tuzlu su (1000 g saf suya 90 g tuz katılarak oluşturulan karışım) ve makine yağı gibi farklı tür sıvı ortamlarda farklı sürelerde bekletilen kestamid ve onun kendinden yağlamalı türü olan kestoil malzemelerde nemin darbe dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiş, Şekil 3.30'da gösterilen verilerden kestamid malzemenin farklı tür sıvı ortamlarda bekletilmiş durumda izod darbe testindeki sonuçlardan saf su, tuzlu su ve aşırı tuzlu su ortamlarında bekletilen numunelerin kuru duruma göre darbe dayanımlarının artış göstererek sırasıyla en fazla darbe dayanımının genel olarak aşırı tuzlu su, tuzlu su ve saf suda bekletilen numunelerde meydana geldiği dolayısıyla kestamid malzemelerin deniz suyuna maruz kalacak yerlerde kullanıldığında darbeye karşı dirençlerinin daha fazla olacağı fakat makine yağında bekletilen numunelerin darbe dayanımlarının kuru durumdan daha düşük olduğu, kestoil malzemedde ise saf su, tuzlu su ve aşırı tuzlu su ortamlarında kuru duruma göre darbe dirençleri daha yüksekken sırasıyla en fazla darbe dayanımının genel olarak saf su, tuzlu su, aşırı tuzlu suda meydana geldiği ve makine yağının darbe direncini olumsuz etkileyerek kuru durumdan daha düşük darbe direnci elde edildiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan kestoilin darbe dayanımının kestamide göre daha yüksek olduğu fakat nemli ortam koşullarında kestamidin darbe dayanımında gözlenen artışın kestoilden daha fazla olduğunu gözlemek mümkündür.

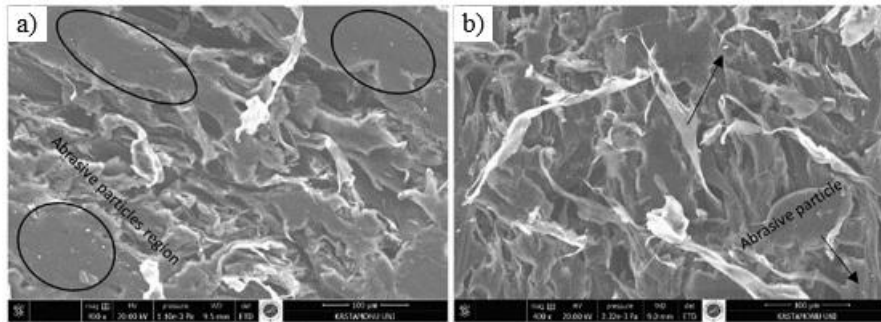
Nemli ortamlarda darbe kuvveti ile çalışacak makine parçası imalatında kestamid türü malzemelerin kullanımının uygun olacağı, nemin kestamid türü malzemelerde darbe dayanımında artış sağladığı gözlemlenmesine karşın çekme dayanımında azalma meydana getirdiği bilindiğinden tasarım ve imalat bu dengenin sağlanabilmesinin önem arz ettiği ve PA6G malzemeler ile üretilen makine parçalarının montajı sırasında darbe kuvvetlerine maruz kalarak zarara uğramaması amacıyla montaj öncesinde nemlendirilebileceği bildirilmiştir.



Şekil 3.30. Kuru numune ile 1 gün farklı ortamlarda bekletilen numunelerin darbe dirençlerinin karşılaştırılması a) kestamid malzeme, b) kestoil malzeme (Turgut, 2012)

Kestamidin işlenebilirliğini iyileştirmek için su altı aşındırıcı su jeti (AWJT) tornalama işleminin performansının değerlendirildiği bir çalışmada (İbrahim ve diğ., 2020) kestamidin işlenebilirliğini iyileştirmek için 80 mesh boyutunda garnet aşındırıcı partiküllerinin kullanılarak su altı aşındırıcı su jeti işleminin performansı değerlendirilmiş, yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek ve malzeme kaldırma oranını en üst düzeye çıkarmak için optimum test parametreleri belirlenmiş ve geleneksel aşındırıcı su jeti ile karşılaştırma yapılarak su altı aşındırıcı su jeti işlemi ile gürültü ve sıçrama problemlerinin azaltıldığı, kesme yüzeyinin temiz kaldığı, geleneksel AWJT işleminde nozul boyunca yüksek basınçta hareket eden su jetinin nozuldan ayrıldığında yüksek basınç bölgesinden düşük basınç bölgesine geçtiğinden su jetinin genişlemesine sebep olarak laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş yaptığı, bu durumun malzemeyi kesmek için kullanılan basınç değerini azalttığı ve Şekil 3.31a'da gösterildiği üzere, aşındırıcı partiküllerin kestamid malzemenin yüzeyine yapıştığı, yüksek sıcaklık nedeniyle kestamid malzemedede erime gerçekleşip malzemenin yüzey formu bozularak yüzey pürüzlülüğünün arttığı konvansiyonel talaşlı imalatla erimiş plastik malzemenin kesici alet tarafından malzemeye bulaştırıldığından kabul edilebilir yüzey kalitesinin elde

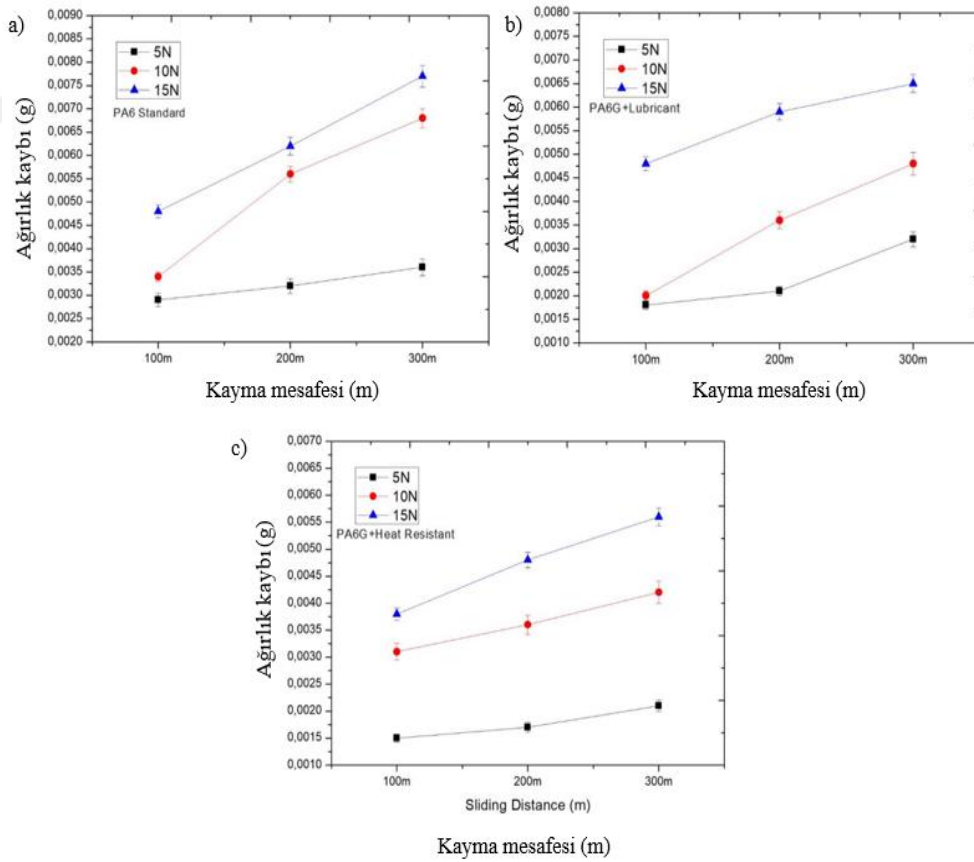
edilmesini zorlaştırarak Ra değerinin akış davranışının bozulmasından olumsuz etkilendiği fakat ısı etkisi oluşturmeyen su altı AWJT işleminde, yüksek basınca sahip su jetinin nozuldan ayrıldığında hidrostatik basınç sebebiyle genişlemesinin azaldığı ve kararlı bir kesme işlemi sağlandığı için Şekil 3.31b’de gösterildiği üzere, aşındırıcı parçacıkların malzeme yüzeyine daha kontrollü yayıldığı, buna ek olarak polimer malzemelerin yüzeyine partikül yapışmasının gözlenerek yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olduğu, fakat bu aşındırıcı partiküllerin suda frenlenerek daha fazla sürtünmeye maruz kaldığı ve enerjilerinde düşüş meydana geldiği su altı AWJT sisteminde daha düşük Ra pürüzlülük değeri elde edilerek kestamidin yüzey kalitesinde %15’lik bir artış olduğu fakat hidrostatik basıncın neden olduğu direnç nedeniyle malzeme kaldırma oranlarının daha az olduğu, kestamidin işlenebilirliğini geliştirmek için su altı AWJT sisteminin kullanılabileceği ve pahalı ikincil işlem sürecini azaltarak veya ortadan kaldırarak işletme maliyetlerini ve işlem süresini azaltacağı belirtilmiştir (İbrahim, 2020).



Şekil 3.31. Kestamid malzeme yüzey SEM görüntüleri a) konvansiyonel AWJT, b) su altı AWJT (İbrahim ve diğ., 2020)

Saf, kendinden yağlamalı ve ısıya dayanıklı döküm poliamid malzemelerin tribolojik davranışlarının incelendiği bir çalışmada (Can ve Tan, 2018) saf (standart PA 6) ve PA 6 standart döküm poliamid malzemeye grafit ve yağlayıcı katkıların eklenmesiyle elde edilen ısıya dayanıklı (PA6G+Isıya Dayanıklı) ve kendinden yağlamalı (PA6G+Yağlayıcı) döküm poliamid malzemelerin farklı deneysel parametreler ile kuru sürtünme koşulları altında pim-disk aşınma düzeneği üzerinde tribolojik davranışları incelenmiş, elde edilen verilerden Şekil 3.32’de belirtildiği üzere kayma mesafesi ve yükün bir fonksiyonu olarak numunelerin ağırlık kaybında meydana gelen değişimlerden aşınma koşullarının döküm poliamidlerin aşınma miktarlarına önemli ölçüde etkisi

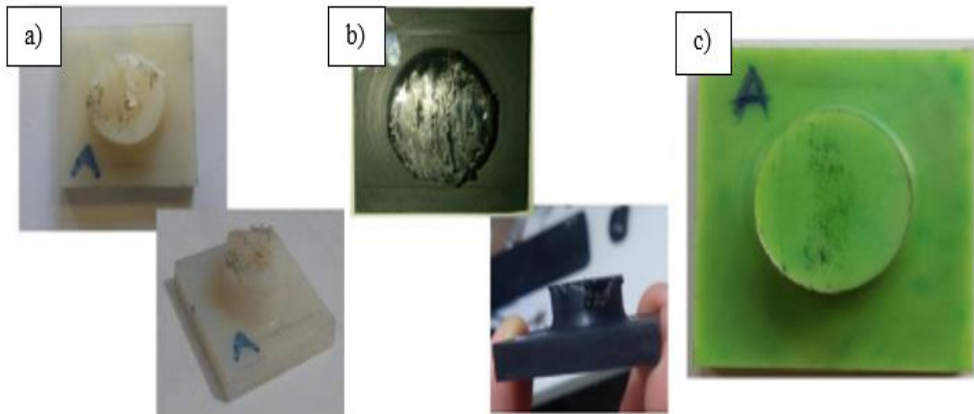
olduğu, en düşük aşınma direncinin diğer numunelere göre daha düşük sertliğe sahip olması ile açıklanarak PA 6 standart döküm poliamid numunesinde, en fazla aşınma direncinin diğer numunelere göre daha yüksek sertlik ve aşınma ara yüzeyindeki ısıya dayanıklı transfer filmi sebebiyle yüksek ısı direncine sahip olması ile açıklandığı PA6G+Isıya Dayanıklı numunesinde meydana geldiği dolayısıyla standart PA 6 numunesinden farklı olarak PA6G+Yağlayıcı ve PA6G+Isıya Dayanıklı numunelerinin içeriğindeki grafit ve yağlayıcı katkı maddelerinin aşınmayı azalttığı ve döküm poliamid malzeme çeşidinin sürtünme katsayısına doğrudan etkisi olduğu gözlemlenmiştir.



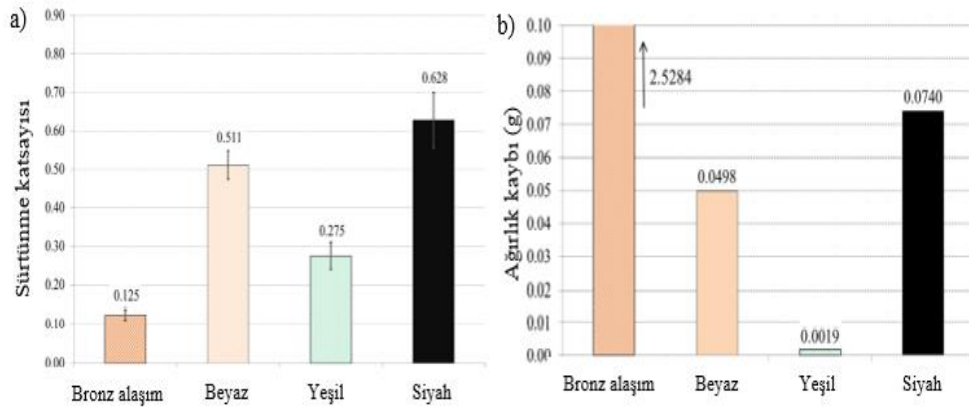
Şekil 3.32. Aşınma testlerinde numunelerin kayma mesafesi ve yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı değişimi a) standart PA 6, b) PA6G+Yağlayıcı, c) PA6G+Isıya Dayanıklı (Can ve Tan, 2018)

Poliamid 6 plastiklerin tribolojik davranışının incelendiği bir çalışmada (Neis ve diğ., 2017) doğal bir PA 6 polimeri (beyaz), molibden disülfid (MoS_2) ile doldurulmuş bir PA 6 (siyah) ve özel bir katı yağlayıcı ile doldurulmuş bir PA 6 (yeşil) olan üç döküm poliamid çeşidinin tribolojik özellikleri incelenmiş, endüstrideki potansiyel kullanımı araştırılmak için yatak burcu olarak kullanılan geleneksel bir bronz alaşımıyla

karşılaştırılmış, numuneler çelik bir diske karşı kaymaya tabi tutulmuş, yatak burcu olarak kullanılacak malzemenin sürtünme enerji tüketen bir kuvvet olduğundan düşük sürtünme seviyesine ve temasta meydana gelen sürtünme kararsızlığı ile gürültü ve titreşimin olmaması için sabit bir sürtünme seviyesine sahip olması, dolayısıyla sürtünme katsayısının düşük ve kararlı olması beklendiğinden sürtünme performansını sürtünmenin büyüklüğü ve kararlılığı ile belirlenerek elde edilen sonuçlara göre Şekil 3.33'ten görüldüğü üzere, doğal PA 6 ve MoS₂ dolgulu PA 6 numunelerinin yüzeyinde ciddi hasarlar meydana gelerek plastik olarak deforme olmuş ve pürüzlü olduğu, bunun MoS₂ dolgulu PA 6 numunelerindeki katı yağlayıcının aşınmayı azaltma etkisinin olmadığı, özel katı yağlayıcı ile doldurulmuş PA 6 numunesinin yüzeyinde ciddi bir hasar oluşmayıp katkı maddesi olarak kullanılan özel katı yağlayıcının sürtünme katsayısını düşürerek düşük aşınma meydana getirdiği, aşınma şiddetini azaltmada etkili olduğu dolayısıyla tüm döküm poliamid numunelerinin çok yakın mekanik özellikleri olduğu halde çok farklı tribolojik özellikler gösterdiği gözlemlenmiş, Şekil 3.34'ten döküm poliamid çeşitleri arasında özel katı yağlayıcı ile doldurulmuş PA 6 malzemesine eklenen dolgu maddelerinin yeterli formülasyonu sayesinde malzemenin sürtünme kararlılığının iyi olduğu ifade edilerek en düşük sürtünme katsayısı (COF) ve en yüksek aşınma direnci göstermesi dolayısıyla üstün tribolojik özelliklere sahip olup döner mil yataklı sistemin çalışma koşullarına dayandırılarak yapılan aşınma testleri neticesinde bu malzemenin endüstriyel uygulamalarda yatak burcu olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.33. Aşınma testinden sonra elde edilen aşınmış yüzeylerin dijital fotoğrafları a) doğal PA 6, b) MoS₂ dolgulu PA 6, c) özel katı yağlayıcı dolgulu PA 6 (Neis ve diğ., 2017)

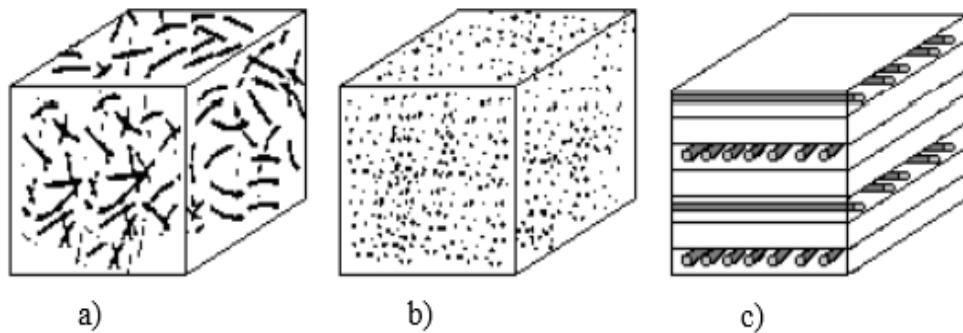


Şekil 3.34. Aşınma testleri sırasında her malzeme için ölçülen a) ortalama sürtünme katsayısı, b) ağırlık kaybı (Neis ve diğ., 2017)

4. KOMPOZİT MALZEME

Kompozit malzemeler kabaca birden fazla bileşenin makro seviyede birleştirilmesiyle oluşan, matris malzemesinin mekanik özelliklerini iyileştirmek, birleştirilen malzemelerin en iyi özelliklerini bir arada bulundurmak veya yeni özellik oluşturmak amacıyla içerisinde dolgu maddeleri, fiberler gibi çeşitli katkı maddeleri barındıran ve matris malzemesi, fiber ve diğer katkı maddelerinin özelliklerinden etkilenen malzeme çeşididir. Polimerlere karbon, cam, aramid gibi fiberlerin, parçacıkların veya MoS_2 gibi katı yağlayıcıların takviyesiyle elde edilen kompozitlerde bu katkı maddeleri ile tribolojik davranışların iyileştirildiği ve polimer esaslı kompozitlerin maliyetinde azalma gerçekleştirildiği bilinmektedir. Polimerlere yapılan karbon fiber takviyesi ile elde edilen polimer kompozitler yüksek modül, iyi aşınma direnci, düşük yoğunluk ve düşük sürtünme katsayısına sahipken ucuz bir alternatifi olan cam fiber takviyesi yapıldığında ise iyi mekanik mukavemet, yüksek kimyasal direnç, yüksek aşınma direnci gibi özelliklere sahiptir. Cam fiberlere nazaran daha pahalı olmasına karşın aramid fiberler (AF) ise düşük yoğunluk, mükemmel ısı, alev ve radyasyon direncine sahiptir (Kumar ve diğ., 2020; Yanatma, 2011).

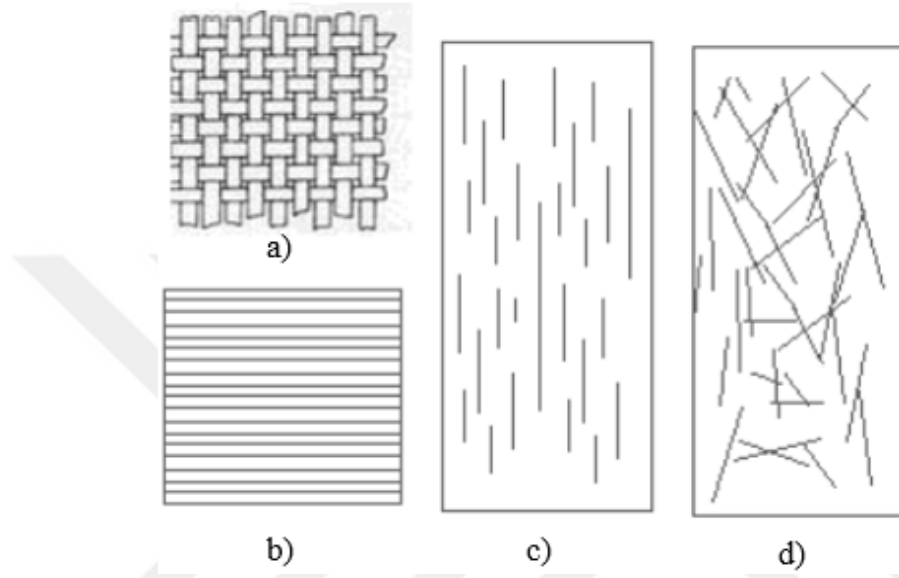
Bünyesinde birçok farklı malzeme barındırabilen kompozit malzemeler Şekil 4.1’de gösterildiği üzere takviye malzemelerinin cinsine göre sınıflandırılabilir (İpek, 2011).



Şekil 4.1. Kompozitlerin sınıflandırılması a) fiber takviyeli, b) partikül takviyeli, c) tabakalı (İpek, 2011)

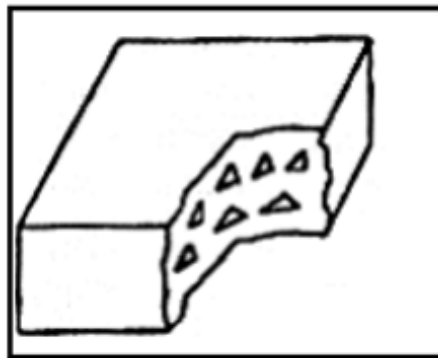
a) Fiber Takviyeli Kompozitler: Bu kompozit türünde fiberlerin matris bünyesinde bulunduğu konum mukavemetin belirlenmesinde etkili bir unsurdur, paralel olarak

yerleştirildiklerinde fiber doğrultusunda mukavemet değeri yüksek olurken fiberlere dik doğrultuda ise mukavemet değerleri düşük olur. İki doğrultuda yerleştirildiğinde de iki doğrultu için de eşit mukavemet değerleri elde edilir, homojen olarak dağıtılan fiberler ile izotropik bir yapı elde edilmesi mümkün olmaktadır (İpek, 2011). Şekil 4.2’de fiber takviyeli kompozitlerde fiber dizilimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Fiber takviyeli kompozitlerde fiber dizilimleri a) örgülü fiber takviyesi, b) sürekli fiber takviyesi, c) yönelmiş süreksiz fiber takviyesi, d) rastgele dağılmış süreksiz fiber takviyesi (İpek, 2011)

b) Partikül Takviyeli Kompozitler: Şekil 4.3’te şematik görseli gösterildiği üzere matris içerisinde partikül şeklindeki malzemelerin bulunduğu kompozit çeşidi olup izotropik yapıya sahiptirler. Mukavemetleri bünyesindeki partiküllerin sertliğine bağlı olarak değişim göstermektedir (İpek, 2011).



Şekil 4.3. Partikül takviyeli kompozit yapısını gösteren şematik görünüm (İpek, 2011)

c) Tabakalı Kompozitler: Farklı fiber oryantasyonlarına sahip tabakalardan oluşan bu kompozitler yüksek mukavemete sahip olarak metallere göre daha hafif olmaları sebebiyle tercih edilmektedir. Uçak yapılarında, kanat ve kuyruk bölgelerinde yüzeyde kaplama malzemesi olarak sürekli fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler kullanılmaktadır (İpek, 2011).

Kompozit malzemeler polimer esaslı kompozitler, metal esaslı kompozitler ve seramik esaslı kompozitler olmak üzere üç çeşit olup matris malzemesi, takviye elemanı ve katkı maddeleri olmak üzere üç ana materyalden oluşmaktadır (Yanatma, 2011). Bunlar;

a) Matris: Matris malzemesinin görevi fiberleri bir arada tutarak çevresel etkilerden korumak ve gelen yükü fiberlere dağıtmaktır. Kompozitler matris malzemesi metalse metal esaslı kompozit, seramikse seramik esaslı kompozit ve polimerse polimer esaslı kompozit olarak adlandırılır. Polimer kompozitlerde matris malzemesi olarak termosetlerde polyester, epoksi reçine ve fenolik reçinelerin kullanımı yaygınken termoplastiklerde ise poliamid ve polipropilen yaygın olarak kullanılmaktadır (Yanatma, 2011).

b) Takviye Elemanı: Takviye elemanı matris malzemesi tarafından çevrelenen, sert, korozyon direnci ve elastiklik modülü yüksek olan, kompozit malzemenin temel mukavemet bileşenidir. Kompozitlerde karbon, cam, aramid, grafit, boron malzemeleri kısa veya uzun fiber formlarında kullanılan takviye elemanlarıdır (Yanatma, 2011).

c) Katkı Maddesi: Matris malzemesinde olması istenen niteliklere uygun olarak dolgular, kimyasallar ve diğer katkıları eklenebilmektedir (Yanatma, 2011).

Matrise fiber takviye edilmesi ve partikül ile, yağlayıcı maddeler ile dolgu ve katkı maddeleri ilave edilerek oluşan çok bileşenli malzemelere hibrit kompozitler denilmektedir (Patnaik ve diğ., 2010).

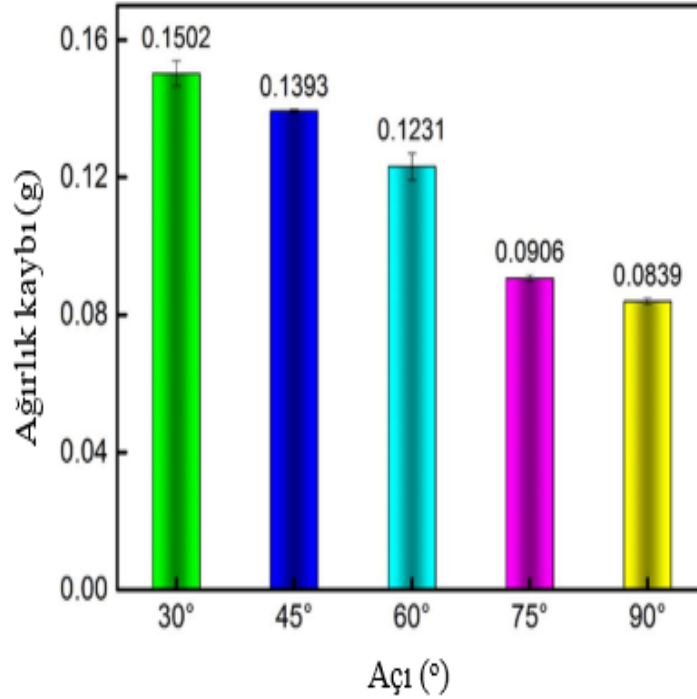
4.1. Kompozit Malzemelerde Katı Partikül Erozyonu

Havacılık ve mühendislik uygulamalarında son yıllarda yüksek performanslı termoplastik matris malzemelerine fiberlerin ilave edilmesiyle elde edilen kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır (Suresh ve diğ., 2009). Polimer matrisli kompozitlerin

monolitik metalik malzemelere göre yüksek özgül mukavemeti nedeniyle otomotiv, havacılık, rüzgar enerjisi, askeri, petrol ve gaz gibi çeşitli endüstrilerde kullanımı yaygındır (Öztürk ve diğ., 2019). Termoplastik esaslı kompozit malzemeler uçak endüstrisinde yüksek sertlik ve mukavemet, kırılmaya karşı yüksek gerilim ve düşük su emme gibi özellikleri sebebiyle epoksi kompozitler ve Al-Cu ve Al-Li alaşımları gibi malzemeler ile rekabet etmektedir (Suresh ve diğ., 2009). Kompozit malzemeler dayanıklılığın önem arz ettiği havacılık, ulaşım ve proses endüstrilerinde genellikle katı partikül erozyonuna uğrayan yapısal bileşenler olarak petrol arıtımında kum bulamaçları taşıyan boru hatları, helikopter rotor kanatları, pompa pervane kanatları, yüksek hızlı araçlar ve çöl ortamlarında çalışan uçaklar, su türbinleri ve uçak motorları gibi uygulamalarda katı partiküllerin darbesine maruz kalabildiği için katı partikül erozyonu davranışlarının incelenmesi önemlidir (Öztürk ve diğ., 2019). Kompozit malzemeler, takviye elemanının ilave edilmesiyle anizotropinin olduğu karmaşık yapıdaki malzemeler olup polimer matrisli kompozitlerde matrisin türü, özellikleri, fiber ve matris arasındaki arayüzey bağ kuvvetleri, takviye elemanının türü, özellikleri, yönü, miktarı gibi etkenler malzemenin erozyon davranışını önemli derecede etkiliyor olup metallere göre daha karmaşıktır ve polimer matrisli kompozitlerin metalik malzemelere göre erozyon direnci daha zayıftır (Cai ve diğ., 2015; Öztürk ve diğ., 2019; Patnaik ve diğ., 2010; Suresh ve diğ., 2009). Buna ek olarak katı partikül erozyonuyla elde edilen erozyon oranı hedef malzeme özellikleri, dolgu/fiber/matris malzeme kombinasyonları, aşındırıcı özellikleri, deneysel koşullar (çarpma açısı, aşındırıcı hızı, aşındırıcı akış hızı vb.) gibi çeşitli etmenlere bağlı olarak 30°, 45°, 60° ve 90° çarpma açılarında maksimum erozyonun gözlemlendiği dolayısıyla bu etmenlerin kombinasyonlarıyla maruz kalma koşullarına özgü sonuçların elde edildiği bilinmektedir (Harsha ve Thakre, 2007; Patnaik ve diğ., 2010; Rout ve Satapathy, 2013). Dik açılı çarpma durumunda mevcut enerjinin tümü darbe ve mikro çatlama için harcanırken eğik açılı çarpma durumunda ise parçacığın paralel hız bileşeninin etkisiyle sert aşındırıcı parçacıklar hedef malzeme yüzeyine nüfuz ederek mikro kesme ve mikro sürme aşınma mekanizmaları ile malzeme kaldırma meydana gelmektedir (Fouad ve diğ., 2011).

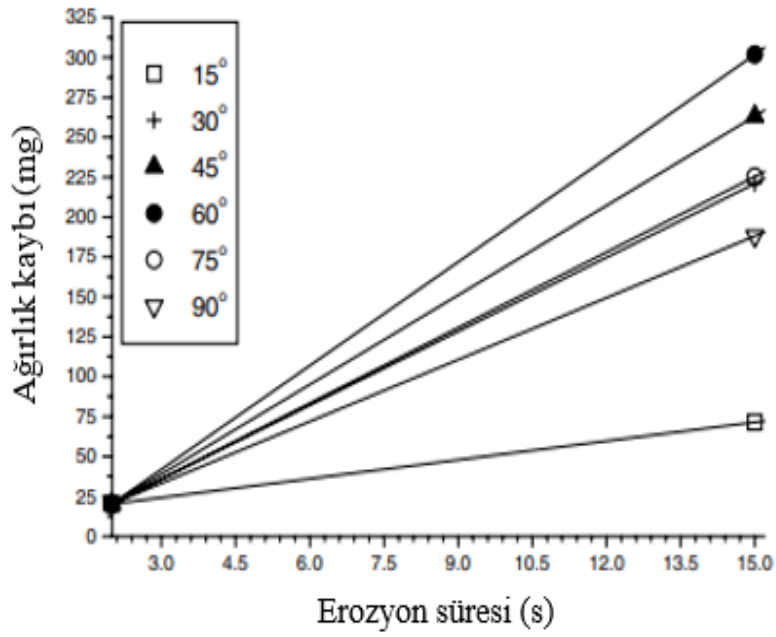
Katı partikül erozyonunun karbon fiber takviyeli polikarbonat kompozitlerin (CF/PC) mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada (Fang ve diğ., 2020) matris malzemesi olarak termoplastik polikarbonat kullanılan karbon fiber takviyeli

polikarbonat kompozitlerin farklı çarpma açıları (30°, 45°, 60°, 75° ve 90°), 2 dk maruz kalma süresi ve 30 mm nozul-numune mesafesinde katı partikül erozyon direnci incelenmiştir. Şekil 4.4'te gösterildiği üzere maksimum erozyonun 30° çarpma açısında meydana gelerek sünek erozyon davranışı sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. CF/PC kompozitinde çarpma açısına bağlı olarak meydana gelen ağırlık kayıpları (Fang ve diğ, 2020)

Polifenilen sülfid kompozitlerinin erozif aşınma davranışının incelendiği bir çalışmada (Sınmazçelik ve Taşkiran, 2007) rastgele yönlendirilmiş kısa cam fiber (ağırlıkça %40) ve CaCO_3 mineral partikül (ağırlıkça %25) takviyeli polifenilen sülfid kompozitlerinin farklı çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°), partikül hızları (20, 40 ve 60 m/s), ortalama boyutu 150-200 μm ve kütleli debisi 9 g/s olan silis kumu ile 4,5 bar basınçta katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 4.5'ten görüldüğü üzere sünek malzeme olan PPS matrisine kırılmalı kısa cam fiber takviye edilmesi ile meydana gelen PPS kompozitinin yarı kırılmalı yapısı sebebiyle maksimum erozyon oranının 60° çarpma açısında gerçekleşerek yarı sünek erozyon davranışı gösterdiği ve 60° çarpma açısında aşındırıcı deformasyon (mikro kesme, mikro sürme vb.) ve darbe deformasyon erozyon mekanizmaları olduğu fakat dik açıya daha yakın olduğu için çarpma kuvvetinin darbeden sorumlu olan dikey bileşeni sebebiyle darbe davranışının daha baskın olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



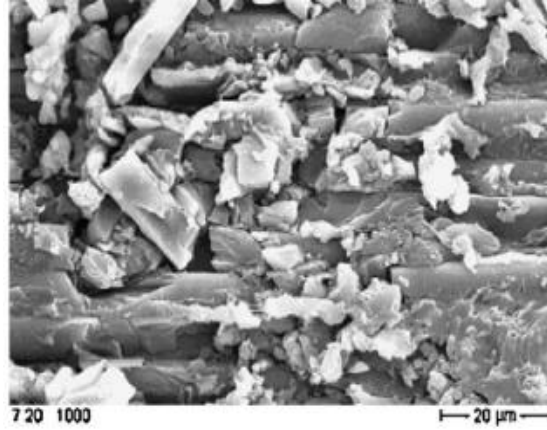
Şekil 4.5. Farklı çarpma açılarında erozyon süresinin bir fonksiyonu olarak PPS kompozitinin ağırlık kaybı ($v = 60$ m/s) (Sınmazçelik ve Taşkiran, 2007)

Fiber takviyeli kompozitlerin katı partikül erozyonunda sırasıyla şu durumlar gözlenmektedir:

(i) Kompozit malzemelerde matris malzemesi takviye elemanını çevrelediği için korur ve yüzey erozyonu sırasında ilk olarak kaldırılan kısımdır (Cai ve diğ., 2015). Matris malzemesi olan reçinenin bölgesel olarak hedef malzemeden uzaklaştırılması meydana gelir. İlk hasar matrisin kaldırılmasıyla gerçekleştiğinden kompozit malzemelerde aşınma direncini sağlamak için reçinenin önemi büyüktür (Patnaik ve diğ., 2010).

Tek yönlü fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin katı partikül erozyonu ile ilgili yapılan bir çalışmada (Suresh ve diğ., 2009) tek yönlü fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin farklı çarpma açıları (15° , 30° , 60° , 90°), çarpma hızları (25, 37, 50, 66 m/s), 10 mm nozul-numune mesafesinde, oda sıcaklığında, 200 ± 50 μ m boyutunda köşeli silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.6'dan karbon fiber takviyeli PEEK (CF/PEEK) kompozitinin katı partikül erozyonu SEM görüntüsünde fiberleri örten matris tabakasının 60° çarpma açısıyla gelen aşındırıcı partiküllerin sahip olduğu teğetsel hız bileşeniyle (F_t) kolayca kaldırılarak fiberlerin erozyon ortamına maruz kalması görülmektedir (Suresh ve diğ., 2009).

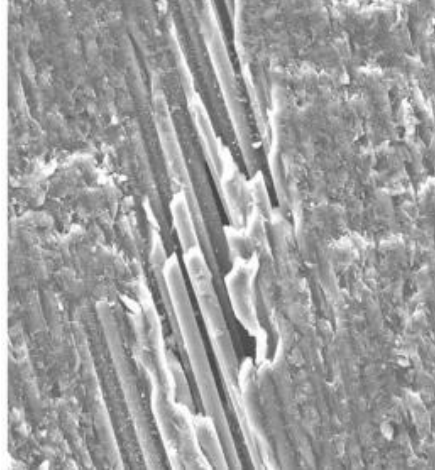


Şekil 4.6. 60° çarpma açısında, karbon fiber takviyeli PEEK (CF/PEEK) kompozit numunesinin matrisin kaldırıldığı erozyon hasarının SEM görüntüsü (Suresh ve diğ., 2009)

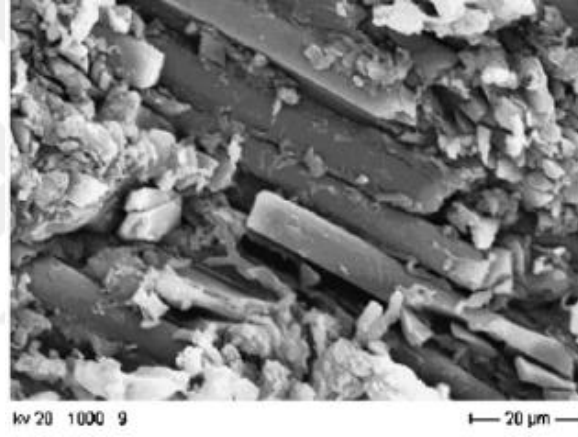
(ii) Matrisin çıkarılmasıyla açığa çıkan fiberlerin katı partikül erozyonuna maruz kalarak kırılması meydana gelir, literatürde yapılmış olan çalışmalardan karbon fiber epoksi kompozit ve saf titanyumun katı partikül erozyonu davranışlarının incelendiği bir çalışmada (Cai ve diğ., 2015) Şekil 4.7’de karbon fiber epoksi kompozitin ve tek yönlü fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Suresh ve diğ., 2009) Şekil 4.8’den karbon fiber takviyeli PEKK (CF/PEKK) kompozitin katı partikül erozyonu SEM görüntüsünde matris malzemesi kaldırıldıktan sonra açığa çıkan fiberler görülmektedir.

Şekil 4.9’da ise (Suresh ve diğ., 2009) cam fiber takviyeli PEEK (GF/PEEK) kompozitin katı partikül erozyonu SEM görüntüsünde açıkta kalan fiberlerin kırılarak ortamdan uzaklaştırıldığı ve lokal olarak çıkarıldığı görülmektedir. Bu sebeple kompozit malzemelerde fiberlerin tokluğu erozyonu doğrudan etkilemektedir. Burada fiber takviyesinin etkisi fiber malzemesi, fiber içeriği, takviye tipi (uzunluk, çap vb.) ve fiber yönüne bağlı olarak değişim göstermektedir (Patnaik ve diğ., 2010).

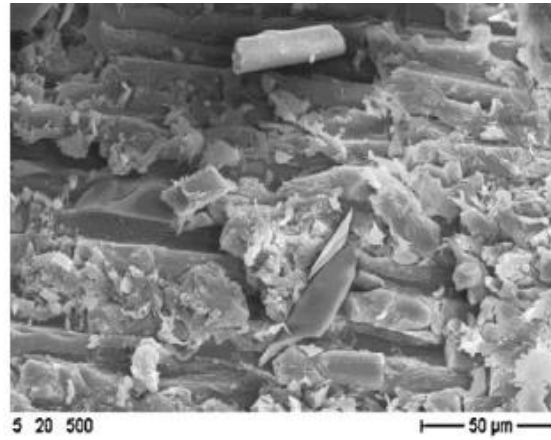
(iii) Açıkta kalan fiberlerin aşınmasıyla fiberler ve matris arayüzeyinde de aşınma meydana gelerek fiberler matristen ayrılır (Cai ve diğ., 2015). Burada malzemelerin en güçlü arayüz kuvvetine sahip olması erozyon direncini artırır (Patnaik ve diğ., 2010). Kompozit malzemelerde matris malzemesinin türüne bağlı olarak genelde termoplastik kompozitlerde sünek, termoset kompozitlerde ise kırılgan erozyon davranışları gözlenmektedir (Arjula ve Harsha, 2006).



Şekil 4.7. 15° çarpma açısında, x500 büyütmede karbon fiber epoksi kompozit numunesinin fiberlerin açığa çıktığı erozyon hasarının SEM görüntüsü (Cai ve diğ., 2015)



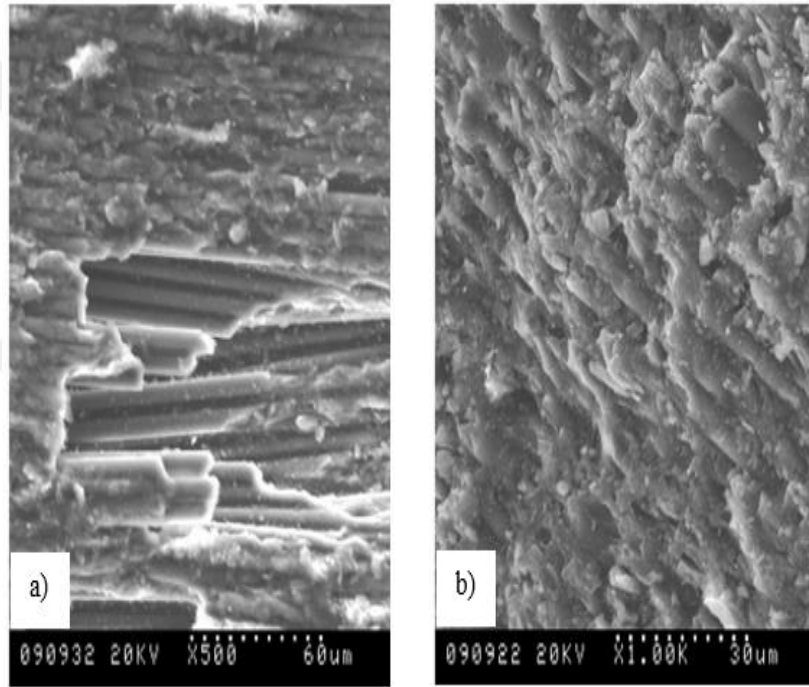
Şekil 4.8. 90° çarpma açısında, karbon fiber takviyeli PEKK (CF/PEKK) kompozit numunesinin fiberlerin açığa çıktığı erozyon hasarının SEM görüntüsü (Suresh ve diğ., 2009)



Şekil 4.9. 60° çarpma açısında, cam fiber takviyeli PEEK (GF/PEEK) kompozit numunesinde açıkta kalan fiberlerin kırılarak ortamdan uzaklaştırıldığı ve lokal olarak çıkarıldığı erozyon hasarının SEM görüntüsü (Suresh ve diğ., 2009)

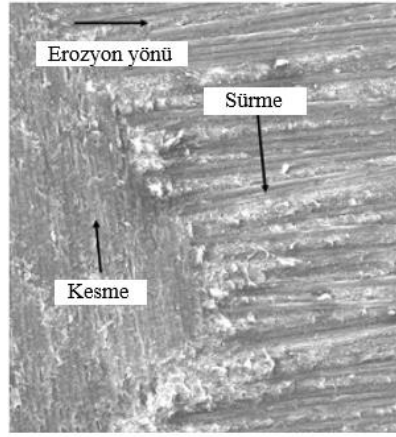
Karbon fiber epoksi kompozit ve saf titanyumun katı partikül erozyonu davranışlarının incelendiği bir çalışmada (Cai ve diğ., 2015) karbon fiber epoksi kompozitin katı partikül erozyonu SEM görüntüsünde termoset matrisli kompozitlerde gevrek erozyon davranışları görülmesinin bir kanıtı olarak Şekil 4.7’de görüldüğü üzere 15° gibi düşük bir çarpma açısında fiberler hala matriste yerlerinde bulunduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.10a ve Şekil 4.10b’de görülen, fiberlerin sürekli erozyon ortamına maruz kalmasıyla ve çarpma açısındaki artışla matriste gevrek kırılma, fiberlerin incelmesi ve fiber ile matris arasındaki bağlarda ayrılma, fiberlerin yerinden çıkarılması ve fiberlerde kırılma meydana geldiği gözlemlenmiştir (Cai ve diğ., 2015).



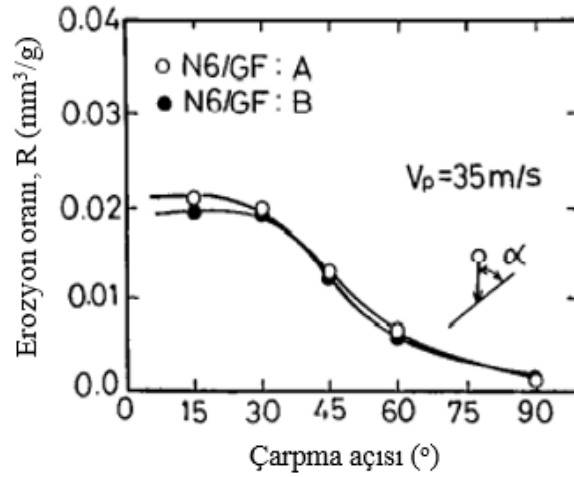
Şekil 4.10. Karbon fiber epoksi kompozit numunesinin erozyon hasarının SEM görüntüsü a) 45° çarpma açısında, x500 büyütmede b) 45° çarpma açısında, x1000 büyütmede (Cai ve diğ., 2015)

Dokuma kompozit malzemelerde Şekil 4.11’de belirtildiği üzere aşındırıcı partiküllerin geliş yönüne paralel olan fiberlerde sürme ve aşındırıcı partiküllerin geliş yönüne dik olan fiberlerde ise fiberlerin kesilmesi ile erozyon mekanizmaları meydana geldiği ve aşındırıcı partiküllerin geliş yönüne dik olan fiberlerde darbe yönü boyunca olan fiberlere göre daha fazla erozyon meydana geldiği, bu durumun eşit olmayan bir aşınma meydana getirdiği bildirilmiştir (Cai ve diğ., 2015).



Şekil 4.11. 15° çarpma açısında, x200 büyütmede karbon fiber epoksi kompozit numunesinin erozyon hasarının SEM görüntüsü (Cai ve diğ., 2015)

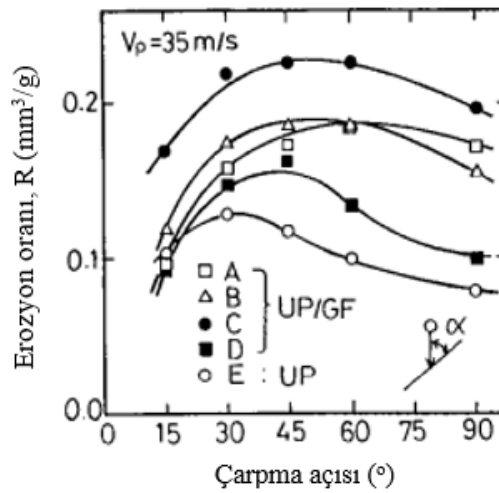
Fiber takviyeli plastiklerin katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Miyazaki ve Takeda, 1993) kısa cam veya karbon fiber takviyeli termoplastik reçine olan N6 ile dokuma cam bezlerle takviye edilmiş termoset reçine olan doymamış polyester (UP) malzemeye farklı çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 90°) ve 18 m/s'den 47 m/s'ye değişen çarpma hızlarında, 100-150 µm boyutunda SiC aşındırıcı partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, elde edilen verilerden N6/GF (cam fiber takviyeli naylon 6) kompozit numunelerden fiber yüzeyleri işlenmemiş olan A numunesi ile fiber yüzeyleri silan bağlama maddesi işlenmiş olan B numunesi kullanılarak matris malzemesi ve fiberler arasındaki arayüz kuvvetinin katı partikül erozyonuna etkisi incelenmiş ve B malzemesinin fiber yüzeyinin işlenmesinden dolayı matris ile fiberler arasında A malzemesinden daha güçlü arayüz bağına sahip olması sebebiyle çekme mukavemetinin de daha yüksek olup Şekil 4.12'de belirtildiği üzere daha iyi erozyon direnci gösterdiği, Tablo 4.1'de verilen malzeme özelliklerinde üç nokta eğilme mukavemetinin matris malzemesi ve fiberler arasındaki arayüz mukavemetinin bir göstergesi olarak kullanıldığı yaklaşık olarak aynı fiber ağırlığı içeriğine sahip ancak fiberlere farklı yüzey işlemleri uygulanan takviyeli UP kompozitlerinde (A, B ve C) Şekil 4.13'te gösterildiği üzere, matris malzemesi ve fiberler arasındaki arayüz kuvvetinin artmasıyla erozyon oranlarının azaldığı, A, D ve E malzemeleri kıyaslanarak fiber ağırlığı içeriğinin artmasıyla erozyon oranının arttığı, kırılma fiberlerin dahil edilmesi nedeniyle kompozitlerin saf reçineden daha kırılma hale gelerek erozyon oranlarının daha fazla olduğu, saf reçineye cam fiber takviyesiyle tepe erozyon oranlarının daha büyük bir çarpma açısına kaydığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12. Fiber yüzeylerinin işlenmemiş (N6/GF FRP: A) ve işlenmiş (N6/GF FRP: B) olduğu durumda N6/GF kompozitlerinin çarpma açısına bağlı erozyon oranları (Miyazaki ve Takeda, 1993)

Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan farklı fiber yüzey işlemlerine sahip UP/GF kompozitlerinin özellikleri (Miyazaki ve Takeda, 1993)

Malzeme Sembolü	Fiber Yüzey İşlemi	Fiber Ağırlık İçeriği (%)	Yoğunluk (g/cm³)	3- Nokta Eğilme Mukavemeti (MPa)
A	Akrilik silan	60,4	1,79	556
B	Krom	60,3	1,80	446
C	-	58,2	1,75	374
D	Akrilik silan	44,5	1,61	387
E (saf reçine)	-	-	1,22	-



Şekil 4.13. Fiber yüzeylerinin işlenme durumu ve fiber ağırlık içeriğine bağlı olarak UP termoset reçinesi ve onun kompozitlerinin çarpma açısına göre erozyon oranları (Miyazaki ve Takeda, 1993)

Katı partikül erozyonuyla meydana gelen erozyon oranlarının hangi açıda maksimum olacağı malzemelere bağlı olarak farklılık gösterir. Bu bağlamda genel olarak polimerler gibi sünek malzemeler 15° - 30° 'lik düşük çarpma açılarında, gevrek malzemeler 90° gibi yüksek açılarda en fazla aşınmaya uğrarken kompozitler ise maksimum aşınması 15° ile 90° aralığında gerçekleşen karmaşık bir davranış gösterir (Kumar ve diğ., 2020).

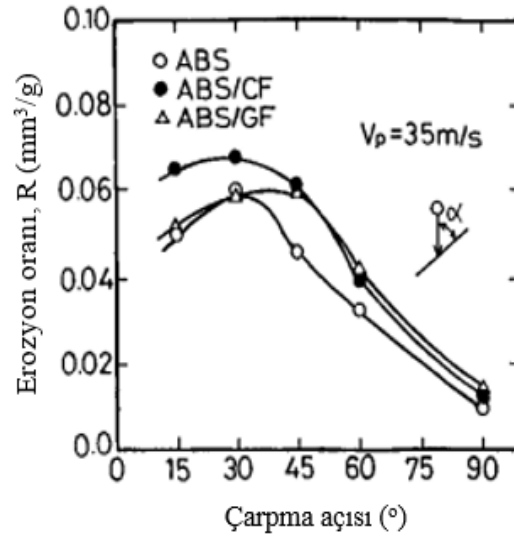
Genel olarak kırılğan fiberlerin sünek matrise takviyesiyle maksimum erozyonun gözlemlendiği açıyı daha yüksek tarafa kaydırıldığı ifade edilir (Suresh ve diğ., 2009).

Daha önce yapılmış olan araştırmalar polimer matrisli kompozitlerin saf polimer malzemelere göre, tek yönlü fiber takviyeli kompozitlerin ise kısa fiber takviyeli kompozitlere göre daha zayıf erozyon direnci gösterdiğini ifade etmektedir (Arjula ve diğ., 2008; Cai ve diğ., 2015; Suresh ve diğ., 2009).

Metaller ile kıyaslandığında erozyon dirençleri iki veya üç kat daha düşük olan polimer matrisli kompozitlerde polimer malzemelere takviye fiber veya dolgu maddeleri eklenerek mekanik özellikleri iyileştirilmeye çalışılır, bu takviyeler genel olarak erozyon direncini kötüleştirmektedir fakat ikincil takviyeler olarak partikül dolgu maddeleri eklenerek erozyon oranlarının azaltılması da amaçlanabilmektedir (Nayak ve diğ., 2021). Dolayısıyla polimer malzemeler ve onların kompozitlerinde mekanik özelliklerdeki değişim aşınma miktarlarını önemli oranda etkilemektedir (Harsha ve Thakre, 2007; Patnaik ve diğ., 2010).

Fiber takviyeli plastiklerin katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Miyazaki ve Takeda, 1993) kısa cam veya karbon fiber takviyeli termoplastik reçine olan ABS reçinesine (ABS/GF ve ABS/CF) farklı çarpma açıları (15° , 30° , 45° , 60° , 90°) ve 18 m/s'den 47 m/s'ye değişen çarpma hızlarında, 100-150 μ m boyutunda SiC aşındırıcı partikülleri kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen verilerden Şekil 4.14'e bakıldığında saf ABS termoplastik reçinenin erozyon oranının karbon ve cam fiber takviyesiyle arttığı ve maksimum erozyonun meydana geldiği açının daha yüksek bir açıya kaydığı gözlemlenmiştir (Miyazaki ve Takeda, 1993).



Şekil 4.14. ABS termoplastik polimer ve onun takviyeli kompozitlerinin çarpma açısına bağlı erozyon oranları (Miyazaki ve Takeda, 1993)

Kompozit malzemelerde matris malzemesinin türüne bağlı olarak genelde termoplastik matrisli kompozitlerde sünek (plastik deformasyon, sürme ve sünek yırtılma), termoset matrisli kompozitlerde ise kırılgan (yüzey yanal çatlaklarının oluşumu ve yayılması) erozyon davranışları gözlenmektedir (Arjula ve Harsha, 2006; Barkoula ve diğ., 2001; Fouad ve diğ., 2011; Nayak ve diğ., 2021). Fakat kompozit malzemelerin erozyon davranışını deneysel koşullar ve hedef malzemenin bileşimi önemli ölçüde etkilediğinden bu sınıflandırma mutlak değildir (Fouad ve diğ., 2011). Kompozit malzemelerin erozyon davranışını etkileyen etmenlere bakıldığında matrise fiber takviye edilmesi ile elde edilen kompozit malzemeler takviyesiz matrislere kıyasla kırılgan fiberlerinin varlığı sebebiyle özellikle de termoplastik matris kullanılırsa ve fiber içeriği ne kadar fazla olursa matrisin erozyon direncini düşürmektedir. Takviye tipinin erozyona etkisine bakıldığında kısa fiber takviyeli kompozit malzemelerin uzun-sürekli fiber takviyeli kompozitlere göre erozyon direnci daha iyi olmaktadır. Fiber ve matris yapışmasının iyi olması erozyon direncini de iyileştirmektedir. Bunların yanı sıra parçacık hızı, çarpma açısı gibi deneysel koşul parametreleri birbirinden ayırt edilmesi ve kompozitlerde bulunan karmaşık hedef malzeme özellikleri gibi diğer parametrelerden izole edilerek sonuca bağlanması zor olduğu için kompozit malzemelerin erozyonu üzerinde kesin bir eğilim göstermemektedir (Patnaik ve diğ., 2010).

Polimerlerin erozyon verimliliğinin incelendiği bir çalışmada (Arjula ve Harsha, 2006) polimer ve polimerik kompozitlerin erozyon oranı ve erozyon verimliliğine ilişkin

literatürdeki bazı çalışmalardan elde edilen verilerden bazıları Tablo 4.2’de listelenmiştir. Buradan da görüldüğü üzere genellikle saf polimerlere göre polimerik kompozitlerin erozyon oranları daha fazla olmaktadır, polimerik kompozitlerde kırılğan fiberlerin varlığı sebebiyle erozyon verimliliğinin saf polimerlere göre daha yüksek olduğu, fiber ve yağlayıcı dolgu içeriği arttıkça erozyon oranının da arttığı anlaşılmaktadır (Arjula ve Harsha, 2006).

Tablo 4.2. Polimerlerin ve polimerik kompozitlerin erozyon oranlarına ilişkin bazı veriler (Arjula ve Harsha, 2006)

Malzeme	Parçacık hızı (v) (m/s)	Erozyon oranı (m ³ /kg)	Erozyon verimliliği (%)
PEEK	39	5,45 x 10 ⁻⁹	0,22
	68	1,50 x 10 ⁻⁸	0,20
	90	3,27 x 10 ⁻⁸	0,25
PEEK + %20 GF	39	0,96 x 10 ⁻⁸	0,48
	68	2,18 x 10 ⁻⁸	0,36
	90	4,76 x 10 ⁻⁸	0,44
PEEK + %30 GF	39	1,25 x 10 ⁻⁸	0,66
	68	2,82 x 10 ⁻⁸	0,49
	90	0,72 x 10 ⁻⁷	0,71
PEEK + %30 CF	39	1,46 x 10 ⁻⁸	0,71
	68	3,68 x 10 ⁻⁸	0,11
	90	1,06 x 10 ⁻⁷	0,97
PEK	39	4,92 x 10 ⁻⁹	0,22
	68	1,62 x 10 ⁻⁸	0,23
	90	4,22 x 10 ⁻⁸	0,35
PEK+ %10 GF	39	6,23 x 10 ⁻⁹	0,28
	68	2,00 x 10 ⁻⁸	0,30
	90	5,37 x 10 ⁻⁸	0,46
PEK+ %20 GF	39	0,83 x 10 ⁻⁸	0,42
	68	2,13 x 10 ⁻⁸	0,36
	90	5,49 x 10 ⁻⁸	0,53
PEK+ %30 GF	39	1,04 x 10 ⁻⁸	0,59
	68	3,01 x 10 ⁻⁸	0,56
	90	0,69 x 10 ⁻⁷	0,73
PEKK	39	1,05 x 10 ⁻⁸	0,45
	68	2,29 x 10 ⁻⁸	0,33
	90	4,37 x 10 ⁻⁸	0,35
PEKK+ %30 CF	39	1,82 x 10 ⁻⁸	1,20
	68	6,76 x 10 ⁻⁸	1,45
	90	1,96 x 10 ⁻⁷	2,40

Tablo 4.2. (Devam) Polimerlerin ve polimerik kompozitlerin erozyon oranlarına ilişkin bazı veriler (Arjula ve Harsha, 2006)

Malzeme	Parçacık hızı (v) (m/s)	Erozyon oranı (m ³ /kg)	Erozyon verimliliği (%)
PEI	30	6,69 x 10 ⁻⁹	0,65
	52	6,69 x 10 ⁻⁹	0,21
	60	4,02 x 10 ⁻⁸	0,92
	88	7,37 x 10 ⁻⁸	0,8
PEI+ %40 GF	30	1,32 x 10 ⁻⁸	1,68
	52	2,11 x 10 ⁻⁸	0,49
	60	6,07 x 10 ⁻⁸	1,15
	88	1,43 x 10 ⁻⁷	2,02
PEI+ %25 GF+ %15 PTFE+ %15 (MoS ₂ + grafit fiber)	30	1,14 x 10 ⁻⁷	7,70
	52	2,05 x 10 ⁻⁷	4,50
	60	2,61 x 10 ⁻⁷	4,10
	88	4,03 x 10 ⁻⁷	3,05

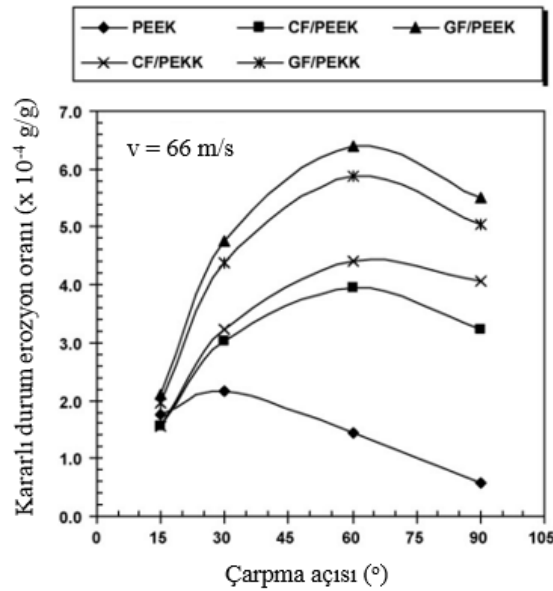
Aynı zamanda yapılan bu çalışmada (Arjula ve Harsha, 2006) literatürde çalışılmış olan bazı kompozitlerin aşınma mekanizmalarına ilişkin elde edilen verilerden bazıları Tablo 4.3'te listelenmiştir.

Tablo 4.3. Literatürde bildirilen bazı kompozitlerin malzeme kaldırma mekanizmaları (Arjula ve Harsha, 2006; Tewari ve diğ., 2002; Zahavi ve Schmitt, 1981)

Malzeme	Tepe Erozyon Açısı (α, °)	Çarpma Açısı (α, °)	Aşınma mekanizmaları
TPI+ %15, %30 GF	40	60	Hedef malzemeden mikro kesme ve plastik deformasyonlar ile pullar çıkarılmıştır.
PEEK+% 20 GF	30	90	Dik açılı çarpma mikro çatlama baskın aşınma mekanizması olarak gözlenmiştir.
PEEK+% 30 GF	60	90	
Cam-epoksi	45-60	90	Reçine ve fiber tabakalarında erozyon hasarı görülmüştür.
PEEK- tek yönlü %65 CF	60	15	Matrisin kaldırılması ve bununla birlikte açığa çıkan fiberlerin çatlaması ve kırılması ile erozyon gerçekleşmiştir.

Tek yönlü fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin katı partikül erozyonu ile ilgili yapılan bir çalışmada (Suresh ve diğ., 2009) saf PEEK polimer malzemesinin, tek yönlü cam fiber (GF) takviyeli PEEK, karbon fiber (CF) takviyeli PEEK, cam fiber takviyeli

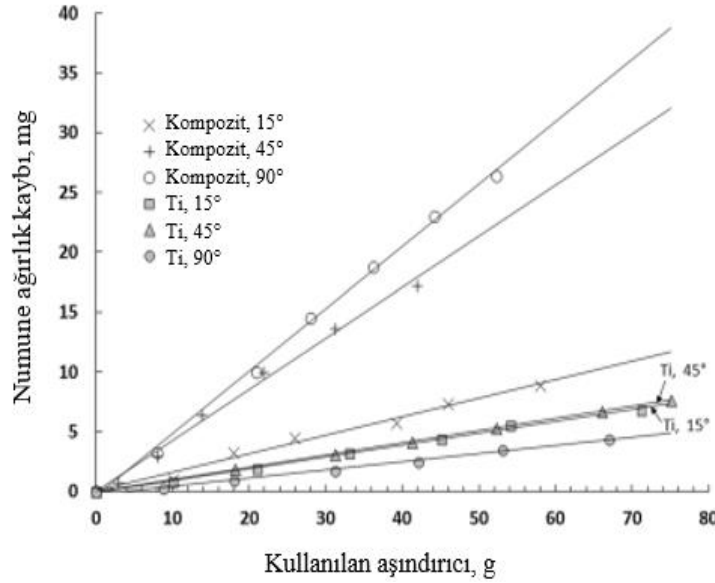
PEKK ve karbon fiber takviyeli PEKK kompozitlerinin farklı çarpma açıları (15°, 30°, 60°, 90°), çarpma hızları (25, 37, 50, 66 m/s), 10 mm nozul-numune mesafesinde, oda sıcaklığında, 200± 50 µm boyutunda köşeli silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 4.15'te elde edilen verilerden saf PEEK'in maksimum erozyon oranının 30° çarpma açısında görülerek sünek erozyon davranışı sergilediği, kompozit malzemelerin ise 60° çarpma açısında görülerek yarı sünek erozyon davranışı sergiledikleri, 15° haricinde diğer çarpma açıları için kompozitlerin saf PEEK polimerinden daha yüksek erozyon oranı gösterdiği gözlemlenmiştir. Kompozit numunelerde matriste plastik deformasyon, fiberlerin mikro çatlaması, fiber-matris bağ ayrılması erozyon mekanizmaları gözlemlendiği belirtilmiştir.



Şekil 4.15. Saf PEEK ve çeşitli polimer matrisli kompozitlerin çarpma açısına göre kararlı durum erozyon oranları (0° fiber oryantasyonu, 66 m/s çarpma hızı) (Suresh ve diğ., 2009)

Karbon fiber epoksi kompozit ve saf titanyumun katı partikül erozyonu davranışlarının incelendiği bir çalışmada (Cai ve diğ., 2015) ortalama boyutu 50 µm olan köşeli alümina aşındırıcıları kullanılarak, 15°, 45°, ve 90° çarpma açıları katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 4.16'dan elde edilen verilere bakıldığında kullanılan aşındırıcı miktarına bağlı olarak maksimum ağırlık kaybının titanyum numunesi için orta çarpma açıları (45°) meydana geldiği, karbon fiber epoksi kompozit numunesi için maksimum ağırlık kaybının çarpma açısının artmasıyla artan darbe enerjisine daha duyarlı olan fiberlerin varlığına dayandırdıkları yüksek çarpma açıları (90°) meydana geldiği ve

gevrek erozyon davranışı gösterdiği, titanyum numunesi için yüksek çarpma açılarında (90°) ve karbon fiber epoksi kompozit numunesi için düşük çarpma açılarında (15°) ağırlık kayıplarının düşük olduğu, dik açılı çarpmada titanyumun plastik deformasyon ve kompozit numunenin gevrek kırılma erozyon mekanizması gösterdiği gözlemlenmiştir. Buradan kompozit malzemelerin genel olarak düşük darbe açılarında daha dirençli olduğu ve titanyum gibi metallere göre erozif aşınmaya karşı daha duyarlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.16. Çeşitli çarpma açılarında aşındırıcı miktarının bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı (Cai ve diğ., 2015)

Metalik olmayan çeşitli malzemelerin erozyon testinin gerçekleştirildiği bir çalışmada (Anderson ve diğ., 2021) AISI 316'ya kıyasla çeşitli metalik olmayan malzemeler olan ve ilgili özellikleri Tablo 4.4'te listelenmiş olan PEEK, karbon fiber takviyeli plastik (FRP) ve elastomer malzemeye farklı çarpma hızları (12, 24 ve 36 m/s) ve çarpma açılarında (15°, 30°, 60° ve 90°), 150 µm boyutunda yarı yuvarlak aşındırıcı partiküller kullanılarak katı partikül erozyonu uygulanmış ve karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.4. Metalik olmayan numunelerin özellikleri (Anderson ve diğ., 2021)

Numune Adı	Malzeme çeşidi	Yoğunluk (g/cm ³)	Shore D değeri
A	PEEK	1,30	88
W	Fiber Takviyeli Polimer (FRP)	1,63	98
F	Elastomer	1,10	39

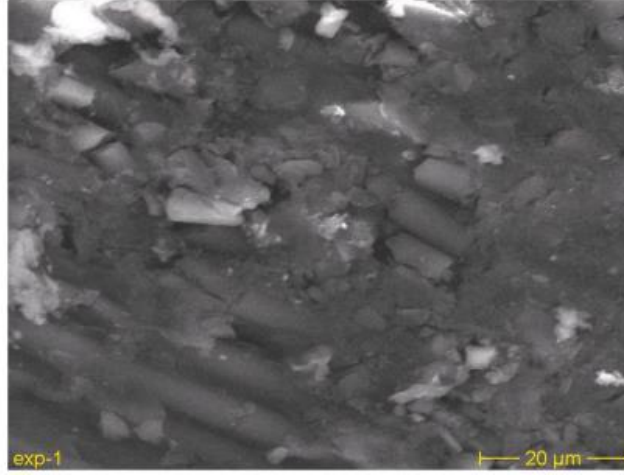
AISI 316, Malzeme A (PEEK), Malzeme W (FRP) ve Malzeme F (Elastomer) numuneleri için 36 m/s parçacık hızı ve 30° çarpma açısı ile gerçekleştirilen katı partikül erozyonu testinde elde edilen veriler Tablo 4.5'te verilmiş ve AISI 316, Malzeme A (PEEK), Malzeme W (FRP) numuneleri için yaklaşık 1200 g aşındırıcı partikül kullanıldığında meydana gelen toplam malzeme kayıpları sırasıyla yaklaşık olarak 43 mg, 31 mg, 143 mg olduğu görülürken Malzeme F (Elastomer) numunesinin ise yaklaşık 3000 g aşındırıcı partikül kullanarak meydana gelen toplam malzeme kaybının yaklaşık olarak 50 mg olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı çalışmadan (Anderson ve diğ., 2021) elde edilen diğer sonuçlara göre Malzeme A ve Malzeme W için aynı kum parçacık hızında 90°'lik çarpma açısında yaklaşık 1200 g aşındırıcı partikül kullanıldığında meydana gelen toplam malzeme kayıpları sırasıyla yaklaşık olarak 3,2 mg ve 186 mg olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan, saf polimerlerin fiber takviyeli kompozit (Malzeme W) ve AISI 316 çeliğinden daha iyi erozif aşınma direnci gösterdiğini, kompozit malzemenin (Malzeme W) yüksek çarpma açılarında erozyon oranının da arttığını görmekteyiz.

Tablo 4.5. Numunelerin 36 m/s hız ve 30° çarpma açısındaki katı partikül erozyonu testi sonuçları (Anderson ve diğ., 2021)

Numune Adı	Numunenin İlk Ağırlığı (g)	Numunenin Son Ağırlığı (g)	Kümülatif Malzeme Kaybı (mg)	Kümülatif Kum Ağırlığı (g)
AISI 316	34,9735	34,9305	43	1144,31
Malzeme A (PEEK)	6,429	6,3979	31,1	1181,31
Malzeme W (FRP)	11,4027	11,2594	143,3	1166,21
Malzeme F (Elastomer)	13,1984	13,1487	49,7	2894,2

Şekil 4.17'den görüldüğü üzere Malzeme W'nin (FRP) katı partikül erozyonu sonrasındaki SEM fotoğraflarında silindirik benzeri nesneler olarak görülen fiberlerinin çeşitli kırılma ve ayrılmalarla önemli ölçüde hasar gördüğü gözlemlenmiştir (Anderson ve diğ., 2021).



Şekil 4.17. Malzeme W'nin (FRP) SEM görüntüsü (çarpma hızı= 24 m/s, çarpma açısı= 60°) (Anderson ve diğ., 2021)

36 m/s'lik partikül hızı için malzemelerin çarpma açısına göre hacim kayıpları (hacim kaybı/aşındırıcı parçacıkların ağırlığı) incelemiş ve AISI 316'dan daha fazla erozyon elde edildiğini ve Malzeme F'nin AISI 316'ya göre 15°, 60° ve 90° çarpma açısında hacim kayıplarının çok daha küçük olduğunu fakat 30° çarpma açısında büyük olduğunu, malzeme F dışındaki tüm malzemelerde erozyon oranının öncelikle çarpma açısı arttıkça en yüksek değere ulaşınca kadar ki bu genellikle 30°-60° civarına kadar artış gösterdiğini, ardından çarpma açısının artmasıyla azalmaya başladığını, yani hacim kayıplarının benzer eğilimlere sahip olduğunu fakat Malzeme F'de malzemeye çok miktarda kum gömülmesinin sonucu olarak bazı durumlarda bir miktar ağırlık artışı gerçekleştiğini ve bu durumun sonuçları etkileyebildiğini gözlemlemişlerdir (Anderson ve diğ., 2021).

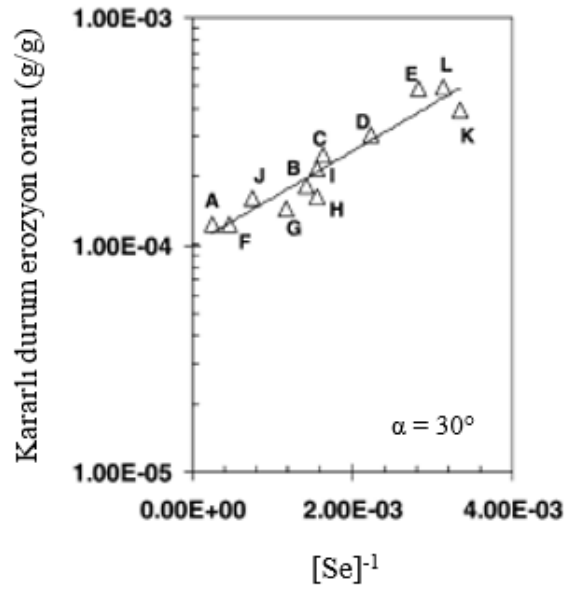
Erozyon sürecini tek bir özelliğin kontrol etmediğini, birden çok faktör etkili olduğu için diğer parametrelerin yanında mekanik özellik kombinasyonlarının da erozyon sürecini belirlemede dikkate alınması gerektiğini düşünerek mekanik özelliklerin katı partikül erozyonuna etkisini araştıran çalışmalar literatürde mevcuttur (Harsha ve Thakre, 2007).

Çeşitli poliarileterketon ve kompozitlerinin katı partikül erozyonu davranışının incelendiği bir çalışmada (Harsha ve diğ., 2003) Tablo 4.6'da özellikleri gösterilen PEEK (%33 keton), PEK (%50 keton) ve PEKK (%67 keton) gibi farklı keton içeriğine sahip çeşitli poliarileterketonların aşındırıcı olarak 150-212 µm arasında değişen büyüklüklerde köşeli silis kumu kullanılarak farklı çarpma açıları (15°, 30°, 60°, 90°) ve hızlarda (39,

68, 90 m/s), 10 mm nozul-numune mesafesinde, oda sıcaklığında katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, numunelerin erozyon oranları $[Se]^{-1}$, $[He]^{-1}$, $[HSe]^{-1}$ ve $[e]^{-1}$ gibi çeşitli mekanik özelliklerle (S nihai çekme mukavemeti, e kırılmaya kadar olan nihai uzama ve H sertlik) ilişkilendirilmeye çalışılmıştır fakat 30° çarpma açısında $[Se]^{-1}$, $[He]^{-1}$, $[HSe]^{-1}$ ve $[e]^{-1}$ arasında iyi doğrusallık gözlemlenirken 90° çarpma açısında $[Se]^{-1}$, $[HSe]^{-1}$ arasında iyi doğrusallık gözlemlenmiş, diğer çarpma açılarında (15° ve 60°) hiçbir ilişki gözlemlenememiştir. Şekil 4.18'den Se ürününün en iyi erozyon direncini sergileyen saf PAEK'ler için maksimum olduğu ve erozif aşınmayı artıran fiber/dolgu maddelerinin ilavesiyle azaldığı gözlemlenmiştir. Böylece malzemelerin erozyon oranını belirlemede mukavemet, uzama ve sertliğin önemli bir rol oynayabildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.6. PEEK, PEK ve PEKK polimerleri ile kompozitlerinin mekanik özellikleri (Harsha ve diğ., 2003)

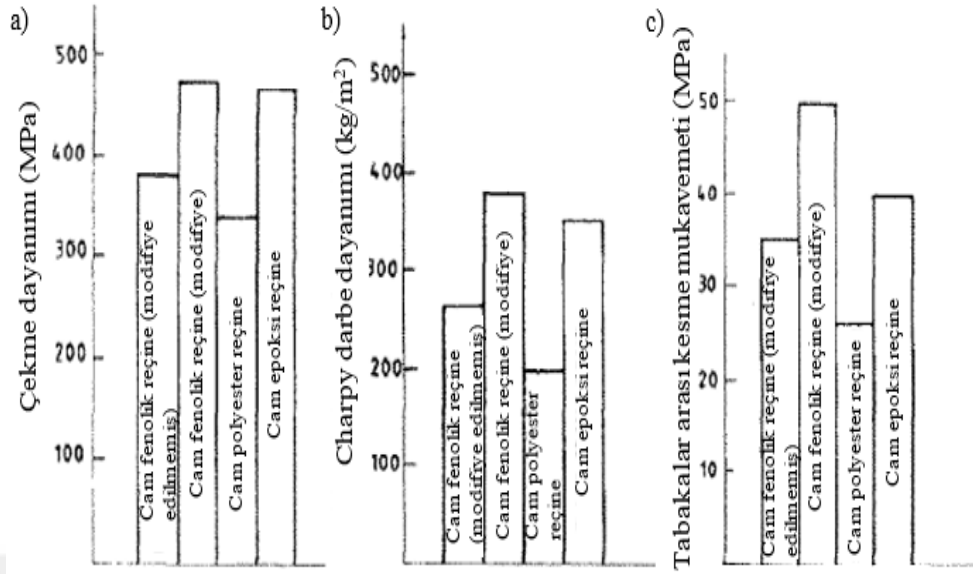
Malzeme	Gösterim	Takviye (%, ağırlıkça)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme dayanımı, S (MPa)	Elastiklik modülü (MPa)	Kopmada uzama, e (%)	Eğilme mukavemeti (MPa)	İzod darbe dayanımı (kJ/m ²)
PEEK	A	-	1,32	101	3600	>40	170	6,4
	B	Cam fiber (20)	1,42	120	6800	5,81	199	7,5
	C	Cam fiber (30)	1,49	144	9700	4,24	220	10
	D	Karbon fiber (30)	1,44	224	13000	2,0	350	9,0
	E	Karbon fiber (10) + PTFE (10)+ Grafit (10)	1,48	141	-	2,5	210	6,3
PEK	F	-	1,30	110	4000	20	183	7,0
	G	Cam fiber (10)	1,38	140	7000	6,03	265	7,0
	H	Cam fiber (20)	1,44	155	10500	4,14	290	7,0
	I	Cam fiber (30)	1,53	165	12500	3,88	350	7,0
PEKK	J	-	1,31	111	4416	12	194	-
	K	Karbon fiber (30)	1,36	249	27600	1,2	387	-
	L	Karbon fiber (10) + PTFE (10)+ Grafit (10)	1,45	159	12420	2	249	-



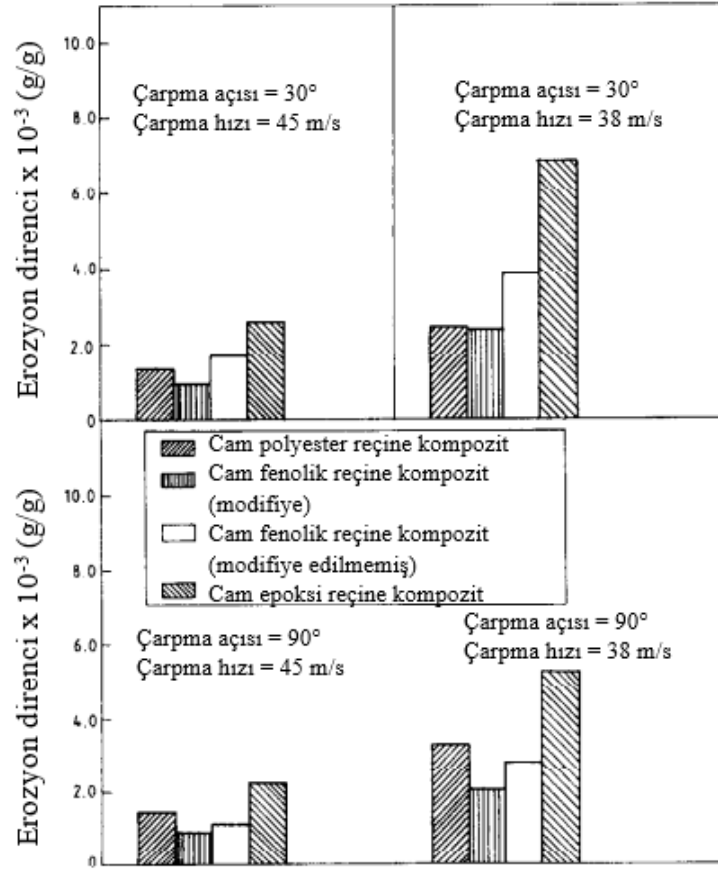
Şekil 4.18. 90 m/s çarpma hızı ve 30° çarpma açısında kararlı durum erozyonu ile mekanik özellikler arasındaki ilişki (Harsha ve diğ., 2003)

Bunun yanı sıra literatürde mekanik özelliklerle erozyon oranı arasında hiçbir korelasyon bildirmeyen birçok makale de mevcuttur. Bismaleimid polimerlerin katı partikül erozyonu ile ilgili bir çalışmada (Brandstädter ve diğ., 1991) çeşitli bileşimlerdeki bismaleimid termoset polimer malzemenin 60 m/s çarpma hızında, farklı boyutlardaki (42, 63, 143 veya 390 µm) köşeli Al₂O₃ aşındırıcı parçacıkları kullanılarak 90° çarpma açısında katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, elastisite modülü, sertlik ve kırılma enerjisi gibi çeşitli mekanik özellikler ile erozyon arasında herhangi bir korelasyon bulunamamıştır.

Polimer matrisli kompozitlerin katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Roy ve diğ., 1994) cam fiber takviyeli olan cam epoksi reçine, cam fenolik reçine (modifiye), cam fenolik reçine (modifiye edilmemiş) ve cam polyester reçine olmak üzere dört farklı tipte polimer matrisli kompozitin iki farklı çarpma açısı (30° ve 90°) ve çarpma hızında (38 ve 45 m/s) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 4.19'da gösterildiği üzere kullanılan polimer matrisli kompozitlerden cam fenolik reçinenin (modifiye edilmiş), en iyi mukavemet ve tokluk kombinasyonuna sahip olmasına rağmen Şekil 4.20'de gösterilen erozyon direnci grafiklerine bakıldığında en düşük erozyon direnci gösterdiği gözlemlenmiştir, çekme mukavemeti, Charpy darbe enerjisi, tabakalar arası kayma mukavemeti, sertlik gibi mekanik özellikler ile erozyon oranları arasında bir ilişki kurulamamıştır.



Şekil 4.19. Çalışmada kullandıkları kompozitlerin çekme mukavemetini, Charpy darbe dayanımını ve tabakalar arası kayma mukavemetini gösteren çubuk diyagramlar a) çekme dayanımı (MPa), b) Charpy darbe dayanımı (kg/m²), c) tabakalar arası kesme mukavemeti (MPa) (Roy ve diğ., 1994)

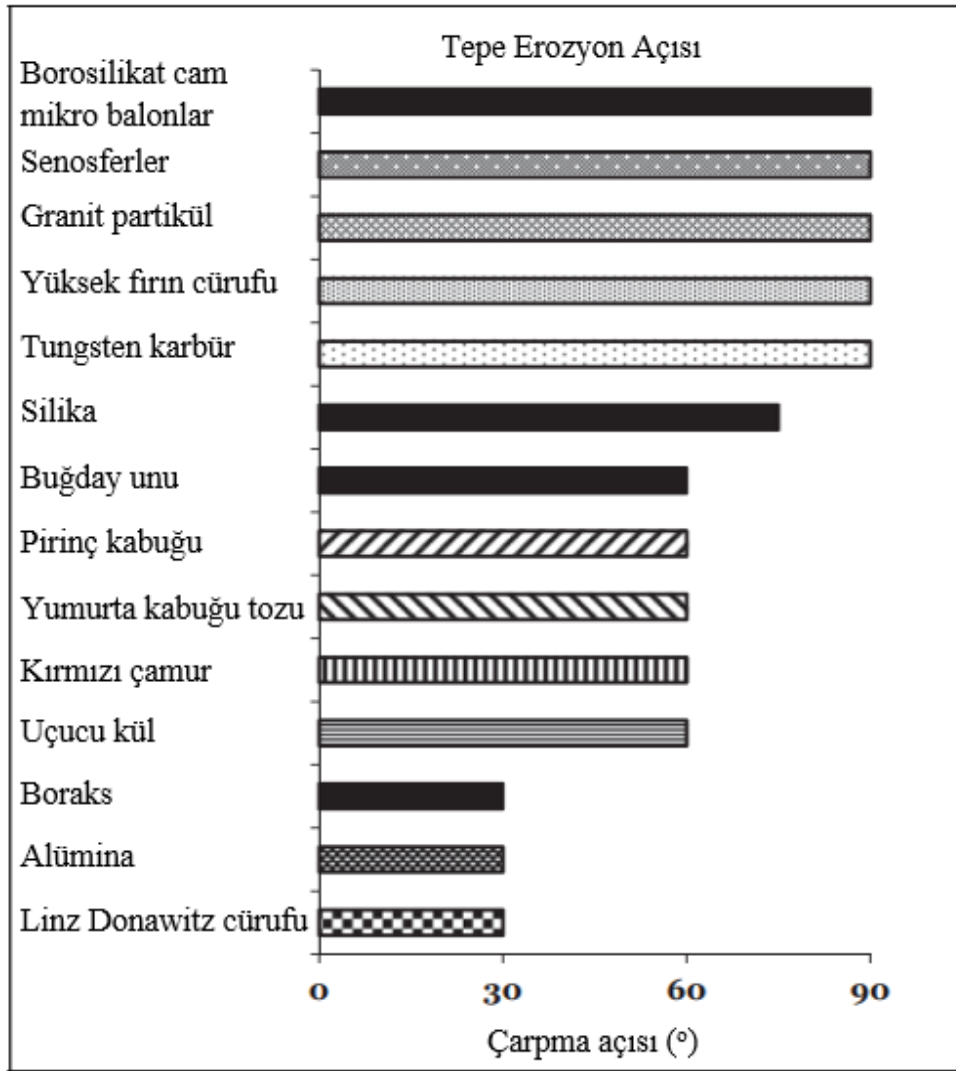


Şekil 4.20. İki farklı çarpma açısı (30° ve 90°) ve çarpma hızında (38 ve 45 m/s) çeşitli kompozitlerin erozyon direncini gösteren bir histogram (Roy ve diğ., 1994)

Kompozit malzemeler genel olarak düşük erozyon direncine sahiptir fakat çeşitli katkı maddeleri ile geliştirilebilecekleri belirtilmekte, düşük yoğunluk ve erozyona karşı iyi yanıt vermeleri nedeniyle literatürde partikül dolgulu polimer matrisli kompozit malzemeler ile ilgili çalışmalar mevcuttur (Anderson ve diğ., 2021; Shahapurkar ve diğ., 2020). Polimer matrisli kompozitlere erozif aşınma dirençlerini geliştirmek amacıyla çeşitli nano ve mikro boyutlu dolgu maddeleri ilave edilmektedir fakat bu dolguların erozyon direnci üzerinde hem olumlu hem de olumsuz sonuçlar gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu sebeple dolgulu polimerlerin erozif aşınması önem arz etmektedir (Öztürk ve diğ., 2019).

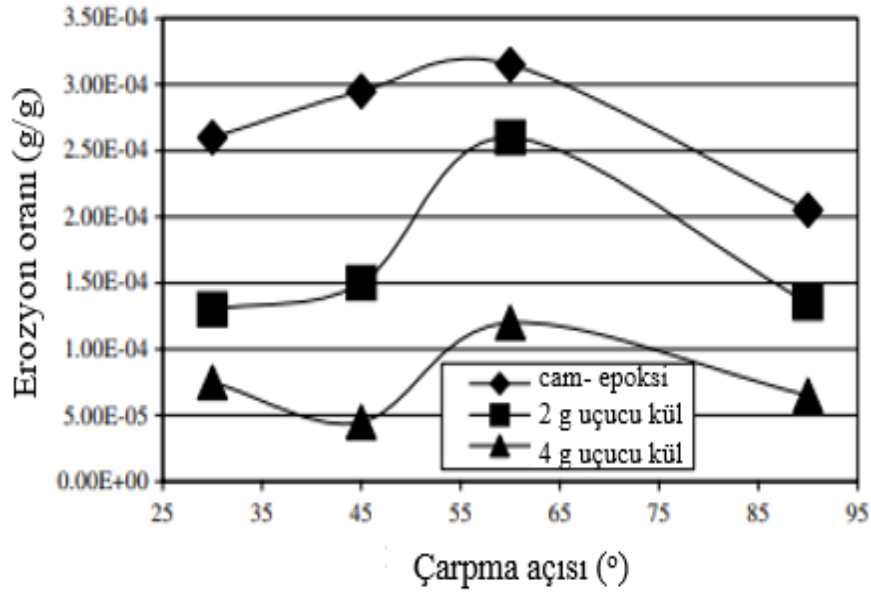
Patnaik ve arkadaşları (Patnaik ve diğ., 2007; Patnaik ve diğ., (2008a, 2008b, 2008c); Patnaik, 2009) alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve uçucu kül gibi farklı partikül dolgulu cam-polyester hibrit kompozitlerin erozif aşınma özelliklerine yoğunlaşmış ve matrise eklenen sert partikül dolgu maddelerinin katı partikül erozyonu nedeniyle meydana gelen malzeme kaybını dolgu maddesinin tipine ve içeriğine bağlı olarak önemli ölçüde azalttığını ileri sürmüş, Al_2O_3 dolgulu kompozitlerin, SiC ve uçucu kül dolgulu kompozitlere göre daha iyi erozyon direnci sergilediğini gözlemlemiş ve bu partikül dolgulu kompozitlerin malzeme kaybındaki azalmayı sert parçacıkların eklenmesiyle kompozitin yığın sertliğinde meydana gelen iyileşmeye ve dolgu parçacıklarının aşındırıcının aktardığı kinetik enerjinin büyük bir kısmını emerek geriye kalan daha az mikardaki enerjinin matris ve takviye edici fiber tarafından absorbe edilmesine dayandırmışlardır (Patnaik ve diğ., 2008a).

Partikül dolgulu polimer kompozitlerin katı partikül erozyonunu etkileyen faktörleri araştırmak için yapılan bir literatür inceleme çalışmasında (Shahapurkar ve diğ., 2020) literatürde incelenen çeşitli dolgu maddelerinin maksimum erozyonu gösterdiği çarpma açıları Şekil 4.21’de belirtilmiş ve borosilikat cam mikro balonlar, granit cürufu, yüksek fırın cürufu, tungsten karbür gibi sert parçacıklarla güçlendirilmiş kompozitlerde daha yüksek çarpma açıları, kırmızı çamur, yumurta kabuk tozu, pirinç kabuğu, boraks gibi nispeten daha yumuşak parçacıklarla güçlendirilmiş olan kompozitlerde ise düşük çarpma açıları maksimum erozyonun gözlemlendiği ifade edilmiştir. Dolayısıyla deney parametrelerinin yanı sıra daha sert veya daha yumuşak partikül dolgu ilavesinin genel erozyon davranışını belirlemede etkin rol oynayacağı açıktır (Shahapurkar ve diğ., 2020).



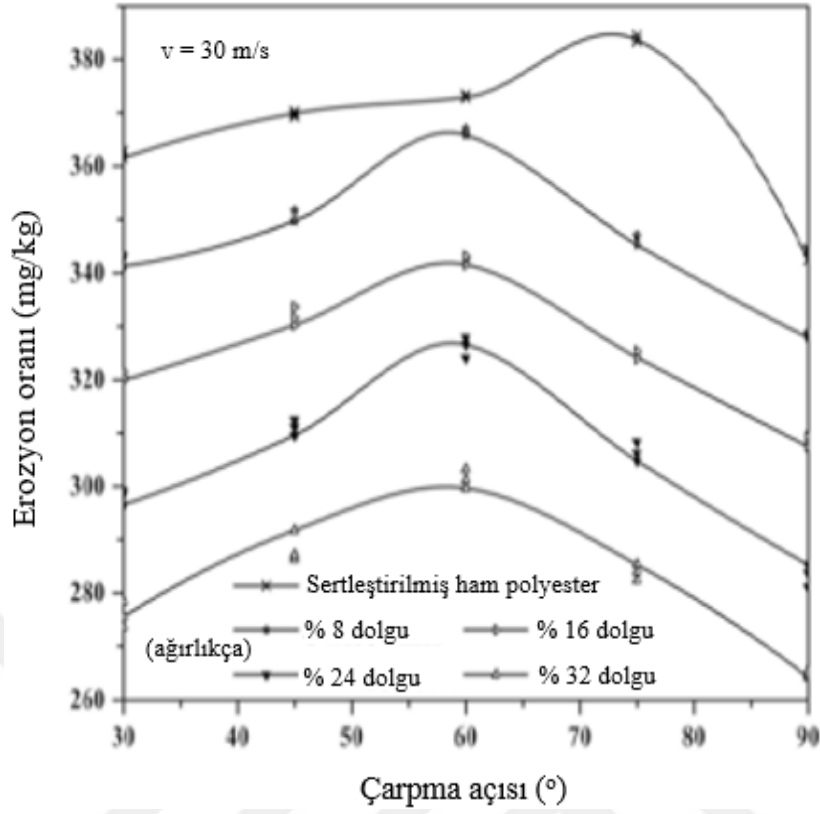
Şekil 4.21. Çeşitli dolgu maddelerinin tepe erozyon açısı (Shahapurkar ve diğ., 2020)

Cam fiber takviyeli uçucu kül dolgulu epoksi reçine kompozitlerin katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Srivastava ve Pawar, 2006) uçucu kül dolgu ilavesinin cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin katı partikül erozyonuna etkisi araştırılmış, erozyonda kesme mekanizması baskın olduğundan maksimum erozyon oranının tüm numunelerde 60° çarpma açısında gerçekleşerek yarı sünek erozyon davranışı sergiledikleri, Şekil 4.22'den görüldüğü üzere, dolgu maddesi içermeyen saf cam-epoksi kompozitin zayıf arayüzey yapışması dolayısıyla en yüksek aşınmayı gösterirken uçucu kül dolgu maddesi fiber-matris bağlarının ayrılmasını kısıtlayarak malzemenin erozyona direnmesine izin verdiğinden ve GFRP kompozitinin çekme dayanımı ve modülünü azalttığından uçucu kül dolgusunun kompozitin erozyon direncini artırdığı gözlemlenmiştir (Srivastava ve Pawar, 2006).



Şekil 4.22. Çarpma açısına bağlı olarak farklı uçucu kül dolgu içeriğine sahip cam-epoksi kompozitlerin erozyon oranları (Srivastava ve Pawar, 2006)

Proses parametrelerinin atık mermer tozu dolgulu polyester kompozitlerin katı partikül erozyonu davranışı üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada (Nayak ve diğ., 2021) atık mermer tozu dolgulu polyester kompozit malzemeye ortalama boyutu 100 mikron olan alümina aşındırıcılar kullanılarak katı partikül erozyonu uygulanmış, elde edilen verilerden Şekil 4.23'te maksimum erozyon oranının termoset malzeme olan ve kırılğan davranış göstermesi beklenen dolgusuz ham polyester için 75° çarpma açısında, diğer tüm dolgulu kompozitlerde ise maksimum erozyon oranının 60° çarpma açısında partikül dolgu maddelerinin varlığı ve aşındırıcı sıcaklığının yüksek olması sebebiyle matrisin yumuşamasına atfedilen yarı sünek davranış gözlemlendiği ve mermer tozu dolgulu polyester kompozitlerin erozyon direncinin saf polyesterden daha iyi olduğu, dolgu konsantrasyonunun artmasıyla kompozitin sertliği de artarak yüzeyde aşındırıcının kayması esnasında yüzeye nüfuz edemeyerek ancak kısa çiziklerin oluşumu ile yüzeyin pürüzlendirilmesi ve uygulanan darbe kuvvetinin bir kısmının dolgu parçacıklarına aktararak diğer kısmının matris malzemesinin aşınmasına harcanması sebebiyle erozyon dirençlerinin artış gösterdiği ve kompozitlerin erozif aşınmasına yol açan baskın erozyon mekanizmalarının plastik deformasyon, matris tabakasının ve dolgu partiküllerinin çıkarılması, çatlak ve krater oluşumu, mikro çatlaklar, dolgu ve matraste mikro kesme, dolgu partiküllerinin kırılması, aşındırıcı partiküllerin kompozit yüzey üzerinde sürülmesi, aşınma artıklarının oluşumu olduğu bildirilmiştir.



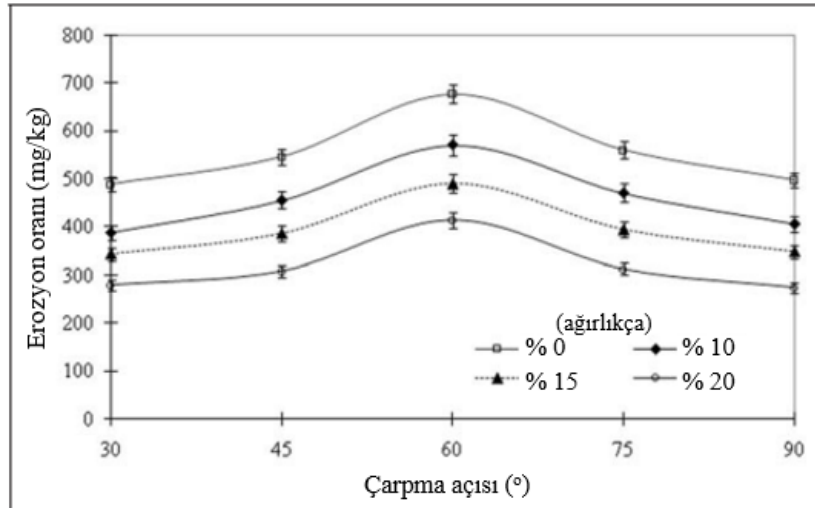
Şekil 4.23. Sertleştirilmiş ham polyester ve farklı miktarlarda mermer tozu dolgulu polyester kompozitlerin çarpma açısına göre erozyon oranları (Nayak ve diğ., 2021)

Granit dolgulu cam-epoksi hibrit kompozitlerin erozif aşınma performanslarının incelendiği bir çalışmada (Rout ve Satapathy, 2013) içeriğindeki cam fiber oranı sabit tutularak (ağırlıkça %40) dört farklı ağırlık oranlarında (ağırlıkça %0, %10, %15 ve %20) granit partikül dolgulu cam-epoksi hibrit kompozitlerin farklı çarpma açıları (30°, 45°, 60°, 90°), çarpma hızları (33, 47, 57, 68 m/s) ve aşındırıcı boyutlarında (100, 150, 200, 250 µm) silis kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.7’de görüldüğü gibi granit partikül dolgu ilavesinin kompozitlerin sertlik ve darbe enerjisini iyileştirerek çekme ve eğilme mukavemetinde azalma meydana getirdiği ve aşınma direncinde artış sağladığı, Şekil 4.24’ten görüldüğü üzere tüm kompozit numuneler için en yüksek erozyon oranının 60° çarpma açısında gerçekleşerek yarı sünek erozyon davranışı sergilediği, dolgu içeriğinin artmasıyla erozyon direncinin arttığı ve mikro sürme, reçinenin plastik deformasyonu, krater oluşumu, fiber kırılması, fiber-matris ayrılması, fiber-dolgu maddesinin parçalanması gibi erozif aşınma mekanizmaları gözlemlenmiştir (Rout ve Satapathy, 2013).

Tablo 4.7. Cam fiber takviyeli epoksi kompozit ve çeşitli miktarlarda granit dolgulu hallerinin mekanik özellikleri (Rout ve Satapathy, 2013)

Özellikler	Epoksi+ % 40 cam fiber	Epoksi+ % 40 cam fiber+ %10 granit	Epoksi+ % 40 cam fiber+ %15 granit	Epoksi+ % 40 cam fiber+ %20 granit
Sertlik (HV)	35	40	44	47
Çekme Dayanımı (MPa)	362	307	290	269
Eğilme Mukavemeti (MPa)	386	364	345	316
Darbe Enerjisi (J)	0,73	0,81	0,87	0,97



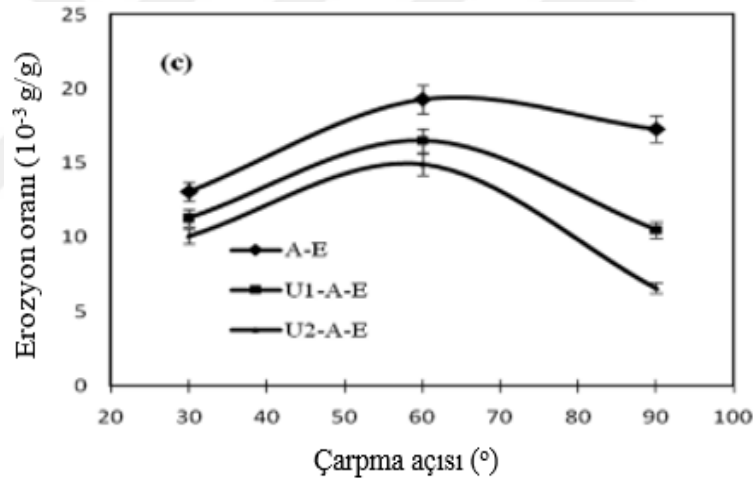
Şekil 4.24. Çarpma açısı ve dolgu içeriğinin kompozitlerin erozyon oranına etkisi (Rout ve Satapathy, 2013)

Aynı şekilde literatürde yapılan diğer çalışmalarda da araştırmacılar tarafından benzer durumlar gözlemlenmiş, UHMWPE dolgulu aramid-epoksi hibrit kompozitlerin erozif aşınma davranışı üzerine yapılan bir çalışmada (Mohan ve diğ., 2012) malzeme bileşimindeki aramid fiber oranı sabit tutulan (ağırlıkça %60) aramid kumaş takviyeli epoksi kompozitlere eklenen UHMWPE dolgusunun (ağırlıkça %2 ve %4) erozif aşınma davranışına etkisi araştırılmış, elde edilen verilerden dolgu ilavesiyle matris malzemesinin daha az hasar görerek daha düşük fiber kırılmasına yol açtığı ve sert silika aşındırıcı partiküllerine karşı direnç gösterdiği dolayısıyla daha düşük ağırlık kaybı meydana getirdiği ve Tablo 4.8'de görüldüğü üzere artan UHMWPE dolgu içeriği ile

kompozitin mekanik özelliklerini (çekme dayanımı, katmanlar arası kesme mukavemeti ve sertlik) iyileştirerek Şekil 4.25'te görüldüğü gibi erozyon oranını azalttığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.8. Aramid kumaş takviyeli epoksi kompozit ve çeşitli miktarlarda UHMWPE dolgulu hallerinin mekanik özellikleri (Mohan ve diğ., 2012)

Özellikler	Dolgosuz aramid kumaş takviyeli epoksi kompozit (A-E)	%2 UHMWPE dolgulu aramid kumaş takviyeli epoksi kompozit (U1-A-E)	%4 UHMWPE dolgulu aramid kumaş takviyeli epoksi kompozit (U2-A-E)
Çekme Dayanımı (MPa)	274,5± 7	303,9± 4,6	313,7± 0,86
Katmanlar arası kesme mukavemeti (MPa)	12,1± 0,51	14,1± 0,43	15,5± 0,28
Sertlik (HV)	78± 1,7	81± 0,88	84± 0,60

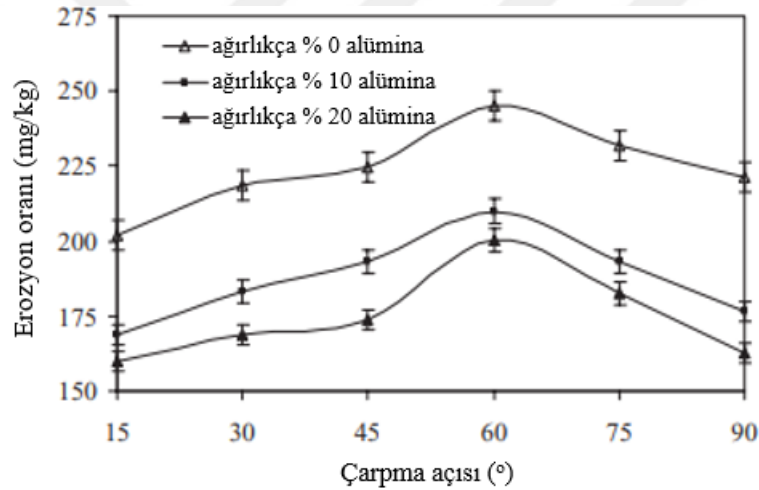


Şekil 4.25. Çarpma açısına bağlı olarak kompozitlerin UHMWPE dolgu içeriğinin erozyon oranına etkisi (Mohan ve diğ., 2012)

Alümina dolgulu cam-epoksi kompozitlerin tribolojik davranışı üzerine yapılan bir çalışmada (Biswas ve Satapathy, 2010) malzeme bileşimindeki cam fiber oranı sabit tutulan (ağırlıkça %50) cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerde alümina partikül dolgusunun (ağırlıkça %10 ve %20) erozif aşınmasına etkisi incelemiş, eklenen alümina partikül dolgusunun Tablo 4.9'da gösterildiği üzere kompozitin sertliğini ve darbe enerjisini artırarak, çekme dayanımını ve eğilme dayanımını azalttığı ve Şekil 4.26'da gösterildiği üzere cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin erozif aşınma performansını iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.9. Cam fiber takviyeli epoksi kompozit ve çeşitli miktarlarda alümina dolgulu hallerinin mekanik özellikleri (Biswas ve Satapathy, 2010)

Özellikler	Epoksi+ % 50 cam fiber	Epoksi+ % 50 cam fiber+ %10 alümina	Epoksi+ % 50 cam fiber+ %20 alümina
Sertlik (HV)	24,8	39,92	47,46
Çekme Dayanımı (MPa)	516	427	385
Eğilme Mukavemeti (MPa)	393,1	378,02	258,19
Katmanlar arası kesme mukavemeti (MPa)	99,75	77,86	57,83
Darbe Enerjisi (J)	0,976	1,198	1,311



Şekil 4.26. Çarpma açısına bağlı olarak kompozitlerin alümina dolgu içeriğinin erozyon oranına etkisi (Biswas ve Satapathy, 2010)

Hibrit kompozitlerin mekanik ve erozif aşınma davranışı üzerine yapılan bir çalışmada (Mahapatra ve Patnaik, 2009) cam fiber takviyeli polyester kompozite malzeme bileşimindeki cam fiber oranı sabit tutularak (ağırlıkça %50), ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında eklenen CBPD (baypas tozu), Al₂O₃ (alümina) ve SiC (silisyum karbür) gibi sert seramik partiküllü dolgu maddelerinin kompozitin erozif aşınma performansına etkisi incelenmiş, Tablo 4.10'da gösterildiği üzere dolgu çeşidi farketmeksizin numunelerde çekme gerilimini aktarmak için dolgu partikülleri ile matris arayüzeyinin zayıf olması ve köşeli olan düzensiz şekilli partiküllerin köşelerinin matris malzemesinde gerilme yoğunlaşması oluşturmamasından kaynaklanabileceği düşüncesine dayandırdıkları dolgu

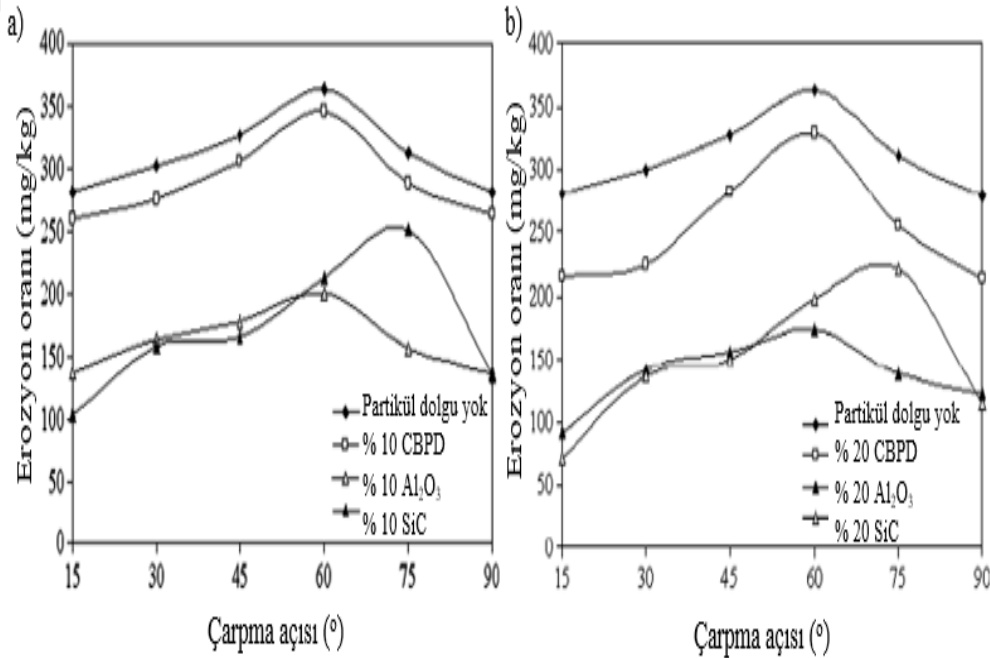
ilavesiyle ve dolgu içeriğindeki artışla çekme dayanımının azaldığı ve dolgu ilavesinin katmanlar arası kesme mukavemetini artırdığı fakat dolgu içeriği arttıkça (ağırlıkça %10'dan ağırlıkça %20'ye) biraz azalma gösterdiği ve az miktarda (ağırlıkça %10) ilave edilen CBPD ve alümina dolgusunun eğilme mukavemetini iyileştirerek daha fazla (ağırlıkça %20) ilave edildiği durumda eğilme mukavemetini kötüleştirdiği, silisyum karbür dolgusunun ise her durumda eğilme mukavemetini düşürdüğü, partikül dolgu ilavesinin kompozitlerin darbe yüklemesine karşı direncini artırdığı gözlemlenerek sert partikül dolgu maddeleri ilavesi ile malzeme kaybında meydana gelen önemli ölçüdeki azalmayı kompozitin yığın sertliğinde iyileşme gerçekleşmesi ve dolgu partiküllerinin iyi kinetik enerji absorpsiyonu sebebiyle termoplastik polyester matris ile takviye edici cam fiber tarafından absorbe edilecek daha az miktarda enerjinin mevcut olması ve dolgu maddesi içermeyen kompozit malzemeye kıyasla fiber maruziyeti başlamasının geciktirilmesine bağlanmış olup Şekil 4.27’de görüldüğü üzere cam polyester kompozitin erozif aşınma performansının partikül dolgu maddelerinin ilavesiyle iyileştiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.10. Cam fiber takviyeli polyester kompozit ve çeşitli dolgulu hallerinin mekanik özellikleri (Mahapatra ve Patnaik, 2009)

Kompozit çeşidi	Ağırlıkça yüzde dolgu içeriği	Sertlik (HV)	Çekme dayanımı (MPa)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Katmanlar arası kesme mukavemeti (MPa)	Darbe Enerjisi (J)
Dolgusuz cam fiber takviyeli polyester kompozit	–	39,0	349,6	368	18,42	0,75
CBPD dolgulu cam fiber takviyeli polyester kompozit	% 10	43,5	322,6	463,34	24,86	0,86
	%20	40,0	297	327,2	21,14	0,89
Alümina dolgulu cam fiber takviyeli polyester kompozit	% 10	38,0	240,8	417	23,46	0,83
	%20	36,5	206	362,92	19,60	0,85

Tablo 4.10. (Devam) Cam fiber takviyeli polyester kompozit ve çeşitli dolgulu hallerinin mekanik özellikleri (Mahapatra ve Patnaik, 2009)

Kompozit çeşidi	Ağırlıkça yüzde dolgu içeriği	Sertlik (HV)	Çekme dayanımı (MPa)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Katmanlar arası kesme mukavemeti (MPa)	Darbe Enerjisi (J)
SiC dolgulu cam fiber takviyeli polyester kompozit	% 10	43,0	282,6	353,8	24,17	0,77
	%20	47,0	251,7	309,2	20,32	0,78



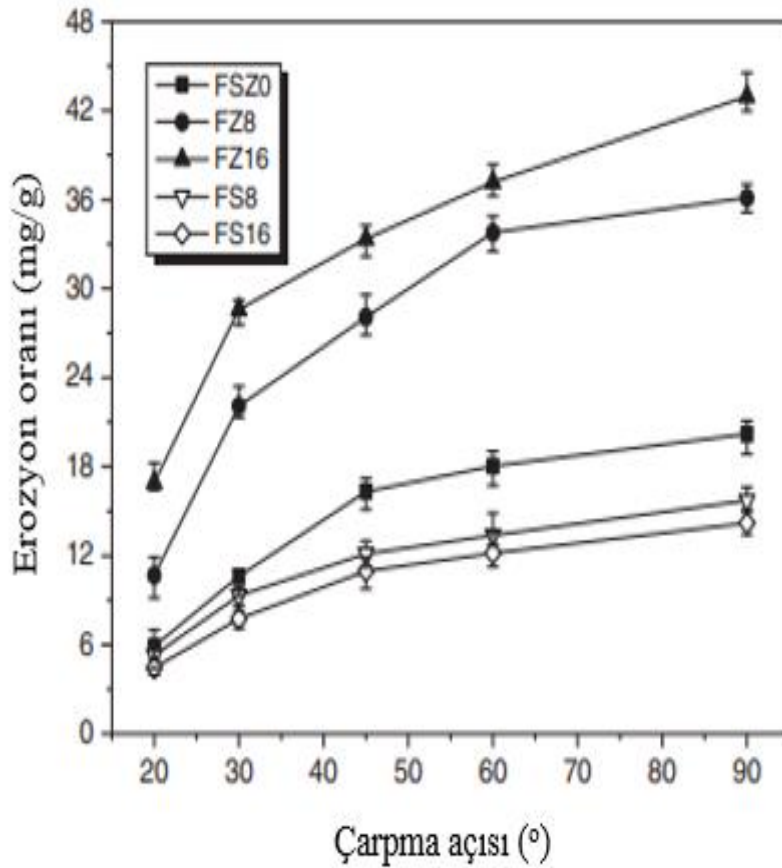
Şekil 4.27. Farklı partikül dolgulu cam fiber takviyeli polyester kompozit için çarpma açısına bağlı erozyon oranları a) ağırlıkça %10, b) ağırlıkça %20 (Mahapatra ve Patnaik, 2009)

Bunların yanı sıra erozyon oranı, kompozit malzemedeki dolgu maddesinin doğası ve içeriğinden etkilenmektedir (Rout ve Satapathy, 2013). Herhangi bir formdaki (parçacık, kıl, kısa veya uzun fiberler, vb.) dolgu maddesi arayüzeydeki çatlak başlangıcı ve ilerlemesi için zayıflamış bir bölge olarak işlev görerek erozyona dirençli değilse aşındırıcı için birincil hedef olacak ve maksimum erozyona katkıda bulunacaktır (Rao ve diğ., 2015). Dolayısıyla literatürde araştırmacılar tarafından dolgu maddesi ilavesiyle malzemenin erozyon direncinin kötüleştiğinin gözlemlendiği çalışmalar da mevcuttur.

E-cam fiber takviyeli silika ve çinko oksit dolgulu epoksi reçine kompozitlerin eroziv aşınma özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Öztürk ve diğ., 2019) miktarının ağırlıkça %0 ila %16 aralığında değişen, detaylı bileşimi ve tanımlamaları Tablo 4.11’de verilen, ortalama partikül boyutu sırasıyla 135 nm ve 220 nm olan silika (nanosilika) ve çinko oksit (ZnO) dolgulu çift yönlü (0/90°) E-cam dokuma kumaş takviyeli epoksi reçine kompozitlerine farklı boyutlarda (72 µm, 175 µm ve 348 µm) silisyum karbür (SiC) aşındırıcı partikülleri kullanılarak, farklı çarpma açıları (20°-90°) ve çarpma hızlarında (70, 100, 150 ve 200 m/s) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, Şekil 4.28’de gösterildiği üzere hem dolgusuz hem de silika ve çinko oksit dolgulu kompozitlerde en yüksek erozyon oranı 90° çarpma açısında gerçekleşerek gevrek aşınma davranışının meydana geldiği gözlemlenmiştir, aynı miktarda dolgu maddesi kıyaslandığında E-cam dokuma kumaş takviyeli epoksi reçinede silika dolgusu ile erozyon direncinde meydana gelen iyileşmenin hedef malzemede aşınma gerçekleşmeden önce aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisini ve darbeyi absorbe eden sert parçacıkların varlığından kaynaklandığı düşüncesine dayandırılmıştır, ek olarak silika dolgusunun EP matrisiyle iyi yapışma göstermesi sebebiyle FS16 kompozitinde daha az fiber hasarı gözlemlenmiştir fakat çinko oksit dolgusu ile FZ16 kompozitinde matris tabakasının kolayca ufalanarak çevrelediği fiberleri erozyona maruz bıraktığı ve fiberlerde ayrılma ve kırılmalara neden olarak fiber kırılmasında artış gerçekleştiği, fiber-matris bağ ayrılmasının dolgusuz ve silika dolgulu kompozitlere kıyasla daha fazla gerçekleştiği dolayısıyla erozyon direncini kötüleştirdiği ve erozyon direncinde yarattıkları bu etkinin ağırlıkça miktarları arttıkça artış gösterdiği dolayısıyla ağırlıkça %16 silika dolgulu kompozitin (FS16) en iyi erozyon direncini gösterirken ağırlıkça %16 çinko oksit dolgulu kompozitin (FZ16) ise en fazla erozyon oranı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.11. Numunelerin detaylı bileşimi ve tanımlamaları (Öztürk ve diğ., 2019)

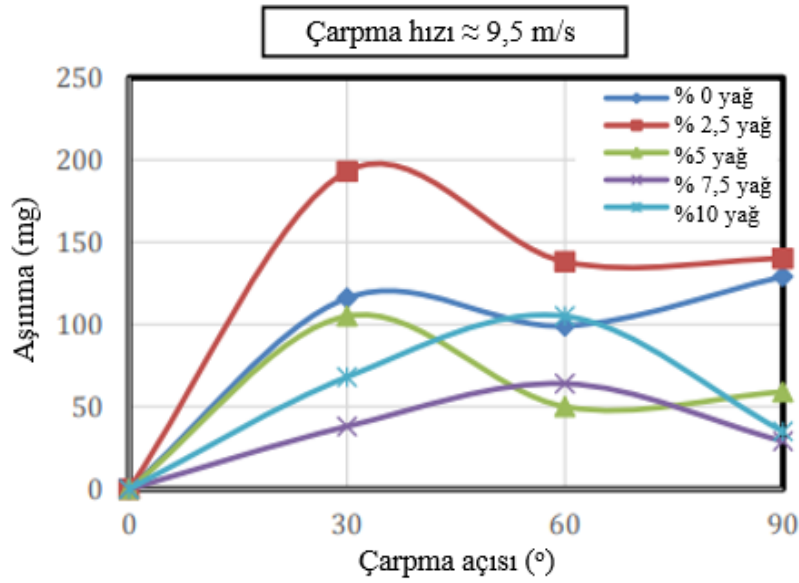
Malzemeler ağırlıkça %	Kompozit tanımları				
	FSZ0	FS8	FS16	FZ8	FZ16
Epoksi reçine	45	37	29	37	29
E-cam fiber	55	55	55	55	55
Silika	0	8	16	0	0
Çinko oksit	0	0	0	8	16



Şekil 4.28. Çalışmada kullandıkları kompozitlerin erozyon oranına çarpma açısının etkisi (aşındırıcı boyutu= 175 μ m, çarpma hızı= 100 m/s, maruz kalma süresi= 180 s) (Öztürk ve diğ., 2019)

Epoksi reçinenin katı partikül erozyonunun incelendiği bir çalışmada (Atia ve Ali, 2016) epoksi matrisindeki gözenekler içinde yağın tutulduğu kendi kendini yağlayan bir malzeme haline getirilen, ağırlıkça %2,5, %5, %7,5, %10 oranlarında sentetik yağ ile doldurularak oda sıcaklığında, farklı çarpma açıları (30°, 60° ve 90°), çarpma hızları (6,5 m/s, 7,2 m/s, 9,5 m/s) ve 4 dakika maruz kalma süresinde katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiştir.

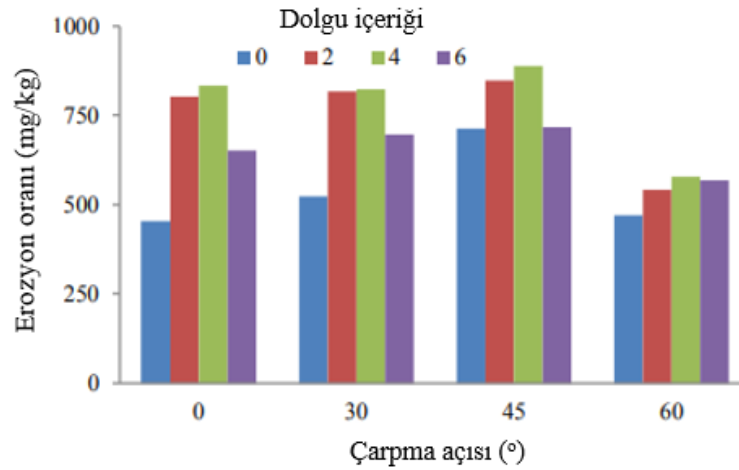
Şekil 4.29'da görüldüğü üzere maksimum aşınmanın ağırlıkça %2,5 yağ içeriğine sahip epoksi reçinede meydana geldiği ve %2,5 yağ içeriğinden sonra yağ içeriği arttıkça epoksi reçinenin erozyon direncinin arttığı, %7,5 yağ içeriğine kadar maksimum aşınmanın 30° çarpma açısında gerçekleştiği fakat yağ içeriği ağırlıkça %7,5 ve 10'a yükseldiğinde maksimum aşınmanın meydana geldiği çarpma açısının 60°'ye kaydığı dolayısıyla yağ içeriğinin epoksi reçinenin erozyon davranışına etkisinin büyük olduğu gözlemlenmiştir (Atia ve Ali, 2016).



Şekil 4.29. 9,5 m/s çarpma hızı için çarpma açısına bağlı olarak farklı sentetik yağ dolgu içeriğine sahip epoksi reçinelerin ağırlık kayıpları (Atia ve Ali, 2016)

Karbon fiber takviyeli epoksi kompozitin erozif aşınma davranışının incelendiği bir çalışmada (Rao ve diğ., 2015) dolgusuz ve grafit partikül (ağırlıkça %0, %2, %4, %6) dolgulu karbon kumaş takviyeli (ağırlıkça %60) epoksi kompozitlerin farklı çarpma açıları (15°, 30°, 45° ve 60°), aşındırıcı olarak 200 µm partikül boyutunda silika kumu kullanılarak katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, dolgu içeriğinin karbon epoksi kompozitin erozif aşınma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmış, Şekil 4.30'dan görüldüğü üzere tüm numuneler için maksimum erozyon oranının 45° çarpma açısında meydana gelerek epoksi matris içine karbon fiber ve grafit partiküllerinin dahil edilmesine atfettikleri yarı sünek erozyon davranışı gösterdiği, grafit dolgulu kompozit numunelerde ağırlıkça dolgu içeriği %6'ya kadar arttıkça erozyon oranlarının artış gösterdiği, %6 olduğunda erozyon oranında bir miktar azalma gerçekleştiği fakat yumuşak bir malzeme olan grafit partikülü ile doldurulmuş kompozitlerin daha düşük sertlik göstererek hedef malzemenin yüzey direncinde azalmaya sebep olduğu ve grafit partiküllerinin katı partikül erozyonuna maruz kaldığında matris malzemesinden kolayca ayrılarak erozyon oranında artış meydana getirdiği, ek olarak dolgusuz kompozitin grafit dolgulara göre kırılmaya karşı uzama değeri yüksek olduğundan elastik deformasyon için aşındırıcı parçacıkların darbe enerjisinin daha yüksek kısmını absorbe ederek çatlak başlangıcı ve yerel kırılma gibi plastik deformasyonlar için daha az bir enerji mevcut olduğundan tüm çarpma açıları için dolgusuz kompozitin erozyon direncinin tüm grafit

dolgulu kompozitlere göre daha iyi olduğu, dolgusuz kompozitte fiberlerin sağlam olduğu, fiber kırılması ve fiber-matris ayrılmasının daha az olduğu, hedef malzemede çatlak başlangıcı ve yerel kırılma için daha fazla miktarda darbe enerjisi kullanılması gerektiği, meydana gelen aşınma kalıntılarının matrise yapışıp karbon fiberlerin aşındırıcı partiküllere maruz kalmasını önleyerek kompozitin aşınmasını azaltmaya yardımcı olduğu, %2 grafit dolgulu kompozitte dolgusuzla göre nispeten daha fazla hasar meydana gelerek daha fazla fiber kırığı ve yumuşak grafit partikülünün matristen kolayca ayrılarak daha fazla fiber-matris bağ ayrılmasının gözlemlendiği, böylelikle daha yüksek erozyon oranının meydana geldiği, grafit partikül miktarı %4'e yükseldiğinde %2 grafit dolgulu karbon epoksi kompozitte gözlenenlerin artan büyüklükte gerçekleştiği, hedef malzemeden büyük miktarda matris uzaklaştırılarak daha fazla fiberin aşındırıcıya maruz kalmasına ve açıkta kalan fiberlerin hasar görerek matristen ayrılmasına sebebiyet verdiği, %6 grafit dolgulu kompozitlerde ise %4'e göre daha az fiber hasarı ve fiber-matris ayrılması meydana geldiği dolgu maddesi ve matris arasındaki iyi yapışmaya dayandırılarak fiberlerin matris tarafından çevrelenerek yerinde sıkıca tutulduğu dolayısıyla erozyon oranının farklı ağırlık yüzdesine sahip grafit dolgu ile doldurulmuş karbon epoksi kompozitine yani hedef malzemeye bağlı olduğu gözlemlenmiştir.



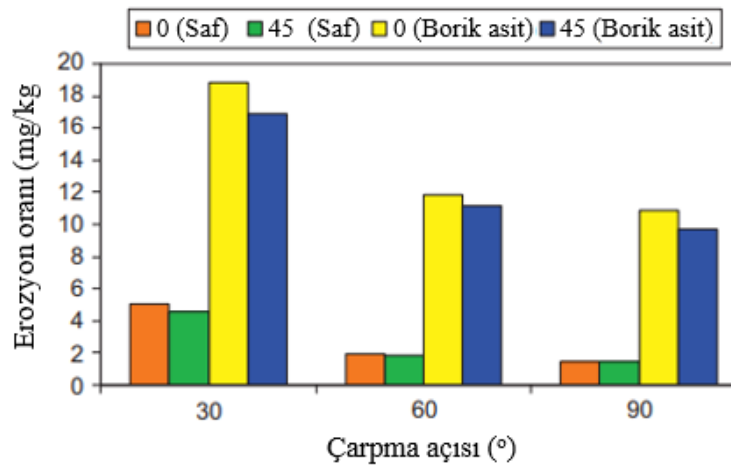
Şekil 4.30. Dolgusuz ve farklı grafit partikül dolgu içeriğine sahip karbon/epoksi kompozitlerin çarpma açısına bağlı erozyon oranları (Rao ve diğ., 2015)

Cam fiber takviyeli borik asit dolgulu epoksi reçine kompozitlerin katı partikül erozyonu davranışının incelendiği bir çalışmada (Bagci ve Imrek, 2011) Tablo 4.12’de gösterilen özelliklere sahip, %15 oranında borik asit dolgusunun iki farklı fiber oryantasyonunda [0° (0/90) ve 45° (45/-45)] cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin erozyon davranışına

etkisini incelemek amacıyla farklı boyutlarda (ortalama boyutu yaklaşık 200 ve 400 μm) Al_2O_3 aşındırıcı partikülleri kullanılarak farklı çarpma hızları (23, 34 ve 53 m/s) ve açılarda (30° , 60° ve 90°) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, çalışmada Şekil 4.31’de gösterildiği üzere tüm numunelerde maksimum erozyonun 30° çarpma açısında gerçekleşerek sünek erozyon davranışı sergilediği ve çarpma açısı arttıkça erozyon oranının azalma eğiliminde olduğu, %15 borik asit dolgulu kompozitlerde borik asit dolgusunun kompozitin sertlik, çekme mukavemeti, elastiklik modülü ve yoğunluk değerini önemli ölçüde azalttığı ve matris ile uyumlu olamayarak zayıf bağlanma kuvvetlerine sebep olduğu dolayısıyla güçlü bağlanma mukavemetine sahip olan GF/EP (cam fiber takviyeli epoksi reçine) kompozitlere göre erozyon oranının daha fazla olduğu, bu sebeple borik asit dolgusunun kompozitin erozif aşınma direncini kötü etkilediği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.12. Çalışmada kullanılan numunelerin özellikleri (Bagci ve Imrek, 2011)

Özellik	GF/EP (saf)	GF/EP (borik asit)
Fiber çapı (μm)	17	17
Fiber yoğunluğu (g/cm^3)	2,6	2,6
Yoğunluk (g/cm^3)	1,683	1,435
Çekme dayanımı (MPa)	533	401
Elastisite modülü (MPa)	144,3	128,96
Sertlik (HB)	87	35



Şekil 4.31. 0° ve 45° fiber oryantasyonunda dolgusuz ve borik asit dolgulu GF/EP kompozitlerinin çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları (çarpma hızı= 23 m/s, ortalama partikül boyutu= 200 μm Al_2O_3) (Bagci ve Imrek, 2011)

Boraks dolgulu cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin erozif aşınma performansının incelendiği bir çalışmada (Bagci, 2013) Tablo 4.13'te gösterilen özelliklere sahip, %15 ve %30 oranında boraks partikül dolgusunun iki farklı fiber oryantasyonunda (0/90 ve 45/-45) cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin erozyon davranışına etkisi incelenmiş, farklı boyutlarda (ortalama boyutu yaklaşık 200 ve 400 μm) Al_2O_3 aşındırıcı partikülleri kullanılarak farklı çarpma hızları (23, 34 ve 53 m/s) ve açılarda (30° , 60° ve 90°) katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, erozyon oranı üzerinde en önemli rolü olan parametrenin numunelerde kullanılan dolgu malzemesi miktarı olduğu, tüm numunelerde maksimum erozyon oranının 30° çarpma açısında meydana gelerek sünek erozyon davranışının gerçekleştiği, %15 boraks partikül dolgusuna sahip GF/EP kompozitlerinde boraks partikül dolgusunun yapıdaki cam fiber takviye ve epoksi matris ile güçlü bir bağ oluşturamaması sebebiyle katı partikül erozyonuna maruz kaldığında malzemeden kolayca uzaklaştırılarak kompozitin erozyon direncini olumsuz etkilediği ve dolgusuz kompozitten daha yüksek erozif aşınma meydana getirdiği, bunun yanı sıra %30 boraks partikül dolgusuna sahip GF/EP kompozitlerinde boraks partikül dolgusunun epoksi ile güçlü bir bağ oluşturarak %15 boraks partikül dolgulu kompozite kıyasla numunenin çekme mukavemeti ve sertliğini iyileştirerek aşındırıcı partiküllere karşı direnç oluşturduğu dolayısıyla da erozyon oranlarında azalma meydana getirdiği fakat boraks partikül dolgu ilavesinin miktarına bakılmaksızın GF/EP kompozitlerinin erozyon direncini olumsuz etkileyerek dolgusuz GF/EP kompozitlerinin en düşük erozyon oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4.13. Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri (Bagci, 2013)

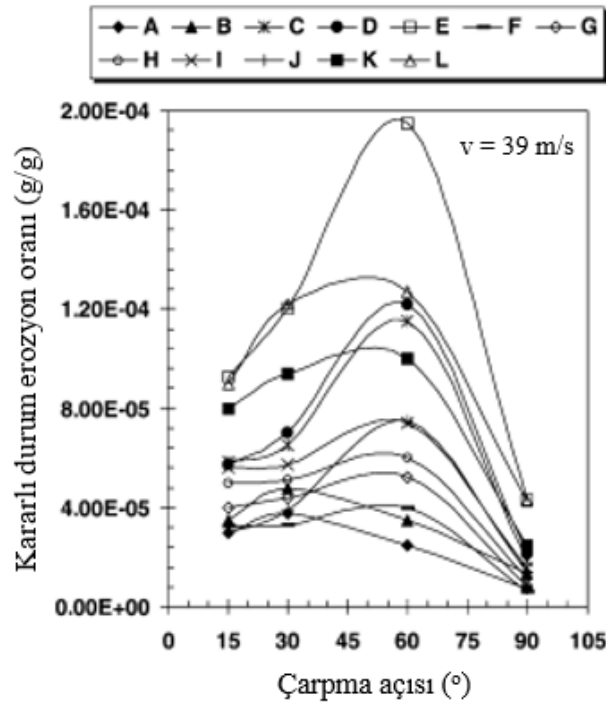
Özellik	GF/EP (Saf)	GF/EP (% 15 Boraks)	GF/EP (% 30 Boraks)
Malzeme yoğunluğu (g/cm^3)	1,683	1,395	1,317
Çekme dayanımı (MPa)	533	379	394
Sertlik (HB)	87	28	33
Boraks yüzdesi (%)	0	15	30

Çeşitli poliarileterketon ve kompozitlerinin katı partikül erozyonu davranışının incelendiği bir çalışmada (Harsha ve diğ., 2003) Tablo 4.14'te ifade ettikleri PEEK (%33 keton), PEK (%50 keton) ve PEKK (%67 keton) gibi farklı keton içeriğine sahip çeşitli

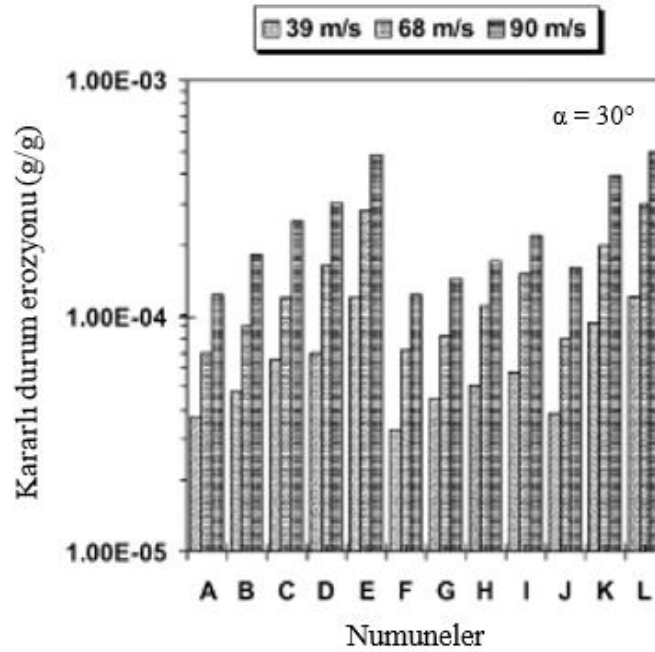
poliarileterketonlar ve kısa fiber takviyeli kompozitlerinin aşındırıcı olarak 150- 212 μm arasında değişen büyüklüklerde köşeli silis kumu kullanılarak farklı çarpma açıları (15° , 30° , 60° , 90°) ve hızlarda (39, 68, 90 m/s), 10 mm nozul-numune mesafesinde, oda sıcaklığında katı partikül erozyonu gerçekleştirilmiş, kullanılan poliarileterketonların farklı keton/eter oranları sebebiyle keton grubunun eter grubuna göre daha rijit davranış göstererek keton içeriğindeki artışın zincir sertliğini artırdığı bilindiğinden erozyon davranışlarının farklılık gösterdiği ve keton grubu içeriğinin fazla olduğu polimerin daha yüksek erozyon oranları sergilediği, Şekil 4.32’de gösterildiği üzere maksimum erozyon oranının saf PEEK’de (A malzemesi) ve PEEK+%20 GF kompozitinde 30° çarpma açısında gerçekleşirken diğer kompozitlerde (C, D, E malzemeleri) tipik kırılğan malzemeler olan karbon ve cam fiber takviyesinin yapılması ile 60° gibi daha büyük bir değere kayarak esas olarak mikro çatlama gibi erozyon mekanizmalarının baskın olduğu, diğer PAEK matrisleri ve bunların kompozitlerinin 60° çarpma açısında maksimum erozyon oranı gösterdiği, Şekil 4.33’ten karbon fiber takviyeli PAEK kompozitlerinin (D ve K kompozitleri), cam fiber takviyelilere göre daha yüksek aşınma sergilediği, matris malzemesine yapılan fiber takviyesiyle, fiber içeriğinin artmasıyla ve partikül PTFE, grafit gibi dolgu maddelerinin (E ve L kompozitlerinde görüldüğü üzere) erozyon oranını artırdığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.14. Çalışmada kullandıkları malzemelerin içeriği (Harsha ve diğ., 2003)

Malzeme	Gösterimi	Takviye ve dolgu çeşidi, içeriği (% ağırlıkça)
PEEK	A	-
	B	Cam fiber (20)
	C	Cam fiber (30)
	D	Karbon fiber (30)
	E	Karbon fiber (10)+ PTFE (10)+ Grafit (10)
PEK	F	-
	G	Cam fiber (10)
	H	Cam fiber (20)
	I	Cam fiber (30)
PEKK	J	-
	K	Karbon fiber (30)
	L	Karbon fiber (10)+ PTFE (10)+ Grafit (10)



Şekil 4.32. 39 m/s çarpma hızında PAEK'lerin ve kompozitlerinin çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları (Harsha ve diğ., 2003)



Şekil 4.33. Farklı çarpma hızları ve 30° çarpma açısında çeşitli kompozitlerin kararlı durum erozyon oranları (Harsha ve diğ., 2003)

Polieterimid (PEI) ve kompozitlerinin katı partikül erozyonu davranışının araştırıldığı bir çalışmada (Harsha ve Thakre, 2007) polieterimid ve farklı miktar ve türde rastgele yönlendirilmiş cam fiber (kısa E-cam), karbon fiber takviyeli PEI kompozitlerin ve katı

yağlayıcı (PTFE, grafit, MoS₂) dolgulu cam fiber takviyeli PEI kompozitlerin aşındırıcı olarak silis kumu kullanılarak farklı çarpma açıları (15°-90°) ve çarpma hızlarında (30-88 m/s) katı partikül erozyonu davranışı incelenmiştir. Tablo 4.15'te bu çalışma için kullandıkları numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri, fiber/dolgu içeriği gösterilmektedir.

Tablo 4.15. Numunelerin özellikleri (Harsha ve Thakre, 2007)

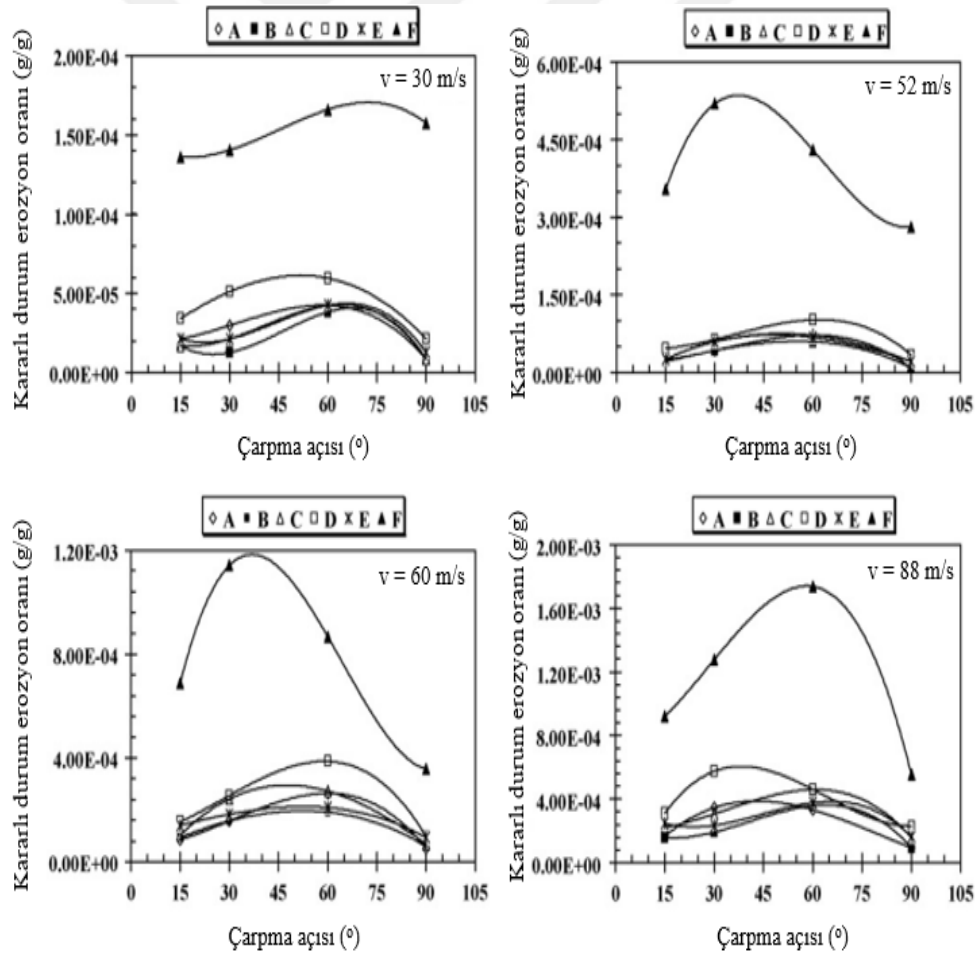
Özellik	Malzeme ve Gösterimi					
	Saf PEI	PEI+ %20 GF	PEI+ %30 GF	PEI+ %40 GF	PEI+ %25 CF	PEI+ %25 GF+ %15 PTFE+ %15 (MoS ₂ + grafit) F
	A	B	C	D	E	F
Çekme dayanımı (MPa)	105	139	169	186	214	83
Kopmada uzama (%)	60	3,0	3,0	2,5	2,0	1,5
Eğilme mukavemeti (MPa)	152	207	227	248	289	114
Rockwell sertliği	109	114	114	114	-	85
Çentikli İzod darbe (J/m)	32	85	85	112	406	69
Çentiksiz İzod darbe (J/m)	1335	481	427	427	69	16

Saf PEI polimer malzemesinin PEI matrisli kompozitlerine göre maksimum uzamasının daha yüksek olması sebebiyle aşındırıcı parçacıkların darbe enerjisinin daha büyük bir kısmı elastik deformasyon ile absorbe edilir ve darbe enerjisinin geriye kalan küçük bir kısmı plastik deformasyon, çatlak oluşumu ve bölgesel kırılmaları meydana getirebilmek için mevcut olur. Bu durum saf PEI matrisinin aşınma direncinin daha iyi olmasını sağlar (Harsha ve Thakre, 2007).

Kompozit malzemelerde erozyon işlemi gerçekleştirilirken hasar, matris malzemesi kaldırılıp takviye malzemesi olan fiberlere kadar ilerleyeceğinden fiberlerin aşınma direnci de önemli olup kırılman cam, karbon fiberler düzlem dışından gelen darbe kuvvetlerinden dolayı çabucak kırılır. Böylece aşınmaya karşı dirençleri az olur. Ek

olarak, darbe enerjisini çok fazla absorbe edemedikleri için fiber takviye oranının yüksek olması saf PEI matrisinin erozyon direncinde iyileşme sağlamaz (Harsha ve Thakre, 2007).

Saf PEI (Malzeme A) ve onun kompozitlerinin (B, C, D, E ve F) Şekil 4.34'te gösterilmiş olan çeşitli çarpma hızlarında çarpma açısına (α) bağlı olarak kararlı durumdaki erozyon oranlarına bakıldığında maksimum erozyon oranının A, B, C, D, E ve 30 ile 88 m/s çarpma hızları için F numunesinde 60° çarpma açısında olduğunu ve F numunesinde 52 ve 60 m/s ara hızları için yaklaşık 30° çarpma açısında olduğunu ve tüm çarpma hızları için en yüksek erozyon oranının dolgu (partikül PTFE, grafit, MoS_2) olan F numunesinde meydana geldiğini, numunelerin hepsinde çarpma hızı artırıldıkça erozyon oranının da artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bu deneysel koşullarda numunelerin yarı sünek erozyon davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir (Harsha ve Thakre, 2007).



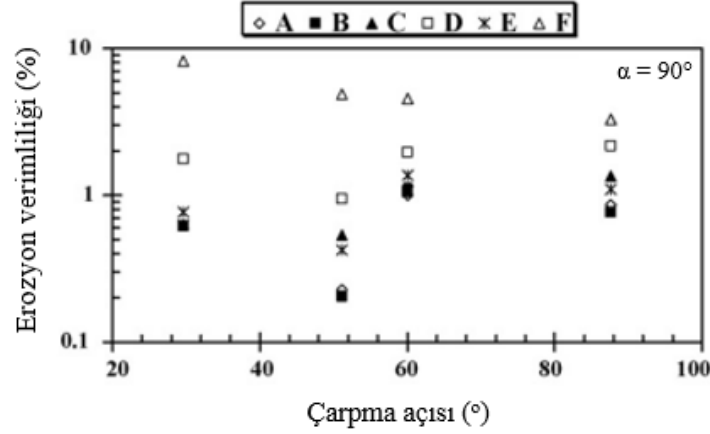
Şekil 4.34. PEI ve kompozitlerinin çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları (Harsha ve Thakre, 2007)

Sünek malzemelerde maksimum erozyon oranı genel olarak $15^\circ < \alpha < 30^\circ$ gibi düşük çarpma açılarında görülmektedir ve bu çalışmada kullandıkları saf PEI polimer malzemesinin sünek davranış göstermesi beklenirken 60° çarpma açısında en yüksek erozyon oranını verdiğini gözlemişlerdir, sebebi hedef malzeme ve deneysel koşulların erozyon oranını önemli derecede etkilemesidir. Bu sebeple malzemelerin erozyon davranışının sünek olma durumlarını tam olarak göstermesi beklenemez, bunun yerine mikrograflarda kırılma bir kırılma gözlemleyerek dik açılı çarpmalarda mevcut enerjinin çarpma ve mikro çatlama ile dağıldığını ek olarak aşındırıcı partiküllerin gömülmesinin gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir (Harsha ve Thakre, 2007).

Gevrek malzemelerde ise maksimum erozyon oranı genel olarak 90° çarpma açısında görülmektedir ve çalışmada sünek PEI matrisine takviye olarak cam ve karbon fiber gevrek malzemelerini kullandıklarından maksimum erozyon 60° 'lik çarpma açısına kayar, literatürden de bilindiği üzere takviyeli kompozit malzemelerde maksimum erozyon oranı genel olarak $45^\circ < \alpha < 60^\circ$ gibi çarpma açılarında gözlenen yarı sünek davranışın elde edileceği durumuna uyar (Harsha ve Thakre, 2007). Fakat hedef malzemenin erozif aşınma davranışı aşındırıcı partikülün çarpma açısı, çarpma hızı, şekli, sertliği, boyutu, hedef malzemenin özellikleri gibi koşullardan önemli ölçüde etkilendiğinden bu sınıflandırma kesin değildir, değişkenlik gösterebilir (Arjula ve Harsha, 2006). Üç tip dolgu maddesi (partikül PTFE, grafit, MoS_2) ve cam fiber içeren kompozit F malzemesinin erozyon davranışının ise bileşenlerinden sadece biri tarafından kontrol edilmediği, hepsinin etkisinin olması sebebiyle farklı deneysel koşullar altında maksimum erozyon oranını da farklı çarpma açılarında gösterdiğini gözlemlemişlerdir (Harsha ve Thakre, 2007).

Aynı zamanda bu çalışmada (Harsha ve Thakre, 2007) Şekil 4.35'ten görüldüğü üzere, PEI polimer matrisine cam ve karbon fiber takviyesi yapıldığı durumlarda ve ağırlıkça fiber içeriği arttıkça erozyon direncinin azaldığı dolayısıyla matris malzemesinin, kompozitte kullanılan fiber tipinin ve fiber içeriğinin erozyon oranını etkilediği gözlemlenmiştir. Diğer numunelerle karşılaştırıldığında en zayıf erozyon direncini katı yağlayıcı dolgulu Kompozit F'nin gösterdiği gözlemlenmiştir. Literatürde polimer kompozitlere yapılan fiber takviyesinin genel olarak erozyon direncini kötü etkilediği durumuna uygun sonuçlar elde etmiş olsalar da cam fiber takviyesinin daha düşük

miktarda (%20) olduğu durumda PEI polimer matrisinin erozyon direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Kompozit F numunesinde bulunan PTFE, grafit, MoS₂ dolgu maddelerinin erozyon direncini kötü etkilediği gözlemlenmiştir (Harsha ve Thakre, 2007).



Şekil 4.35. PEI ve kompozitlerinin çarpma açısına bağlı erozyon verimleri (Harsha ve Thakre, 2007)

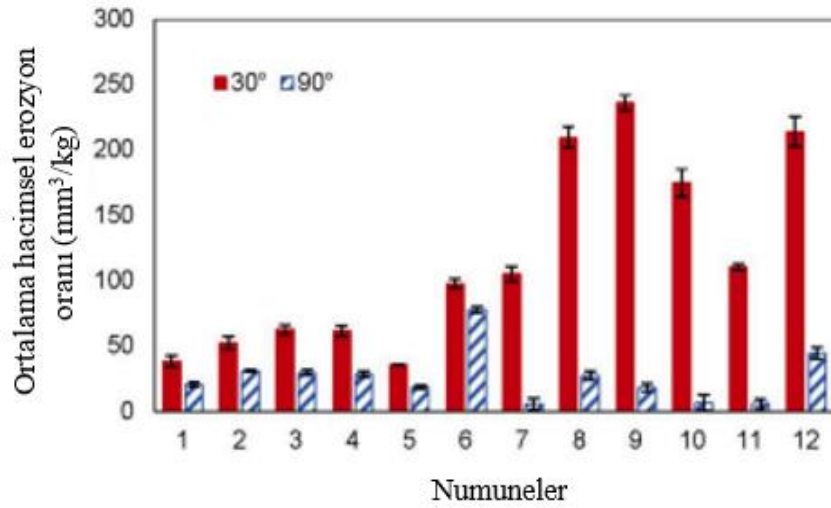
PEI ve onun kompozitlerinin çarpan aşındırıcı partiküllerin kümülatif ağırlığına bağlı olarak erozyon davranışında genel olarak hızlanma, pik, stabilizasyon ve yavaşlama evrelerinin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir (Harsha ve Thakre, 2007).

Yaptıkları çalışma ile fiber takviyeli PEI kompozitlerin kullanılacağı durumlarda malzeme erozyona uğrayacaksa, cam fiber takviyesinin PEI polimer matrisinde daha düşük miktarda bulunmasının tercih edileceği sonucunu elde etmişlerdir (Harsha ve Thakre, 2007).

Aşındırıcı koşullar altında PI ve PTFE bazlı kompozitlerin performansının incelendiği bir çalışmada (Kumar ve diğ., 2020) Tablo 4.16'da, yüksek performanslı polimerler olan PI ve politetrafloroetilenin (PTFE) katkısız ve aramid, karbon, cam ve bazalt fiber katkılı olduğu ve bazalt katkılı olduğu durumda katı yağlayıcı olan MoS₂'in kullanıldığı durumlardaki numunelerinin numaraları gösterilmiştir. Oda sıcaklığında, 50 m/s çarpma hızı, 30° ve 90° çarpma açılarında, 0,1-0,6 mm boyut aralığında silis kumu (SiO₂) kullanılarak bu numaralandırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilen katı partikül erozyonunda Şekil 4.36'daki erozyon performanslarının karşılaştırıldığı grafik elde edilmiştir.

Tablo 4.16. Çalışmada kullanılan polimer ve onların kompozitlerinin tanımlamaları (Kumar ve diğ., 2020)

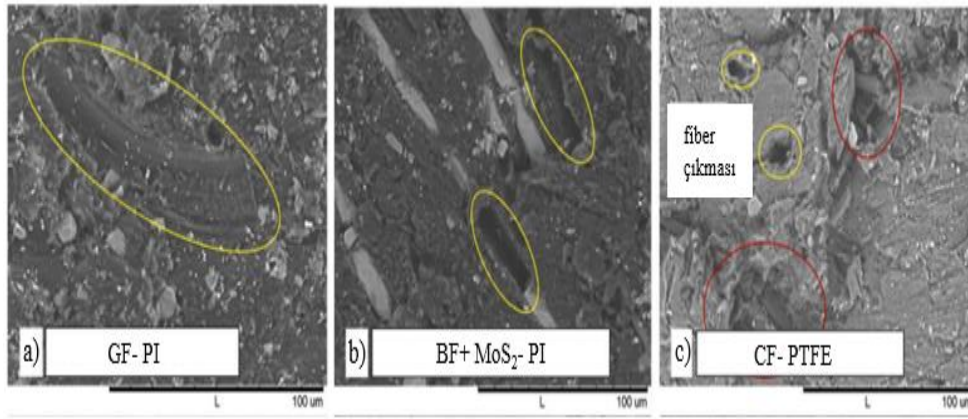
No.	Matris	Ana katkı maddesi	İkincil katkı maddesi	Yoğunluk (g/cm ³)
1	PI	-		1,369
2		% 15 AF		1,380
3		% 15 CF		1,415
4		% 15 GF		1,505
5		% 0,5 BF		1,374
6		% 0,5 BF	% 10 MoS ₂	1,561
7	PTFE	-		2,174
8		% 15 AF		1,977
9		% 15 CF		2,099
10		% 15 GF		2,230
11		% 0,5 BF		2,178
12		% 0,5 BF	% 10 MoS ₂	2,183



Şekil 4.36. 30° ve 90° çarpma açısında numunelerin ortalama hacimsel erozyon oranları (çarpma hızı= 50 m/s) (Kumar ve diğ., 2020)

Çalışmada (Kumar ve diğ., 2020) elde edilen sonuçlara göre, 30° gibi daha düşük çarpma açısında baskın kesme mekanizması nedeniyle sünek malzeme kaldırma davranışı ve 90°’de numuneye daha fazla kinetik enerji aktarılarak krater oluşumu görülürken malzeme kesimi gerçekleşme durumunun daha az olduğu ve aşındırıcı parçacıkların hedef malzemeye gömülmeye eğilimli olduğu, saf polimerlere kıyasla polimer esaslı kompozitlerin erozif aşınmasının genel olarak daha yüksek olduğu, matris malzemesine daha iyi yapışma gösterdiğinin gözlemlendiği BF (Bazalt fiber) takviyesinin (%0,5) diğer fiber türlerine göre (%15) daha düşük takviye oranına sahip olmasına rağmen çoğu

durumda kompozitlerin yüksek aşınma direncine sahip olmasını sağlayarak PI malzemesine takviye edildiği durumda erozyon direncini artırdığı ve PTFE'ye takviye edildiği duruma göre çok daha iyi performans gösterdiği, mekanik yağlayıcının (MoS_2) kullanıldığı BF takviyeli kompozitlerin kullanılmadığı durumlarına göre erozyon oranlarının daha fazla olduğu yani yağlayıcının erozyonu artırdığı gözlemlenmiştir. Kompozit numunelerde saf polimerlerinkine benzer aşınma mekanizmaları gerçekleştiği ve ana aşınma mekanizmaları olarak sürme, kesme olup yırtılma, plastik deformasyon aşınma mekanizmalarının daha şiddetli görülmesinin yanı sıra fiber kırılması ve fiber ayrılması meydana geldiği ve kompozit numunelerde daha fazla erozyon elde edildiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.37'de, bazı kompozit numunelerde meydana gelen baskın aşınma mekanizmaları olarak sırasıyla çizilme, fiberler kaldırıldıktan sonra oluşan çukurlar ve fiberin yerinden çıkması görülmektedir (Kumar ve diğ., 2020).



Şekil 4.37. 30° çarpma açısında malzemelerdeki baskın aşınma mekanizmaları a) GF-PI, b) BF+ MoS_2 -PI, c) CF-PTFE (Kumar ve diğ., 2020)

Bazı araştırmacılar, polimer ve çeşitli polimer esaslı kompozitlerin katı partikül erozyonu davranışını analiz etmeye odaklanmıştır. Literatürde kompozit malzemelerin erozif aşınması üzerine yapılan çalışmaların çoğu fiber takviyeli kompozitler üzerine yoğunlaşmış olup dolgulu kompozitler üzerinde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır, kestamid polimer ile yağlayıcı ve partikül dolgulu kompozitleri üzerinde katı partikül erozyonu araştırmaları henüz yapılmamıştır. Mevcut araştırma, dolgu maddelerinin matris malzemesinin erozif aşınması üzerindeki etkilerini araştırmaya odaklanmış, farklı operasyon koşullarında saf, yağlayıcı ve partikül dolgulu kestamid malzemelerin erozif aşınma davranışının incelenmesi üzerine yukarıdakiler ışığında gerçekleştirilmiştir.

5. MALZEME VE YÖNTEM

Kestamid ve kompozitlerinden üretilen yapısal bileşenler hizmet ömürleri süresince katı partikül erozyonuna maruz kalabilecek uygulamalarda kullanılabilirler. Bu çalışmanın amacı kestamid polimer malzeme ve yağlayıcı katkılı kestamid olan kestlub ve yağlayıcı katkılı partikül takviyeli kestamid olan kestoil malzemelerin katı partikül erozyonu ile erozif aşınma davranışlarını incelemektir.

5.1. Malzeme Seçimi

Deneysel çalışmada mekanik dayanım değerlerinin iyi olması, yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve düşük sürtünme katsayısına sahip olması sebebiyle yağlamaya ihtiyaç duymadan darbesiz çalışma imkanı sunması, metal malzemelerle sürtünme durumunda bile yüksek aşınma dayanımı sergilemesi, yorulma, darbe ve korozyon dayanımının iyi olması, takım tezgâhlarında kolay işlenebilmesi, sessiz çalışabilmesi gibi üstün mekanik, fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri olan kestamid malzeme ve onun kompozitleri olan kestoil ve kestlub malzemeler havacılıktan tekstil sanayine kadar birçok endüstri uygulamasında yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Mevcut çalışmada seçilen malzemelerin tümü Polikim firması tarafından üretilen, ticari olarak temin edilebilen döküm poliamidler olan kestamid, kestlub ve kestoil malzemelerdir. Tablo 5.1’de üreticinin veri sayfasına göre deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel, mekanik ve termal özelliklerin detayları listelenmiştir.

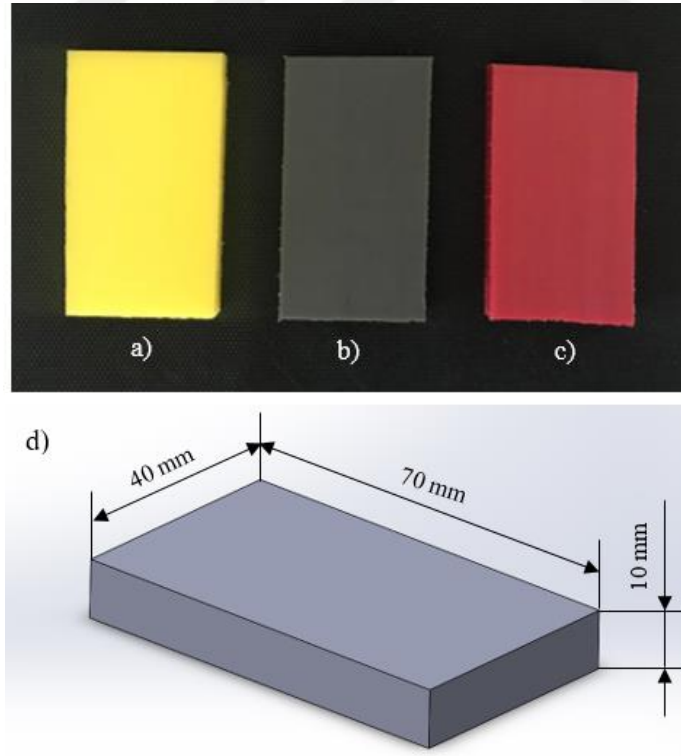
Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan malzemelerin teknik değerleri (tedarikçinin verilerine göre) (<https://www.polikim.com.tr/>)

Malzemeler	Kestamid	Kestoil	Kestlub
Özellikler			
Genel Özellikler			
Renk	Sarı	Yeşil	Kırmızı
Yoğunluk (g/cm ³)	1,15	1,14	1,15
Su emme (%)	7	5	5
Mekanik Özellikler			
Çekme Dayanımı (MPa)	83,357	73,550	78,453
Elastiklik Modülü (MPa)	4000	4000	4000
Kopma Uzaması (%)	>20	>30	>20

Tablo 5.1. (Devam) Çalışmada kullanılan malzemelerin teknik değerleri (tedarikçinin verilerine göre) (<https://www.polikim.com.tr/>)

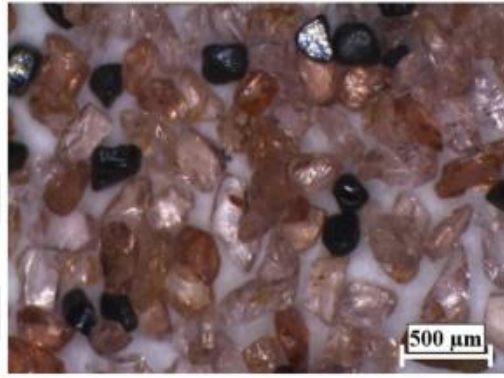
Malzemeler	Kestamid	Kestoil	Kestlub
Özellikler			
Basma Dayanımı (MPa)	93,163	93,163	93,163
Darbe Dayanımı (Charpy çentiksiz) (kJ/m ²)	Kırılma yok	Kırılma yok	Kırılma yok
Darbe Dayanımı (İzod, çentikli) (kJ/m ²)	5,6	6	6
Sürtünme Katsayısı	0,39	0,15	0,08
Sertlik (Shore D)	84	83	84
Termal Özellikler			
Erime Sıcaklığı (°C)	220	220	220

Çalışmada 40 mm x 70 mm x 10 mm boyutlara sahip levhalar şeklinde kesilen numuneler kullanılmıştır. Şekil 5.1’de çalışmada kullanılan numunelerin fotoğrafları ve numune boyutları gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan malzemeler a) kestamid malzeme, b) kestoil malzeme, c) kestdlib malzeme, d) numune boyutları

Deneyler için 60 mesh (200-600 μm) boyutunda köşeli şekle sahip garnet aşındırıcı partikülleri seçilerek katı partikül erozyonu testleri gerçekleştirilmiştir. Garnet, fiziksel özellikleri, kristal şekli ve kimyasal bileşimleri benzer olan demir-alüminyum silikat minerallerinin genel ismi olup yarı yuvarlak ve köşeli şekle sahip keskin kenarları olan, sert ve 1250°C erime noktasına sahip yüksek kaliteli aşındırıcılardır (Önen ve diğ., 2016). Ağaç, deri, metal, cam ve plastik gibi malzemelerin işlenmesi için aşındırıcı olarak kullanılırlar (Önen ve diğ., 2016). 60 mesh boyutundaki garnet aşındırıcı partiküllerinin stereo mikroskop görüntüleri Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

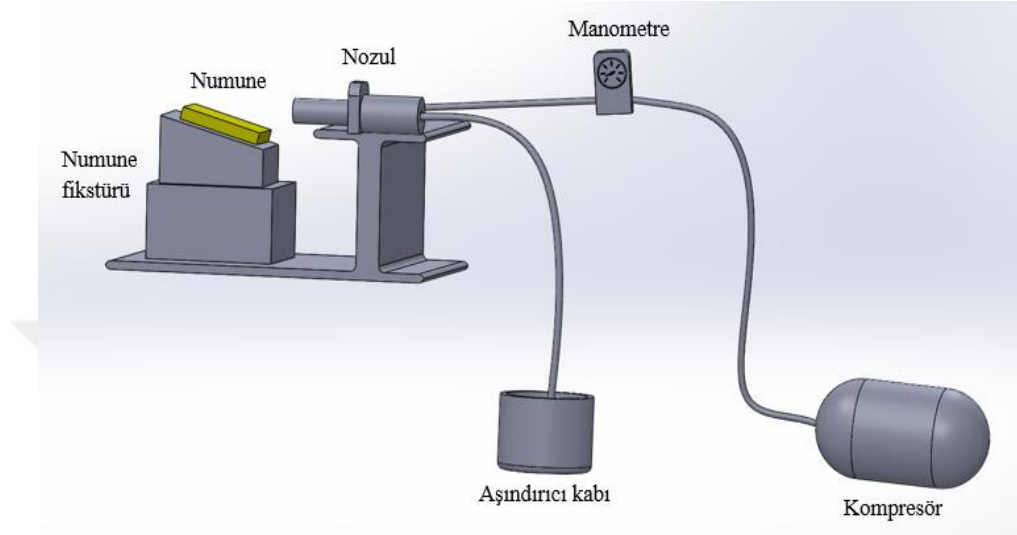


Şekil 5.2. 60 mesh boyutundaki garnetin stereo mikroskop görüntüsü (Özzaim ve diğ., 2022)

5.2. Deneysel Kurulum

Mevcut araştırmada kullanılan katı partikül erozyonu teçhizatının şematik bir diyagramı Şekil 5.3'te ve deney düzeneğinin fotoğrafları Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Teçhizat temel olarak, bir hava kompresörü, basınç ayar valfi, manometre, nozul, numune tutucu, aşınmış kum toplayıcı ve uygulama kabinden oluşmaktadır. Şekil 5.4b'de gösterilen deney düzeneğinde ortam (oda) sıcaklığında kompresör vasıtasıyla basınçlandırılan, basınç ayar valfi vasıtasıyla 1 bar ve 2 bar olarak ayarlanmış ve manometreden basınç değerinin görüldüğü dolayısıyla partikül çarpma hızları değiştirilmiş olan havanın oluşturduğu vakum etkisiyle 60 mesh (200-600 μm) boyutundaki köşeli şekle sahip aşındırıcı garnet partikülleri hareketlendirilip kabın dışındaki pedal ile kontrol edilen ve kumlama kabini içinde sabitlenmiş olan 5 mm çapındaki çelik nozuldan geçirilerek hızlandırılmış, nozul ile hedef malzeme arası 20 mm olacak şekilde sabit tutularak ve numune tutucu açısı açılı şablonları kullanılıp değiştirilerek 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarında tutulması ayarlanan hedef malzemeye 10, 20 ve 30 saniye maruz kalma

test sürelerinde püskürtülerek kuru ve basınçlandırılmış havanın kullanılarak aşındırıcıların hızlandırıldığı ASTM (Amerika Test Etme ve Malzeme Topluluğu) G76 standardına göre katı partikül erozyonu uygulanmış ve testte kullanılan aşındırıcı partiküller aşınmış kum toplayıcıda toplanmıştır.

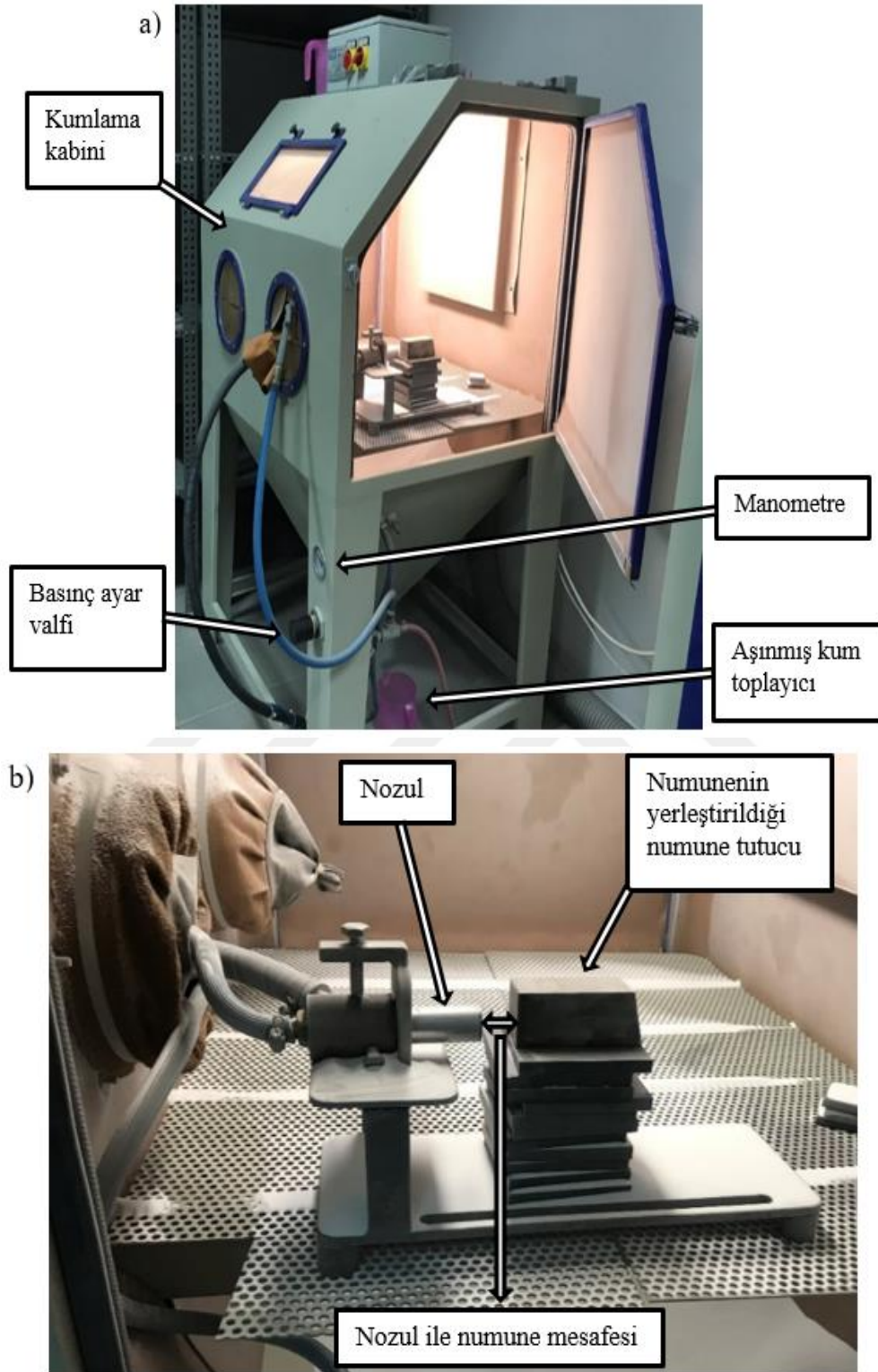


Şekil 5.3. Mevcut çalışmada kullanılan test düzeneğinin şematik görüntüsü

Çalışmada kullanılan test parametreleri Tablo 5.2’de listelenmiştir.

Tablo 5.2. Deneyde kullanılan test parametreleri

Hedef malzemeler	Kestamid, kestoil, kestlub
Numune boyutları	40 mm x 70 mm x 10 mm
Aşındırıcı çeşidi	Garnet
Aşındırıcı şekli	Köşeli
Aşındırıcı partikül boyutu	60 mesh (200-600 μ m)
Aşındırıcı çarpma açısı	15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°
Püskürtme basıncı	1 bar, 2 bar
Test sıcaklığı	Oda sıcaklığı (25 $\pm$ 2°C)
Test süresi	10 s, 20 s, 30 s
Nozul ve numune arası mesafe	20 mm
Aşındırıcı besleme hızı	1 bar basınç için 16,75 g/s
	2 bar basınç için 18,75 g/s



Şekil 5.4. Mevcut çalışmada kullanılan a) katı partikül erozyonu uygulama kabini, b) test düzeneği fotoğrafı

Katı partikül erozyonu testlerinden önce ve sonra numunelerin tartıldığı elektronik terazi (Shimadzu Atx-224, Japan) Şekil 5.5’te gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Mevcut çalışmada kullanılan numunelerin ağırlık ölçümünün yapıldığı 0,1 mg hassasiyetteki elektronik terazi (Shimadzu Atx-224, Japan)

Şekil 5.6, erozyon testlerine tabi tutulan kestamid polimer malzeme ve onun kompozitleri olan kestlub ve kestoil malzemelerin fotoğraflarını göstermektedir.



Şekil 5.6. Erozyon testlerine tabi tutulan kestamid polimer malzeme ve onun kompozitleri olan kestlub ve kestoil malzemelerin fotoğrafı

Erozyona uğrayan numune yüzeylerinin taranarak pürüzlülük ve yüzey topografyası ölçümlerinin elde edildiği temassız üç boyutlu optik profilometre (Nanovea PS50, USA) Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Mevcut çalışmada aşınmış numune yüzeyi topografyalarının elde edilmesi için kullanılan temassız 3D optik profilometre (Nanovea PS50, USA) (<https://nanovea.com/instruments/ps50/>)

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

6.1. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debi ve Erozyon Oranlarının Hesaplanması

Erozyon testlerinin tümünde standart bir test prosedürü uygulanmıştır. Aşındırıcı partiküller 1 bar ve 2 bar olmak üzere iki farklı basınç kullanılarak numune yüzeyine püskürtüldüğünden erozyon testinden önce ve sonra aşındırıcı partiküllerin bulunduğu kabın ağırlığı Şekil 5.5'te gösterilen elektronik terazi ile ölçülerek aradaki ağırlık farkının erozyon süresine bölünmesiyle 1 bar püskürtme basıncı için 16,75 g/s ve 2 bar için 18,75 g/s olmak üzere iki farklı partikül besleme hızı hesaplanmıştır, hesaplanan bu değerler Tablo 6.1'de listelenmiştir. Buradan püskürtme basıncının artmasıyla partikül besleme hızının artış gösterdiğini gözlemlemekteyiz.

Aşındırıcı parçacıkların hızı doğrudan püskürtme basıncıyla ilişkili olduğundan basınçla ilgili yapılan tüm değerlendirmeler parçacık hızı için de geçerlidir.

Tablo 6.1. Farklı basınçlarda püskürtülen 60 mesh garnet aşındırıcılarının hesaplanan partikül besleme hızı değerleri

Püskürtme basıncı (bar)	Püskürtme süresi (s)	Partiküllerin ilk ağırlığı (g)	Partiküllerin son ağırlığı (g)	Partiküllerin ağırlık farkı (test süresince püskürtülen aşındırıcı ağırlığı) (g)	Hesaplanan partikül besleme hızı (g/s)
1	14,5	1051	808	243	16,75
2	8	1200	1050	150	18,75

Her testin başında numuneler Şekil 5.5'te gösterilen elektronik terazi kullanılarak 0,1 mg hassasiyetle tartılmıştır. Test bitiminde ise numunelerin yüzeyi hava püskürtülerek temizlenmiş ve tekrar elektronik terazi ile tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Sonrasında gönderilen püskürtme basıncına göre Tablo 6.1'de hesaplanmış olan partikül besleme hızı (g/s) ile erozyon test süresi (s) çarpılarak aşındırıcı ağırlığı (g) elde edilmiştir. Denklem (6.1) kullanılarak hedef malzemede meydana gelen ağırlık kaybının, bu kayba neden olan aşındırıcı partiküllerin toplam ağırlığına bir diğer deyişle test süresi (s) x partikül besleme hızına (g/s) oranı ile erozyon oranı (g/g) değerleri elde edilmiştir.

Tablo 6.2’de erozyon oranlarının hesaplanması için kullanılan parametreler ve hesaplanan erozyon oranlarından bazıları gösterilmiştir.

$$\text{Erozyon Oranı (ER) (g/g)} = \frac{\Delta m_s}{m_e} = \frac{\text{Hedef malzemenin ağırlık kaybı (g)}}{\text{Gönderilen partiküllerin toplam ağırlığı (g)}} \quad (6.1)$$

Tablo 6.2. Erozyon oranının hesaplanması için kullanılan parametreler ve malzemelerin bazı hesaplanan erozyon oranları

Malzeme	Püskürtme basıncı (bar)	Test süresi (s)	Partikül çarpma açısı (°)	Erozyon öncesi numune ağırlığı (g)	Erozyon sonrası numune ağırlığı (g)	Partikül besleme hızı (g/s)	Partiküllerin ağırlığı (g)	Erozyon Oranı x 10 ⁻⁵ (g/g)
Kestamid	1	20	30	37,8534	37,8499	19,175	383,5	0,912646675
Kestoil	1	20	30	38,4193	38,416	19,175	383,5	0,860495437
Kestlub	1	20	30	33,3845	33,3805	19,175	383,5	1,043024772

Şekil 5.7’de gösterilen bir temassız üç boyutlu lazer optik profilometre ile testlerden sonra aşınmış yüzeylerdeki erozyon krater derinliğinin maksimum olduğu noktadan geçen kesit profili üzerinden pürüzlülük ve erozyona uğramış numune yüzeyi üzerinden yüzey topografyası ölçümleri için yüzey taraması yapılarak Ra, Rt, Sa, Sq ve Pt gibi pürüzlülük değerleri ve hedef malzeme yüzeylerinin topografyaları elde edilmiştir.

Numunelerin malzeme türüne, çarpma açısına, maruz kalma süresine ve püskürtme basıncına göre erozyon oranları, yüzey topografyaları ve pürüzlülük değerleri incelenmiştir.

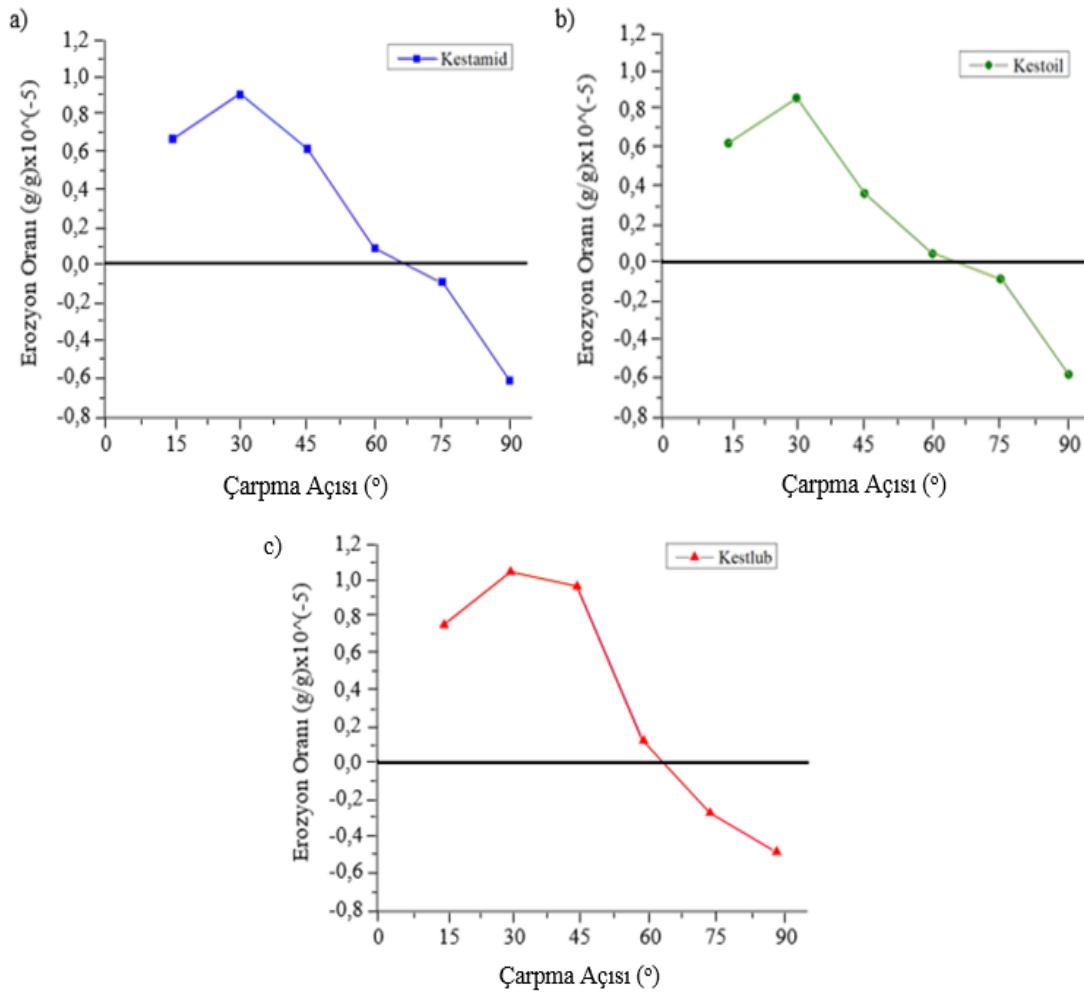
6.2. Çarpma Açısına Bağlı Olarak Erozyon Oranları

Bu kısımda kestamid, kestoil ve kestlub malzemeye farklı çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) katı partikül erozyonu uygulanarak erozyon oranları incelenmiştir.

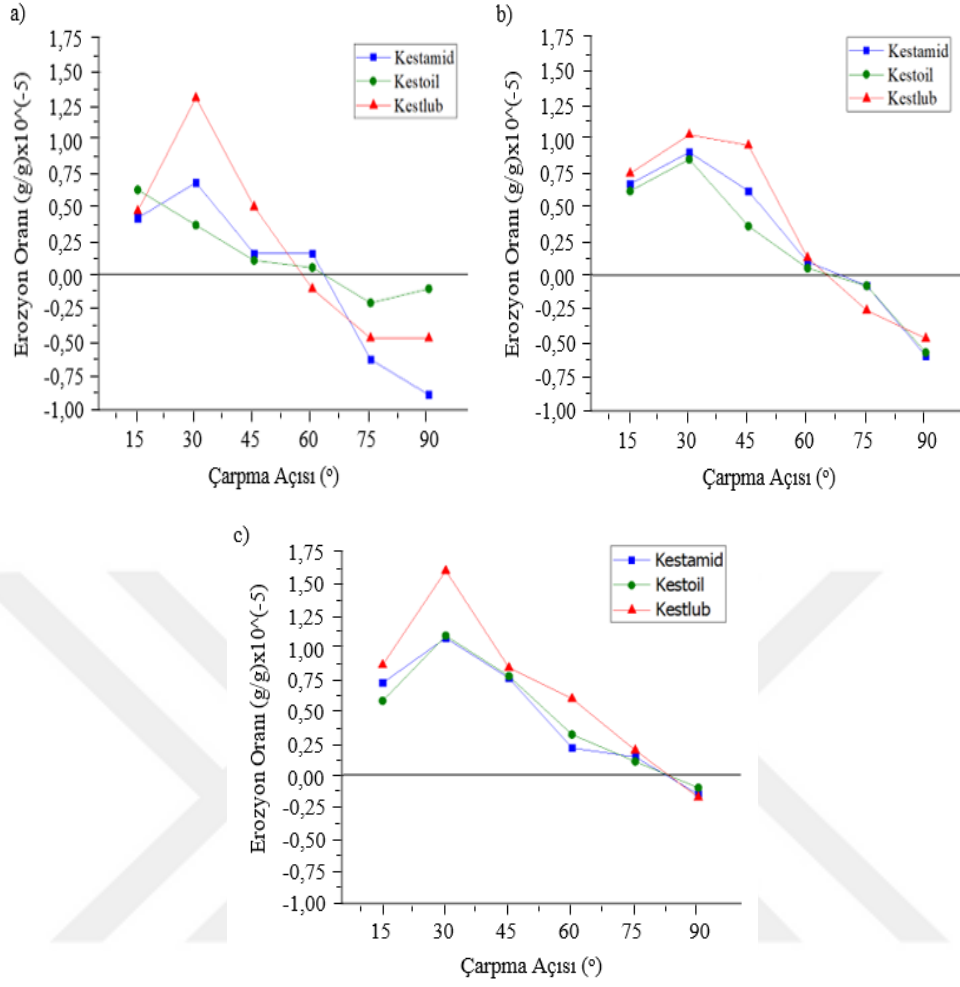
Şekil 6.1’de 1 bar püskürtme basıncı ve 20 s maruz kalma süresinde tüm numuneler için ayrı ayrı çarpma açısına bağlı erozyon oranları gösterilmektedir.

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’te farklı maruz kalma süreleri ve basınçlarda numunelerin çarpma açısına göre elde edilen erozyon oranları gösterilmektedir.

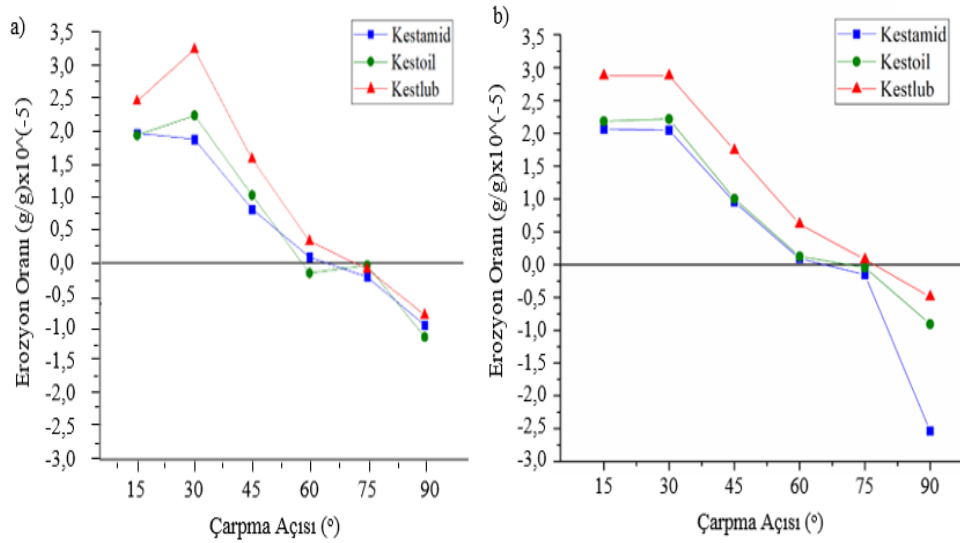
Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'e bakıldığında deneysel sonuçlardan, çalışma koşulları sabit tutularak yapılan katı partikül erozyonu testlerinde çarpma açısının değişimiyle erozyon oranlarının önemli miktarda değişim gösterdiği, tüm malzemelerde 15°-30° çarpma açılarında daha fazla erozif aşınma meydana gelirken genellikle 30°'de maksimum erozyon oranı elde edilerek sünek erozyon davranışı gösterdiği ve çarpma açısı arttıkça erozyon oranlarında düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bu durum düşük çarpma açılarında kesme ve sürme hareketinden sorumlu olan partikülün yatay hız bileşeninin büyük olması sebebiyle numune yüzeyinden mikro kesme ve mikro sürme erozyon mekanizmalarıyla malzeme kaldırılması ve sünek malzemelerde mikro kesme ve mikro sürme erozyon mekanizmalarıyla malzeme kaldırma gerçekleştiğinden kestamid ve kompozitlerinin düşük çarpma açılarında erozyon oranlarının daha yüksek olması ve çarpma açısı arttıkça erozyon oranlarında düşüş meydana gelmesi şeklinde açıklanabilir.



Şekil 6.1. Numunelerin 1 bar püskürtme basıncı ve 20 s maruz kalma süresinde çarpma açısına bağlı olarak erozyon oranları a) kestamid, b) kestoil, c) kestub



Şekil 6.2. Numunelerin 1 bar basınçta çarpma açısına bağlı erozyon oranları a) 10 s maruz kalma süresinde, b) 20 s maruz kalma süresinde, c) 30 s maruz kalma süresinde



Şekil 6.3. Numunelerin 2 bar basınçta çarpma açısına bağlı erozyon oranları a) 10 s maruz kalma süresinde, b) 20 s maruz kalma süresinde

Malzemelerin hepsinde yüksek açılarda inkübasyon periyodu ile ağırlık artışı görülürken bu durum literatürdeki sünek malzemelerde yüksek açılarda partikül gömülmesi gerçekleşeceğini destekler ve bu malzemelerin inkübasyon periyodundaki ağırlık artışı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Malzemelerde 10 s ve 20 s maruz kalma sürelerinde, 75°'de gözlenen inkübasyon periyodunda basıncın artırılması dolayısıyla parçacık kinetik enerjisi artar. Açının darbeye neden olan bileşeni artarken sürme etkisi gösteren bileşeni de artmaktadır ve sünek malzemelerde kesme ve sürme yoluyla erozyon meydana geldiği için basıncın artmasıyla bu açıda inkübasyonun yanı sıra erozyon meydana gelebileceği için parçacıkların gömülme oranı azalmış olabilir.

90° çarpma açısında ise inkübasyon periyodunda basıncın artmasıyla tüm malzemelerde gömülen parçacık ağırlığı artmıştır. Bu, basıncın artmasıyla darbeye neden olan hız bileşeninde artış meydana getirmesi ve parçacıkların kinetik enerjisinin artarak daha yüksek bir enerjiyle hedef malzemeye çarpan aşındırıcı parçacıkların malzemeye gömülme oranının daha fazla olmasından kaynaklanabilir.

Erozyon oranı sonuçları, kestamid ve kestoilin erozif aşınma performansının birbirine çok yakın olduğunu, kestlubun erozyon oranının kestamid ve kestoile göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla en az erozif aşınma direncinin kestlub malzemesinde görüldüğü, buna bağlı olarak da yağlayıcı katkıları bulunan kestlubun erozyon oranının diğer malzemelere göre daha yüksek olması sebebiyle literatürde de belirtildiği üzere yağlayıcı katkıların erozif aşınmayı artırıcı etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Yağlayıcı katkıların erozif aşınmayı artırmasının yanı sıra aşınma ve darbe dayanımını artırıcı dolgulara sahip olan kestoil malzemesinin saf kestamidle benzer erozyon oranları göstermesi ve kestluba kıyasla daha düşük aşınma sergilemesinin kestluba nazaran sertliği daha düşük bir sünek malzeme olarak ve içeriğindeki partikül dolguların malzemenin darbe enerjisinin büyük bir kısmını absorbe etmesi ve geriye daha az enerji mevcut olarak polimer malzemedeki hasar başlangıcını geciktirmesi, iyi arayüzey yapışması sağlayarak aşınmayı azaltması gibi durumlardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

6.3. Basınca Bağlı Olarak Erozyon Oranları

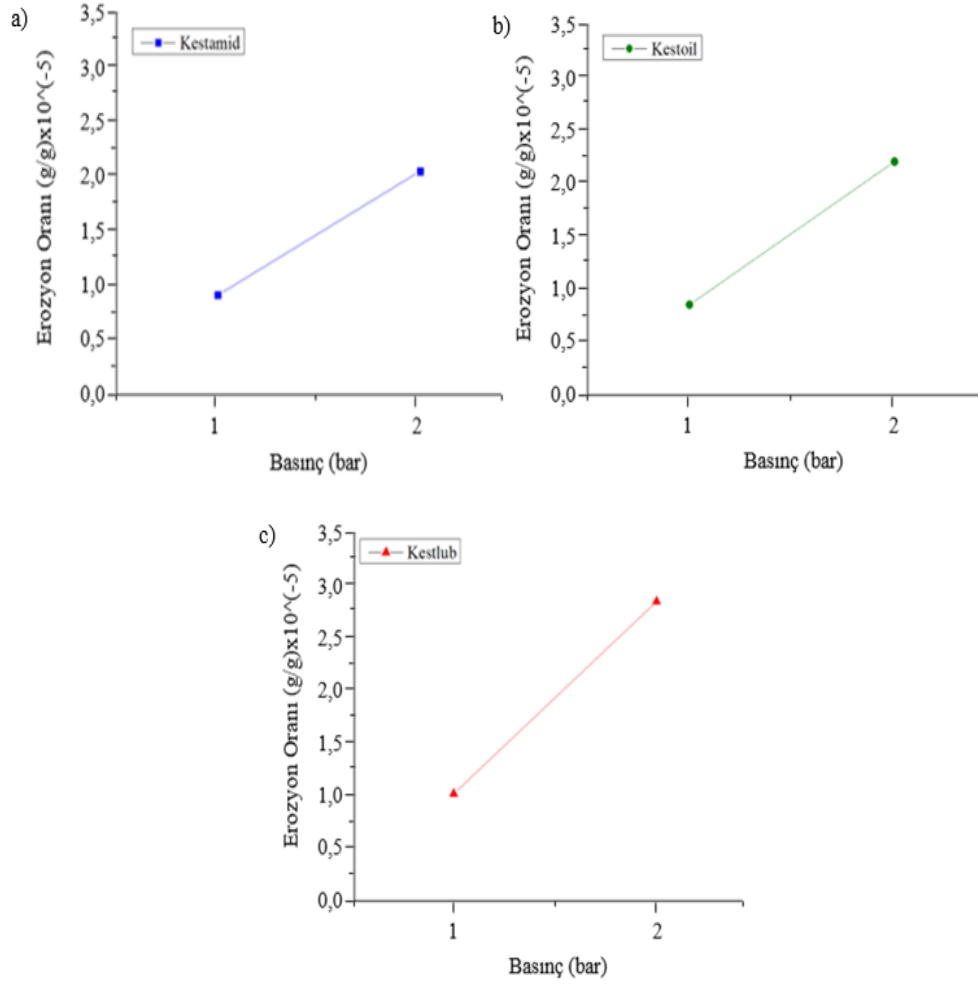
Bu kısımda kestamid, kestoil ve kestlub malzemeye farklı püskürtme basınçlarında (1 bar ve 2 bar) katı partikül erozyonu uygulanarak erozyon oranları incelenmiştir.

Şekil 6.4'te tüm numuneler için ayrı ayrı 30° çarpma açısı ve 20 s maruz kalma süresinde basınç değişimine bağlı erozyon oranları gösterilmiştir. Şekil 6.5'te numunelerin 30° çarpma açısında, 10 s ve 20 s maruz kalma süresi için basınca göre erozyon oranları gösterilmiştir. Şekil 6.6'da 1 bar ve 2 bar basınçta, 10 s ve 20 s maruz kalma sürelerinde basınç ve çarpma açısına bağlı olarak numunelerin erozyon oranları gösterilmektedir.

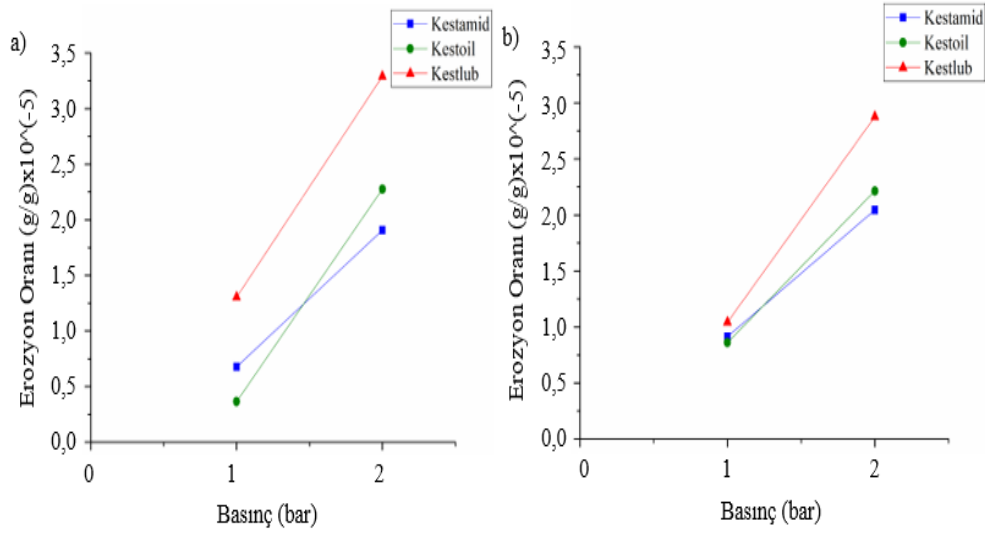
Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'ya bakıldığında tüm malzemelerde genel olarak basınç arttıkça erozyon oranının arttığı görülmektedir. Bu durum, püskürtme basıncı arttıkça çarpma hızının artarak partikül kinetik enerjisinin daha yüksek olması dolayısıyla hedef malzemeye daha yüksek enerji aktarılması ve partikül besleme hızının (g/s) artarak hedef malzemeye daha fazla miktarda aşındırıcının çarpması şeklinde açıklanabilir. Maksimum erozyonun gözlemlendiği açı genel olarak 30° olduğu için grafiklerde 30° çarpma açısında gösterim yapılmıştır. Diğer parametreler için de benzer gözlemler yapıldığından burada gösterilmemiştir.

Şekil 6.6'ya bakıldığında, basınç arttıkça 75°'de inkübasyon periyodu dolayısıyla olan ağırlık artışında bir azalma ya da ağırlık kaybı gözlenmekle beraber 90°'de ise basınç artışıyla ağırlık artışı daha fazla olmuştur. Bu durum, 75°'de gözlenen inkübasyon periyodunda basıncın artırılması dolayısıyla parçacık kinetik enerjisinin artarak açının darbeye neden olan bileşeni artarken sürme etkisi gösteren bileşeninin de artması ve sünek malzemelerde kesme ve sürme yoluyla erozyon meydana geldiğinden basıncın artmasıyla bu açıda inkübasyonun yanı sıra erozyon meydana gelebileceği için parçacıkların gömülme oranının azalması, 90°'de ise basıncın artmasıyla darbeye neden olan hız bileşeninde artış meydana getirmesi ve parçacıkların kinetik enerjisinin artarak daha yüksek bir enerjiyle hedef malzemeye çarpan aşındırıcı parçacıkların malzemeye gömülme oranının daha fazla olması şeklinde açıklanabilir.

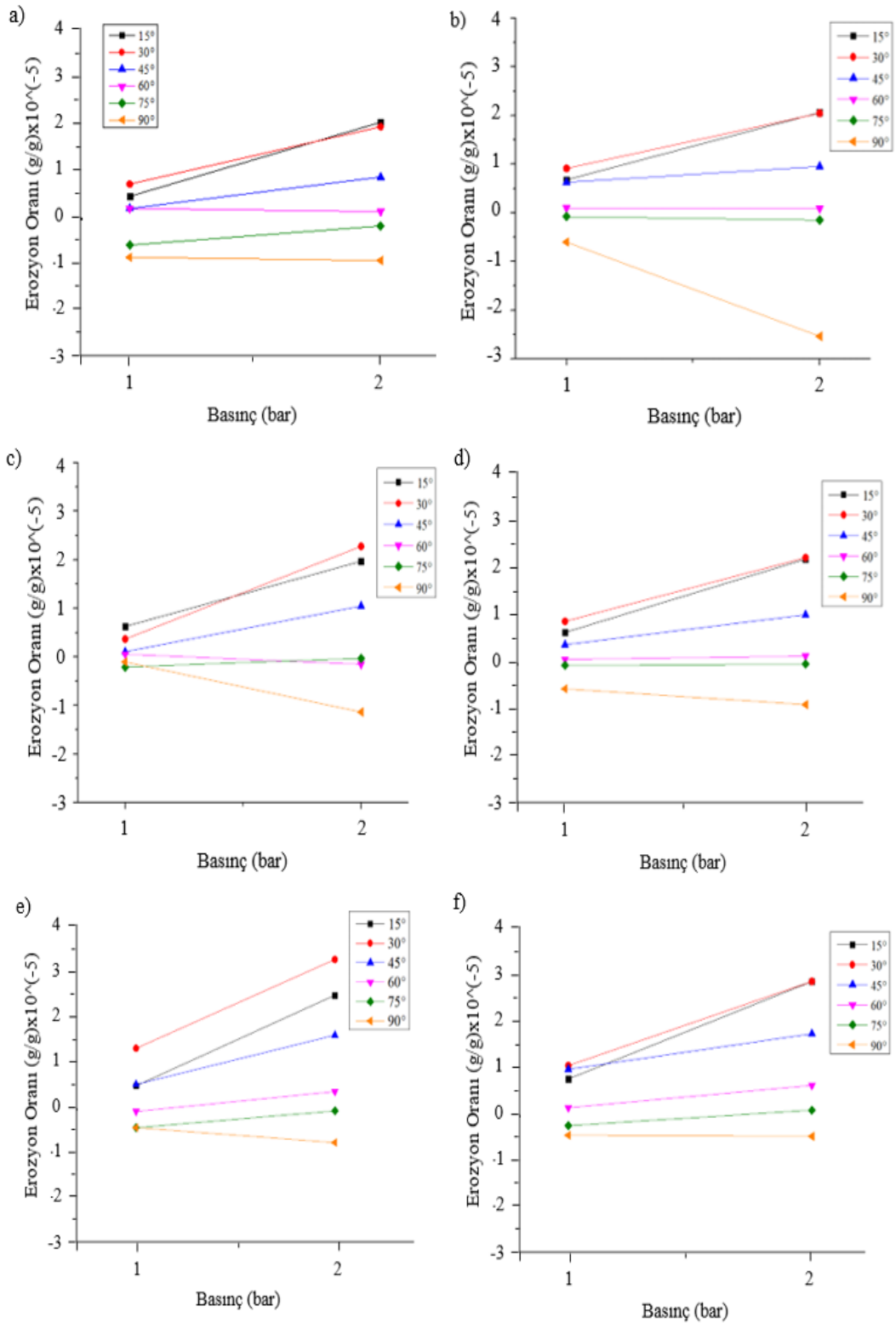
Tüm malzemelerde genel olarak en yüksek erozyon oranı sırasıyla 30°, 15°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarında gerçekleşmiştir.



Şekil 6.4. 30° çarpma açısı ve 20 s maruz kalma süresinde numunelerin basınca bağlı olarak erozyon oranları a) kestamid, b) kestoil, c) kestlub



Şekil 6.5. Numunelerin 30° çarpma açısında 1 bar ve 2 bar basınca bağlı erozyon oranları a) 10 s maruz kalma süresinde, b) 20 s maruz kalma süresinde



Şekil 6.6. 1 bar ve 2 bar basınçta basınç ve çarpma açısına bağlı olarak numunelerin erozyon oranları a) kestamid, 10 s maruz kalma süresi, b) kestamid, 20 s maruz kalma süresi, c) kestoil, 10 s maruz kalma süresi, d) kestoil, 20 s maruz kalma süresi, e) kestlub, 10 s maruz kalma süresi, f) kestlub, 20 s maruz kalma süresi

6.4. Maruz Kalma Süresine Bağlı Olarak Erozyon Oranları

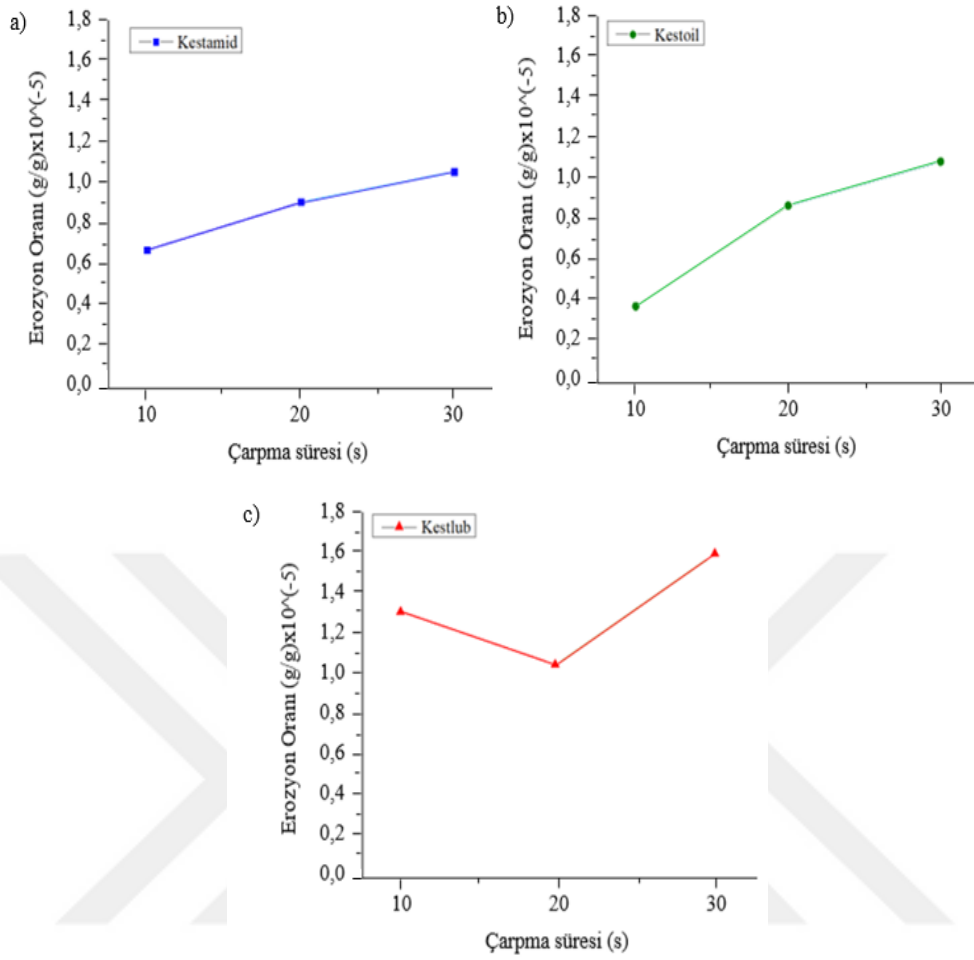
Bu kısımda kestamid, kestoil ve kestlub malzemeye farklı maruz kalma sürelerinde (10 s, 20 s ve 30 s) katı partikül erozyonu uygulanarak erozyon oranları incelenmiştir.

Şekil 6.7’de tüm numuneler için ayrı ayrı 1 bar püskürtme basıncı ve 30° çarpma açısında çarpma süresine bağlı olarak erozyon oranları gösterilmiştir.

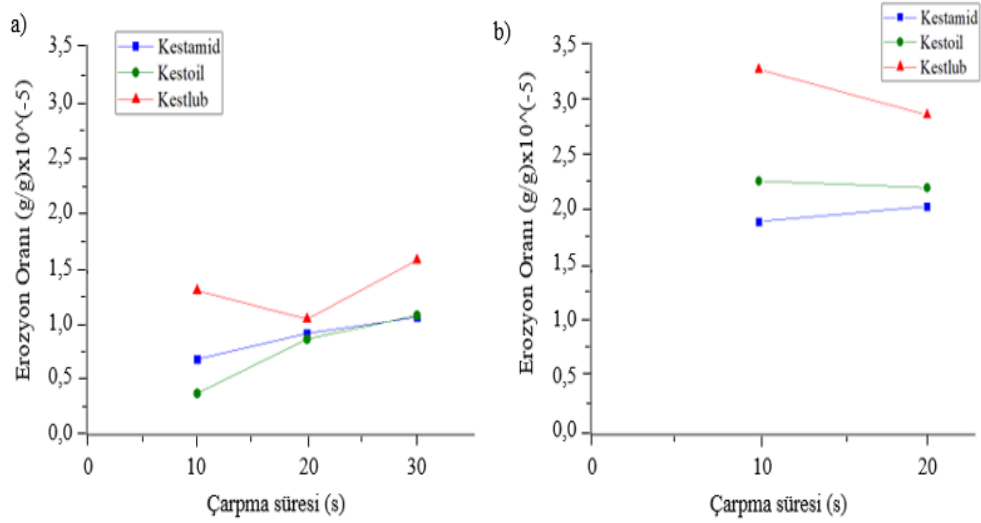
Şekil 6.8’de 1 bar ve 2 bar basınç altında 30° çarpma açısı için numunelerin maruz kalma sürelerine bağlı erozyon oranları gösterilmektedir.

Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’den anlaşılabacağı üzere maruz kalma süresinin artmasıyla genel olarak malzeme yüzeyine daha uzun sürede daha fazla tekrarlı darbe gelerek daha fazla deformasyon ve aşınma meydana gelirken malzemelerde inkübasyon periyodunda gömülmüş olan parçacıkları arkadan gelip malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı parçacıklar kaldırarak erozyon oranının artmasına sebep olur dolayısıyla ağırlık kaybı yaşanmaya başlamıştır. Maksimum erozyonun gözlemlendiği açı genel olarak 30° olduğu için grafiklerde 30° çarpma açısında gösterim yapılmıştır. Diğer parametreler için de benzer gözlemler yapıldığından burada gösterilmemiştir.

Tüm malzemelerde çarpma süresinin artmasıyla erozyon oranlarında artış gözlenirken sadece kestlub malzemesinde 1 bar ve 2 bar püskürtme basıncı için de 30° çarpma açısında 10 saniyeden 20 saniyeye geçerken maruz kalma süresinin artmasıyla erozyon oranında bir miktar azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Diğer çarpma açılarında kestlub malzemesi için maruz kalma süresinin artmasıyla erozyon oranının arttığı gözlemlendiği için 30° çarpma açısında, hedef malzemede meydana gelen ağırlık kaybının bu ağırlık kaybını oluşturmak için kullanılan toplam aşındırıcı ağırlığına bölünmesiyle elde edilen erozyon oranında katı partikül erozyonu uygulanma süresince toplam aşındırıcı ağırlığında artış olmaya devam ederken hedef malzemede aşırı plastik deformasyon dolayısıyla malzeme yüzeyinde sertleşme veya inkübasyon periyodu sebebiyle püskürtülen aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye gömülen aşındırıcı partiküllere çarparak kinetik enerjilerinde azalma olması gibi değişimler meydana gelerek malzeme kaldırmanın gerçekleşmemesi dolayısıyla erozyon oranlarının düşük kalması söz konusu olabileceğini öngörmekteyiz.



Şekil 6.7. Numunelerin 1 bar püskürtme basıncı ve 30° çarpma açısında çarpma süresine bağlı erozyon oranları a) kestamid, b) kestoil, c) kestlub



Şekil 6.8. Numunelerin 30° çarpma açısında çarpma süresine bağlı erozyon oranları a) 1 bar basınç ve 10 s, 20 s, 30 s maruz kalma süresinde, b) 2 bar basınç ve 10 s, 20 s maruz kalma süresinde

6.5. Mekanik Özelliklere Bağlı Olarak Erozyon Oranları

Bu kısımda katı partikül erozyonuna maruz kalmış kestamid, kestoil ve keclub malzemenin mekanik özellikleri ile erozyon oranları arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Üreticinin veri sayfasına göre deneylerde kullanılan kestamid, kestoil, keclub malzemelerin özelliklerinin gösterildiği Tablo 5.1'den kestamid ve keclub kıyaslandığında, elastiklik modülü yani rijitlik, sertlik ve uzama yani süneklik değerleri aynı olmasına rağmen kestamidin çekme dayanımının daha yüksek olduğu dolayısıyla mukavemetinin daha iyi olduğu; kestoil ve keclub kıyaslandığında, elastiklik modülü yani rijitlik değerleri aynı olmasına rağmen keclubun çekme dayanımı ve sertliğinin daha yüksek, uzama yani sünekliğinin daha düşük olduğu dolayısıyla mukavemetinin daha iyi olduğu görülmektedir.

Önceki bölümlerde Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 incelenerek numuneler kıyaslandığında keclubun erozyon oranlarının kestamid ve kestoilden daha yüksek olduğu, kestoil ve keclubun erozif aşınma performansının birbirine çok yakın olduğu ($ER_{keclub} > ER_{kestamid} \approx ER_{kestoil}$) ifade edilmişti.

Malzemelerin mekanik özellikleri ve erozyon performanslarına bakıldığında kestamidin kecluba göre daha iyi mekanik özellik göstermesi sebebiyle daha iyi erozyon direnci gösterdiği sonucu çıkarılabilirken keclub kestoile göre daha iyi mekanik özellik gösterdiği halde daha yüksek erozyon oranları elde edildiği gözlemlendi için mekanik özellikler ile erozyon oranları arasında bir ilişki olmadığı sonucuna varılmıştır.

6.6. Numunelerin Topografya Görüntüleri

Bu kısımda katı partikül erozyonuna maruz kalan kestamid, kestoil ve keclub malzemeye profilometre ile yüzey taraması yapılarak elde edilen yüzey topografyaları incelenmiştir.

Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de numunelerin 1 bar, 20 s maruz kalma süresindeki yüzey topografyaları gösterilmektedir. Buradan numunelerin yüzey dokusunu topografyaları yardımıyla görebiliyoruz. Topografyalara baktığımızda tüm numunelerde 15° çarpma açısında aşınma numune boyunca meydana geldiğinden aşınmanın daha geniş

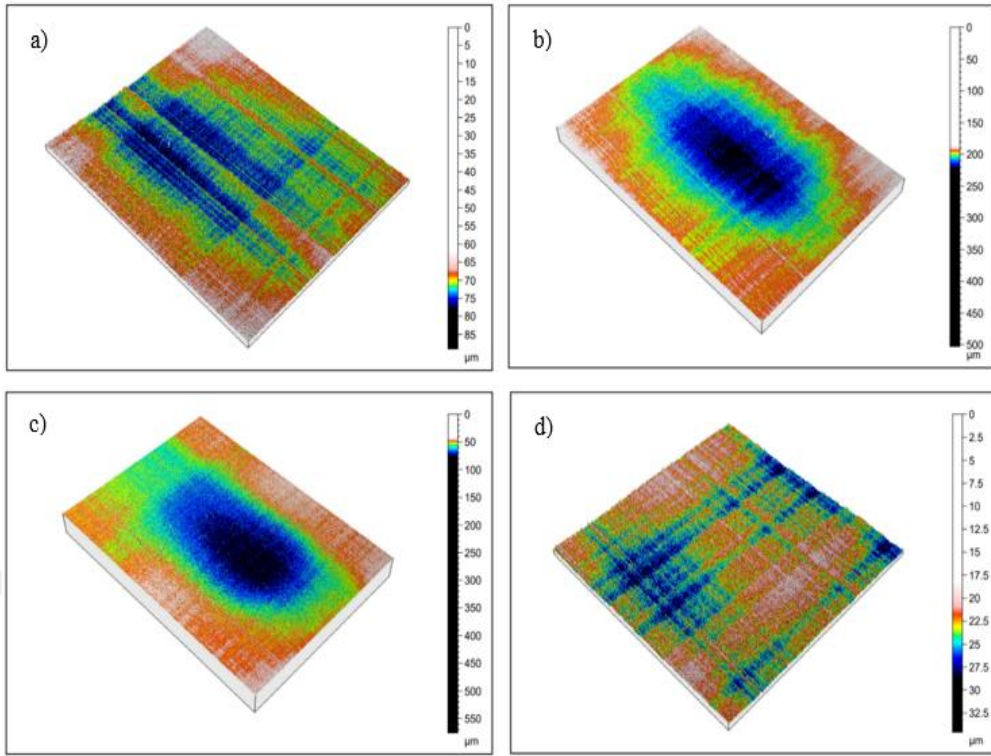
bir alana yayıldığı görülürken 30° ve 45° çarpma açılarında daha lokal bir aşınma gerçekleşmiştir.

Dik çarpma açılarında partikülün yatay hız bileşenine sahip olmayarak sadece darbeden sorumlu olan dikey hız bileşeniyle mikro çatlak oluşumu ve plastik deformasyon erozyon mekanizmaları gözlemlendiğinden ve sünek malzemelerde mikro kesme ve mikro sürme erozyon mekanizmaları ile malzeme kaldırma gerçekleştiğinden aynı zamanda dik açılı çarpmalarda hedef malzemeye çarpan aşındırıcıların arkadan gelen aşındırıcılarla etkileşime girerek saçılması meydana gelebildiğinden 90° çarpma açısında genel olarak aşınma izi derinliğinin düşük olduğu düşünülmektedir.

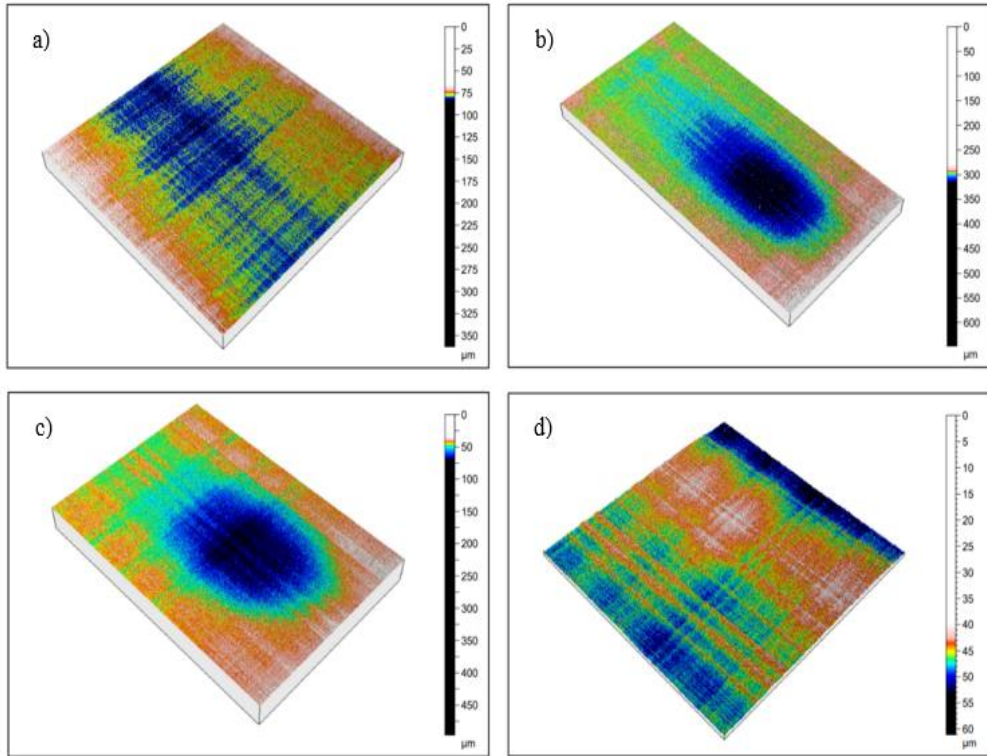
90°'de çarpan aşındırıcıların tam dairesel bir aşınma konisi oluşturması gerektiği düşünülebilir ama yüzey topografyalarına baktığımızda bu durumun görülmemesinin sebeplerinin 90°'de hedef malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinden ayrılırken arkadan malzeme yüzeyine çarpmak için gelen aşındırıcı parçacıklarla etkileşime girerek saçılması, 90° çarpma açısında inkübasyon periyodu gözlemlendiği için çukur oluşmayarak onun yerine partikül saplanmaları gerçekleşmesi, bu açıda inkübasyon periyodu dolayısıyla yüzeye çok yakın partikül saplanmaları olarak yüzeyde aşınma konisinden ziyade çok az bir aşınma izi meydana gelmekle beraber saplanmaların yüzeyde aşınma izi derinliği oluşturmaması bile olabileceği, aşınma izinden de ziyade inkübasyon periyodu vesilesiyle meydana gelen partikül gömülmelerinin tepelik oluşturmalarının bile gözlemlenebileceği olduğu düşünülmektedir.

Genel olarak aşınma izi derinliği en fazla kestlubda meydana gelirken daha sonra onu kestoil malzeme izlemektedir ve tüm numunelerde en fazla aşınma izi derinliğinin kesme ve sürme erozyon mekanizmalarından sorumlu olan partikül yatay hız bileşeni dolayısıyla mikro kesme ve mikro sürme mekanizmalarıyla malzeme kaldırıldığı için aşınma izinin eliptik şekle sahip olduğu gözlemlenmiştir.

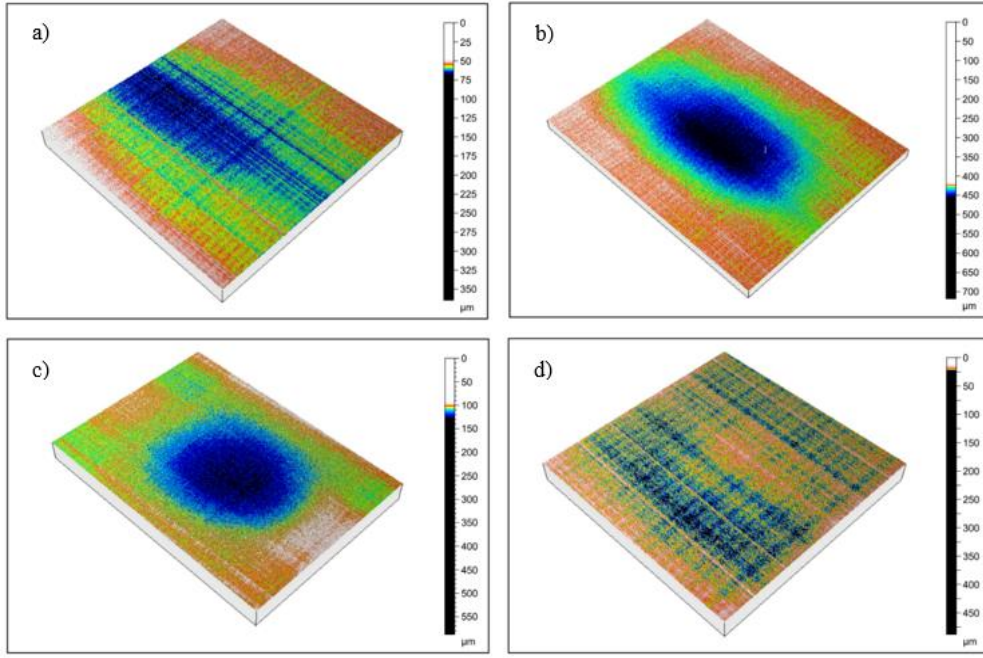
Maksimum aşınma izi derinliğinin sünek erozyon davranışında düşük çarpma açılarında erozyonun fazla olmasından kaynaklı daha geniş ve derin bir hasar geometrisi olarak daha yüksek erozyon oranlarının görüldüğü 30° çarpma açısında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.9. Kestamid malzemenin 1 bar, 20 s maruz kalma süresindeki yüzey topografyaları a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 90°



Şekil 6.10. Kestoil malzemenin 1 bar, 20 s maruz kalma süresindeki yüzey topografyaları a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 90°



Şekil 6.11. Kestlub malzemenin 1 bar, 20 s maruz kalma süresindeki yüzey topografyaları a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 90°

6.7. Numunelerin Pürüzlülük Değerleri

Temassız üç boyutlu lazer profilometre kullanılarak elde edilen Ra, Rt, Sa, Sq ve Pt pürüzlülük değerlerinin olduğu grafikler oluşturulmuştur.

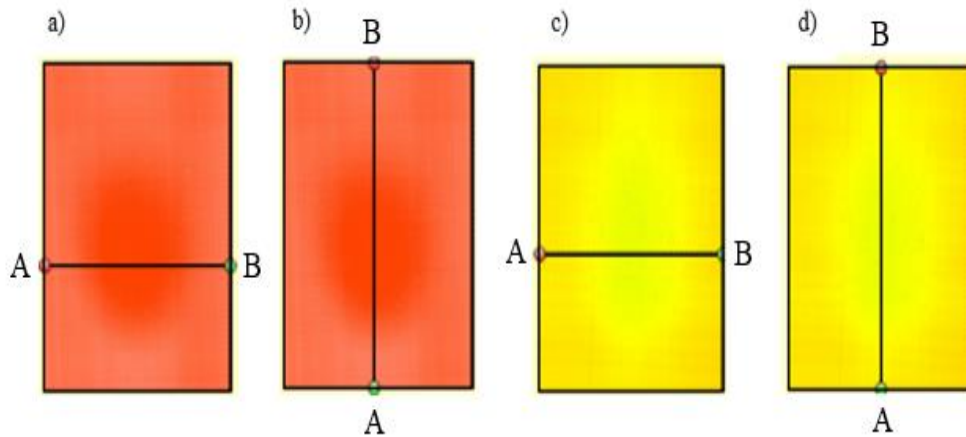
Şekil 6.12’de 1 bar, 45° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için test edilen numunelerden kestlubun erozyon bölgesinin merkezinden alınan yatay (aşınma yönüne dik) ve dikey (aşınma yönüne paralel) pürüzlülüğün çıkarıldığı A-B profili ile 1 bar, 30° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için kestamidin erozyon bölgesinin merkezinden alınan yatay ve dikey pürüzlülüğün çıkarıldığı A-B profili gösterilmiştir. Diğer tüm numuneler de testlerden sonra erozyon bölgesinin merkezinden alınan A-B hatları boyunca taranarak pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.17’de çarpma açılarına bağlı olarak numunelerin bu yatay ve dikey profillerine göre elde edilen yatay ve dikey pürüzlülük değerleri gösterilmektedir.

Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’deki pürüzlülük grafiklerine bakıldığında tüm malzemelerde erozyon yönüne paralel olan dikey profil boyunca aşınma

gerçekleştirdiğinden bu hat boyunca yatay profile kıyasla pürüzlülük farkı daha az olup aşınma yönüne dik olan yatay profil hattı boyunca aşındırıcı parçacıkların temas ederek aşındırdığı ve aşındırıcılarla etkileşimde bulunmaması dolayısıyla aşınmanın gerçekleşmediği bölgelerin bir arada bulunması sebebiyle genel olarak yatay pürüzlülük değerlerinin dikeylere göre daha fazla olduğu görülmektedir.

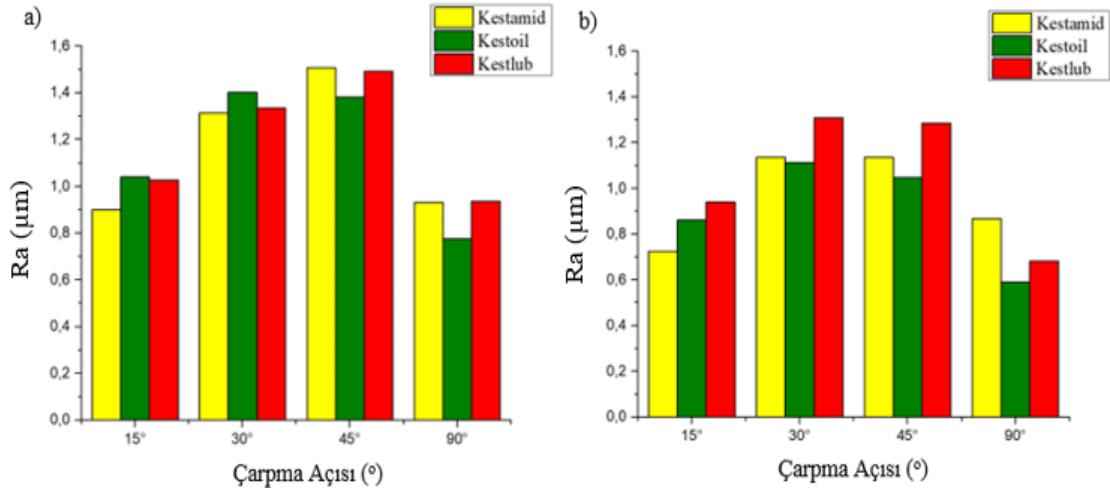
Şekil 6.13-6.17'ye bakıldığında Ra, Rt, Sa, Sq ve Pt pürüzlülük değerleri için benzer sonuçlar elde edilmiş olup genel olarak 15° ve 90°'de yüzey pürüzlülüklerinin daha düşük, 30° ile 45° gibi aşınmanın fazla olduğu açılarda yüzey pürüzlülüğü değerlerinin de fazla olduğu dolayısıyla aşınma ile yüzey pürüzlülüğü arasında benzerlik görülerek bir uyum olduğu gözlenmiştir. Bu, aşınmanın daha fazla olduğu yerde malzeme yüzeyinin de daha pürüzlü olduğu anlamına gelmektedir, aşınan yüzeyin pürüzlülüğü erozyon nedeniyle meydana gelen ağırlık kaybı ile ilişkilidir.



Şekil 6.12. Bazı malzemelerin pürüzlülüğünün çıkarıldığı profilin gösterimi a) 1 bar, 45° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için kestlubun yatay profili, b) 1 bar, 45° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için kestlubun dikey profili, c) 1 bar, 30° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için kestamidin yatay profili, d) 1 bar, 30° çarpma açısı, 20 s maruz kalma süresi için kestamidin dikey profili

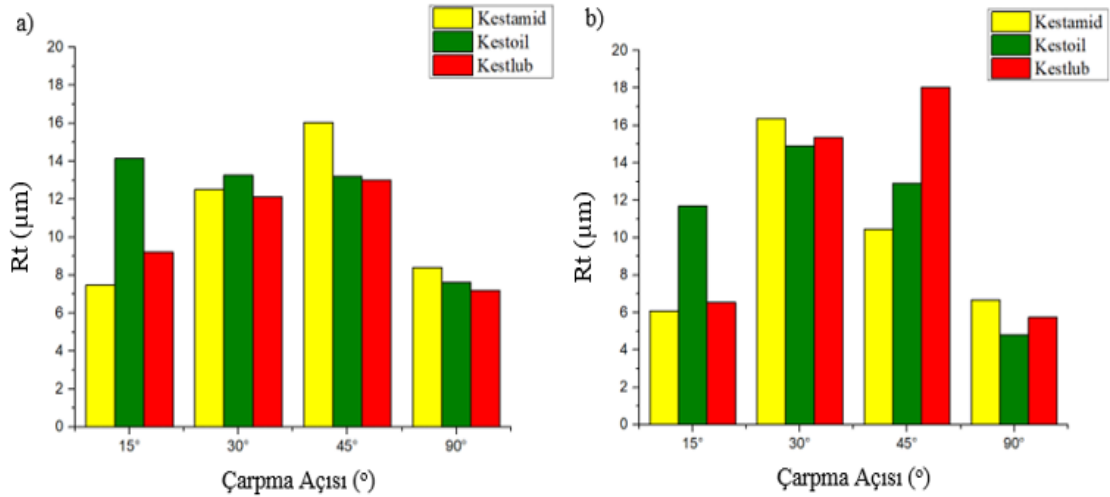
Şekil 6.13'te 1 bar, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Ra pürüzlülük değerleri gösterilmektedir.

Ra, pürüzlülük profiliyle merkez ortalama çizgisinin altında kalan alanların toplamının mesafeye bölünmesiyle elde edilen ortalama pürüzlülüğü ifade eder (<https://web.itu.edu.tr/gulmezt/Metroloji/Metroloji%20Bolum%208.pdf>; <https://www.teknolab.info/hizmetler/yuzey-puruzluluk-testi>).



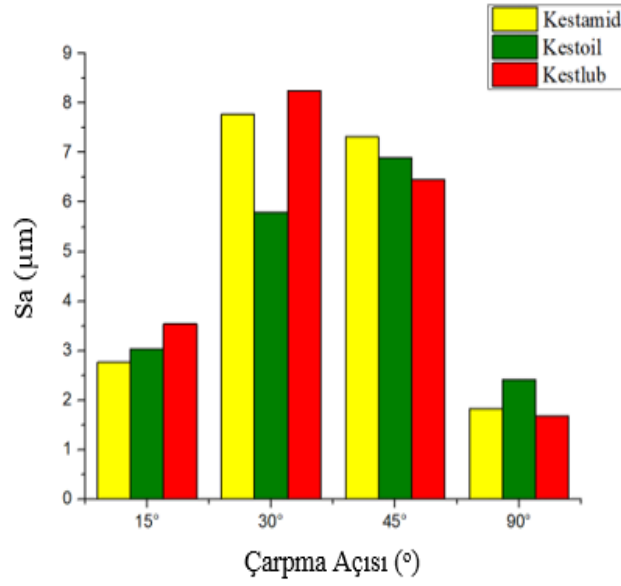
Şekil 6.13. 1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Ra pürüzlülük değerleri a) yatay, b) dikey

Rt, pürüzlülük profilinde en yüksek tepeden en derin çukura olan dikey mesafeyi ifade eden profilin en büyük yüksekliğidir (<https://web.itu.edu.tr/gulmezt/Metroloji/Metroloji%20Bolum%208.pdf>; <https://www.teknolab.info/hizmetler/yuzey-puruzluluk-testi>). Şekil 6.14'te 1 bar, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Rt pürüzlülük değerleri gösterilmektedir.



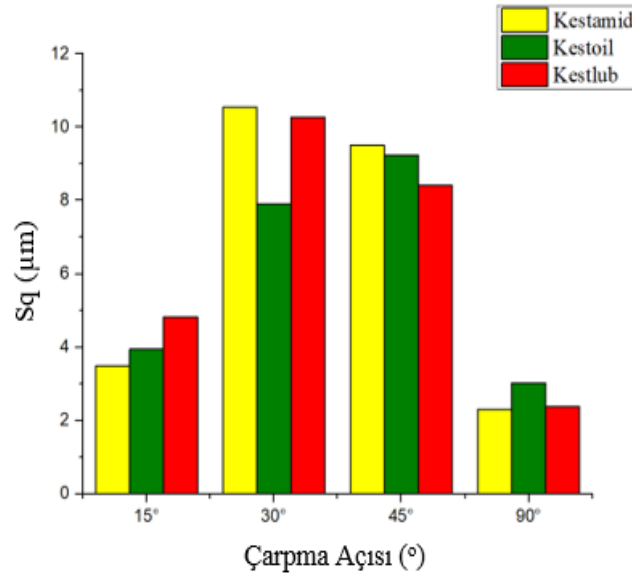
Şekil 6.14. 1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Rt pürüzlülük değerleri a) yatay, b) dikey

Sa, pürüzlülük profillerinin altında kalan alanların aritmetik ortalaması olan alansal pürüzlülüğü ifade eder. Şekil 6.15'te 1 bar, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Sa pürüzlülük değerleri gösterilmektedir.



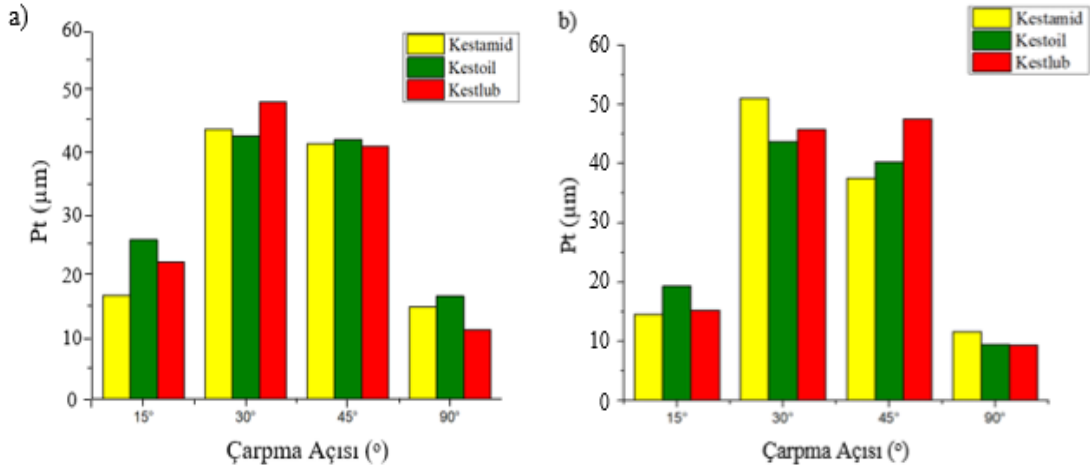
Şekil 6.15. 1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Sa pürüzlülük değerleri

Sq, pürüzlülük yüksekliklerinin kareleri toplamının karekök ortalamasını ifade eder. Şekil 6.16'da 1 bar, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Sq pürüzlülük değerleri gösterilmektedir.



Şekil 6.16. 1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Sq pürüzlülük değerleri

Pt, meydana gelen erozyon kraterinin en derin noktası ile malzeme yüzeyinin en üst noktası arasındaki mesafeyi ifade eder. Şekil 6.17'de 1 bar, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Pt pürüzlülük değerleri gösterilmektedir.

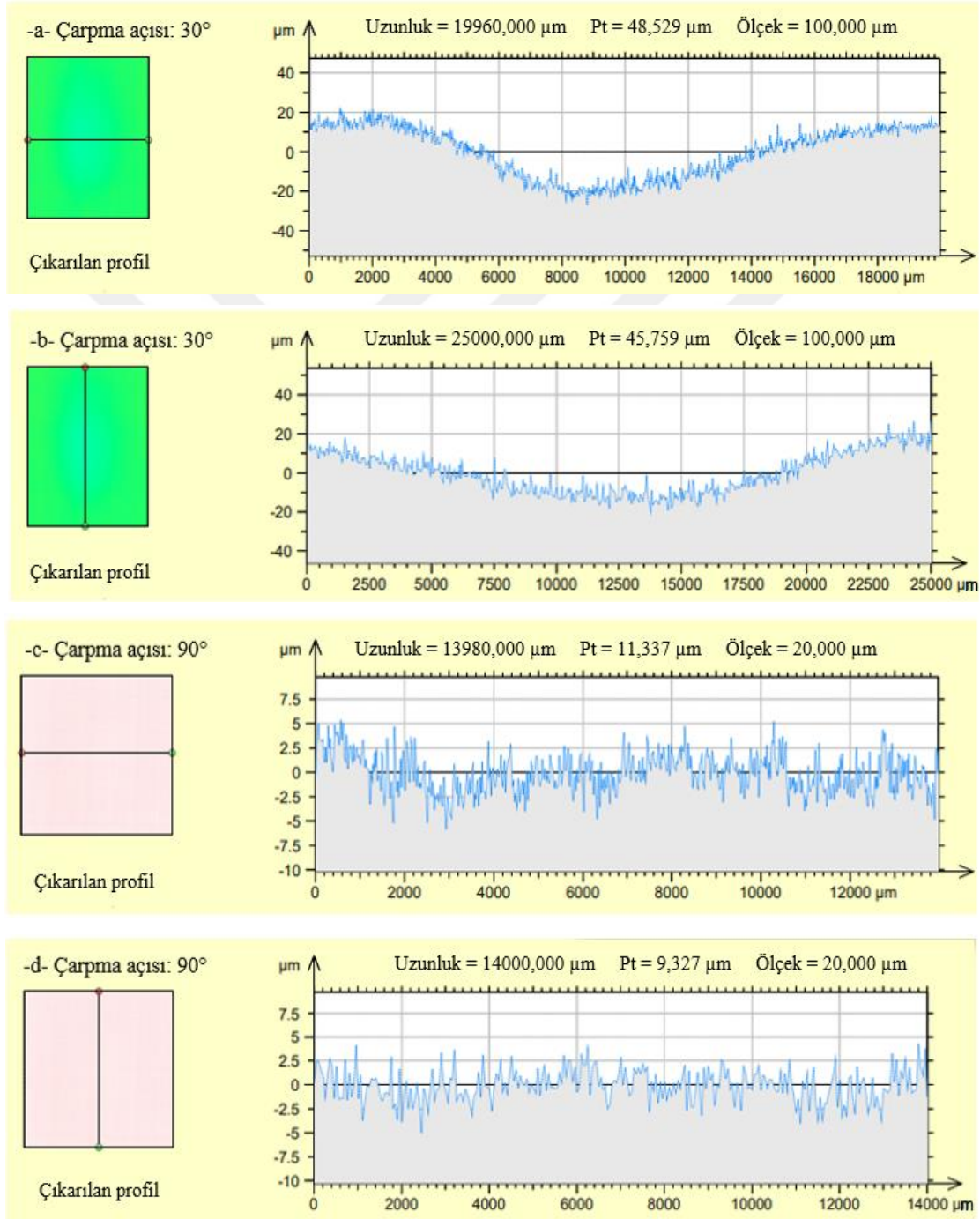


Şekil 6.17. 1 bar basınç, 20 s maruz kalma süresinde numunelerin Pt pürüzlülük değerleri a) yatay, b) dikey

Şekil 6.18'de 1 bar, 20 s maruz kalma süresinde kestlub numunesinin 30° ve 90° çarpma açısında erozyon bölgesinin merkezinden alınan yatay ve dikey hattın pürüzlülükleri gösterilmektedir. Şekillerin sol tarafında pürüzlülüğün belirlendiği hattın konumu sağ tarafında ise bu hattın numune kalınlığı boyunca pürüzlülük profili ifade edilmekte olup kalınlık kesiti boyunca 30° çarpma açısında aşınan kestlub malzemesinin erozyon kraterinin yatay merkez hattı pürüzlülük profili Şekil 6.18a'da, dikey merkez hattı pürüzlülük profili Şekil 6.18b'de, kalınlık kesiti boyunca 90° çarpma açısında aşınan kestlub malzemesinin erozyon krateri yatay merkez hattı pürüzlülük profili Şekil 6.18c'de ve dikey merkez hattı pürüzlülük profili Şekil 6.18d'de gösterilmektedir. Şekil 6.18'de görüldüğü üzere, tüm malzemelerde erozyon yönüne paralel olan dikey profil boyunca aşınma gerçekleştiğinden bu hat boyunca yatay profile kıyasla pürüzlülük farkı daha az olup aşınma yönüne dik olan yatay profil hattı boyunca aşındırıcı parçacıkların temas ederek aşındırdığı ve aşındırıcılarla etkileşimde bulunmaması dolayısıyla aşınmanın gerçekleşmediği bölgelerin bir arada bulunması sebebiyle yatay pürüzlülük değerlerinin dikeylere göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 6.18a ve b'de numunenin merkez bölgesinde tekrarlı aşındırıcı partikül çarpmasıyla malzemenin kaldırıldığı geniş bir hacmin olduğu net bir şekilde görülebilmektedir. Şekil 6.18c ve d'de, 30° çarpma açısında olduğu gibi (Şekil 6.18a ve b) numunenin merkez bölgesinde geniş ve derin bir krater olmayıp 30° çarpma açısındaki kesit görünümüne kıyasla 90°'de malzeme kaldırmanın çok daha az olduğu görülmektedir. Bu durum diğer

numuneler ve tüm numunelerin erozyon bölgesinin merkezinden alınan yatay ve dikey profilleri için de geçerlidir. Diğer parametreler için de benzer gözlemler yapıldığından burada gösterilmemiştir. Elde edilen sonuçlardan 30° çarpma açısında maksimum ve 90° çarpma açısında minimum erozyon oranı gözlenmesi sebebiyle yüzey pürüzlülüğünün erozyon oranlarıyla iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 6.18. Erozyon testlerinden sonra kestlub malzemesinin yüzey pürüzlülük merkez profilleri a) 30° - yatay, b) 30° - dikey, c) 90° - yatay, d) 90° - dikey (1 bar, 20 s için)

7. SONUÇLAR

Kestamid polimer malzeme, onun yağlayıcı katkılı hali olan kestlub ve yağlayıcı katkılı, aşınma ve darbe dayanımını artırıcı partikül dolgulu hali olan kestoil malzemenin çeşitli çarpma açıları, basınç ve maruz kalma sürelerinde katı partikül erozyonunun incelendiği bu çalışmaya dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

Malzemelerin katı partikül erozyonu davranışı hedef malzemenin türüne, çarpma açısına, maruz kalma süresine ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Partikül çarpma açısı hedef malzemenin erozif aşınma davranışlarına etki eden önemli parametrelerden biridir. Çalışma koşulları sabit tutularak yapılan katı partikül erozyonu testlerinde bütün malzemeler için en yüksek erozyon oranının düşük çarpma açılarında (15° - 30°) gerçekleşmesi dolayısıyla sünek erozyon davranışı sergiledikleri gözlemlenmiştir.

Maruz kalma süresi arttıkça malzemelerin erozyon oranları artmıştır. Malzemelerin hepsinde inkübasyon periyodu ile ağırlık artışı görülürken maruz kalma sürelerinin artmasıyla ağırlıklarında azalma meydana gelmiştir.

Basınç arttıkça malzemelerin erozyon oranları da artarken 75° 'deki inkübasyon periyodu sebebiyle meydana gelen ağırlık artışında azalma gerçekleştiği, 90° 'deki inkübasyon periyodu sebebiyle meydana gelen ağırlık artışında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Malzemelerin mekanik özellikleri ve erozyon oranları kıyaslandığında mekanik özellikleri kestlubdan daha iyi olan kestamid ve daha düşük olan kestoilin daha iyi erozyon direnci sergilemesi sebebiyle malzemelerin mekanik özellikleriyle erozyon oranları arasında bir ilişki bulunamayarak katı partikül erozyonunun malzemenin mekanik özelliklerinden bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır.

15° ve 90° 'de yüzey pürüzlülüklerinin daha düşük, 30° ile 45° gibi aşınmanın fazla olduğu açılarda yüzey pürüzlülüğü ve erozyon krateri derinliğinin de fazla olduğu dolayısıyla aşınma ile yüzey pürüzlülüğü arasında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Bu, aşınmanın daha fazla olduğu yerde malzeme yüzeyinin de daha pürüzlü olduğu

anlamına gelmektedir, aşınan yüzeyin pürüzlülüğü erozyon nedeniyle meydana gelen ağırlık kaybı ile ilişkilidir.

Tüm numunelerde erozyon yönüne dik doğrultuda olan yatay profil hattı pürüzlülük değerlerinin erozyon yönüne paralel doğrultuda olan dikey profil hattı pürüzlülük değerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Kestamid ve kestoil malzemelerin erozif aşınma performansı birbirine çok yakın bulunmuştur. En yüksek aşınma izi derinliği ve en az erozif aşınma direnci kestlub malzemesinde görülüp yağlayıcı katkıları bulunan kestlubun erozyon oranının diğer malzemelere göre daha yüksek olması sebebiyle yağlayıcı katkıların erozif aşınmayı artırıcı etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Acar, D., Meriç, D., Budur, A. İ., Gümrük, R., Sofuoğlu, H., Gedikli, H., Cora, Ö. N. (2017). Experimental Investigations on Particle Erosion Behavior of AA 6061 Alloy. *9th Ankara International Aerospace Conference*, Ankara, Turkey, 20-22 September 2017.
- Anand, K., Hovis, S. K., Conrad, H., Scattergood, R.O. (1987). Flux Effects in Solid Particle Erosion. *Wear*, 118(2), 243-257. DOI: 10.1016/0043-1648(87)90146-3
- Anderson, K., Karimi, S., Shirazi, S. (2021). Erosion Testing and Modeling of Several Non-Metallic Materials. *Wear*, 477, 203811. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203811
- Arjula, S., Harsha, A. P., Ghosh, M. K. (2008). Solid Particle Erosion Behavior of High Performance Thermoplastic Polymers. *Journal of Materials Science*, 43(6), 1757-1768. DOI: 10.1007/s10853-007-2405-0
- Arjula, S., Harsha, A. P. (2006). Study of Erosion Efficiency of Polymers and Polymer Composites. *Polymer Testing*, 25(2), 188-196. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2005.10.009
- Arnold, J. C., Hutchings, I. M. (1990). The Mechanisms of Erosion of Unfilled Elastomers By Solid Particle Impact. *Wear*, 138(1-2), 33-46. DOI: 10.1016/0043-1648(90)90166-8
- Arslan, G., Fidan, S., Sınmazçelik, T. (2018). Solid Particle Erosion Behavior of Carbon Fiber-Metal Wire Hybrid Reinforced Polymer Composites. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 5(1), 182-190.
- Arslan, G. (2017). Hava Araçlarında Yıldırımsavar Hibrit Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonunun Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 511152.
- Atia, A. M., Ali, W. Y. (2016). Particle Erosion of Epoxy Resin. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 3(5), 4780-4784.
- Avcu, E., Fidan, S., Yıldırım, Y., Sınmazçelik, T. (2013). Solid Particle Erosion Behaviour of Ti6Al4V Alloy. *Tribology*, 7(4), 201-210. DOI: 10.1179/1751584X13Y.0000000043
- Bagci, M. (2013). Erosion Wear Performance of Borax Filled Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites by Using The Taguchi Experimental Design. *World Tribology Congress, Torino, Italy, 8-13 September 2013*.
- Bagci, M., Imrek, H. (2011). Solid Particle Erosion Behaviour of Glass Fibre Reinforced Boric Acid Filled Epoxy Resin Composites. *Tribology International*, 44(12), 1704-1710. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.06.033

- Barkoula, N. M., Gremmels, J., Karger-Kocsis, J. (2001). Dependence of Solid Particle Erosion on The Cross-Link Density in An Epoxy Resin Modified By Hygrothermally Decomposed Polyurethane. *Wear*, 247(1), 100-108. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00529-9
- Barkoula, N. M., Karger-Kocsis, J. (2002). Review Processes and Influencing Parameters of The Solid Particle Erosion of Polymers and Their Composites. *Journal of Materials Science*, 37(18), 3807- 3820. DOI: 10.1023/a:1019633515481
- Biswas, S., Satapathy, A. (2010). A Study on Tribological Behavior of Alumina-Filled Glass-Epoxy Composites Using Taguchi Experimental Design. *Tribology Transactions*, 53(4), 520-532. DOI: 10.1080/10402000903491309
- Brandstädter, A., Goretta, K. C., Routbort, J. L. (1991). Solid Particle Erosion of Bismaleimide Polymers. *Wear*, 147(1), 155-164. DOI: 10.1016/0043-1648(91)90126-F
- Budur, A. İ., Gedikli, H. (2019). Metalik Malzemelerin Yüksek Hızlardaki Erozyon Davranışının DeneySEL İncelenmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(3), 559-572. DOI: 10.36306/konjes. konjes.613864
- Cai, F., Gao, F., Pant, S., Huang, X., Yang, Q. (2015). Solid Particle Erosion Behaviors of Carbon-Fiber Epoxy Composite and Pure Titanium. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(1), 290-296. DOI: 10.1007/s11665-015-1848-8
- Can, H., Tan, E. (2018). Investigation of Tribological Behaviors of Pure, Self-Lubricating and Heat Resistant Cast Polyamide Materials. *European International Journal of Science and Technology*, 7(4).
- Ćurković, L., Kumić, I., Grilec, K. (2011). Solid Particle Erosion Behaviour of High Purity Alumina Ceramics. *Ceramics International*, 37(1), 29-35. DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.08.029
- Debnath, U. K., Chowdhury, M. A., Nuruzzaman, D. M., Rahman, M. M., Roy, B. K., Kowser, M. A., Islam, M. M. (2015). Erosion Characteristics Of Teflon Under Different Operating Conditions. *Journal of Polymer Engineering*, 35(9), 889-904. DOI: 10.1515/polyeng-2014-0359
- Erdoğan, A. A., Feyzullahoğlu, E., Fidan, S., Sinmazçelik, T. (2020). Investigation of Erosive Wear Behaviors of AA6082-T6 Aluminum Alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. DOI: 10.1177/1464420719899686
- Fang, M., Ma, Y., Zhang, N., Huang, M., Lu, B., Tan, K, Liu, C., Shen, C. (2020). Solid Particle Erosion Resistance and Electromagnetic Shielding Performance of Carbon Fiber Reinforced Polycarbonate Composites. *Material Research Express*, 7, 045305. DOI: 10.1088/2053-1591/ab6fa6

- Formisano, B. R., Bonten, C. (2019). Recycling of Cast Polyamide 6 Using A Lubricant. DOI: 10.1063/1.5084802
- Fouad, Y., El-Meniawi, M., Afifi, A. (2011). Erosion Behaviour of Epoxy Based Unidirectional (GFRP) Composite Materials. *Alexandria Engineering Journal*, 50(1), 29-34. DOI: 10.1016/j.aej.2011.01.005
- Getu, H., Spelt, J.K., Papini, M. (2011). Reduction of Particle Embedding in Solid Particle Erosion of Polymers. *Wear*, 270(11-12), 922-928. DOI: 10.1016/j.wear.2011.02.012
- Harsha, A. P., Tewari, U. S., Venkatraman, B. (2003). Solid Particle Erosion Behaviour of Various Polyaryletherketone Composites. *Wear*, 254(7-8), 693-712. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00143-1
- Harsha, A. P., Thakre, A. A. (2007). Investigation on Solid Particle Erosion Behaviour of Polyetherimide and Its Composites. *Wear*, 262(7-8), 807-818. DOI: 10.1016/j.wear.2006.08.012
- Ibrahim, S. A. (2020). Development of Submerged Abrasive Water Jet System and Investigation The Performance by Machinability of Castamide Material. Doctorate Thesis, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 649402.
- Ibrahim, S. A., Korkmaz, S., Cetin, M. H., Kartal, F. (2020). Performance Evaluation of The Submerged Abrasive Water Jet Turning Process for Improving Machinability of Castamide. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.06.009
- İpek, H. (2011). Cam Elyaf Takviyeli Kestamid Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 285400.
- Khalfan, O. M. (2008). Dış Yüklerin Erozif Aşınma Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 178823.
- Kumar, R., Malaval, B., Antonov, M., Zhao, G. (2020). Performance of Polyimide and PTFE Based Composites Under Sliding, Erosive and High Stress Abrasive Conditions. *Tribology International*, 147, 106282. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106282
- Lamy, B. (1984). Effect of Brittleness Index and Sliding Speed on The Morphology of Surface Scratching in Abrasive or Erosive Processes. *Tribology International*, 17(1), 35-38. DOI: 10.1016/0301-679X(84)90083-5
- Levy, A. V., Chik, P. (1983). The Effects of Erodent Composition and Shape on The Erosion of Steel. *Wear*, 89(2), 151-162. DOI: 10.1016/0043-1648(83)90240-5

- Mahapatra, S. S., Patnaik, A. (2009). Study on Mechanical and Erosion Wear Behavior of Hybrid Composites Using Taguchi Experimental Design. *Materials and Design*, 30(8), 2791-2801. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.01.037
- Miyazaki, N., Takeda, N. (1993). Solid Particle Erosion of Fiber Reinforced Plastics. *Journal of Composite Materials*, 27(1), 21-31. DOI: 10.1177/002199839302700102
- Mohan, N., Natarajan, S., Babu, S. P., Siddaramaiah, S., Lee, J. H. (2012). Studies on Erosive Wear Behavior of UHMWPE-Filled Aramid-Epoxy Hybrid Composites. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(4), 430-435. DOI: 10.1080/10426914.2011.578004
- Nayak, S. K., Satapathy, A., Mantry, S. (2021). Impact of Process Parameters on Solid Particle Erosion Behavior of Waste Marble Dust-Filled Polyester Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(8), 7197-7209. DOI: 10.1007/s13369-020-05175-1
- Neis, P. D., Ferreira, N. F., Poletto, J. C., Sukumaran, J., Andó, M., Zhang, Y. (2017). Tribological Behavior of Polyamide-6 Plastics and Their Potential Use in Industrial Applications. *Wear*, 376-377, 1391-1398. DOI: 10.1016/j.wear.2017.01.090
- Osswald, T. A., Menges, G. (2010). *Material Science of Polymers for Engineers* (3rd ed.) (3-20). Munich: Hanser Publication.
- Önen, B. (2016). Farklı Nozul Geometrilerinin Polimetilmetakrilat (PMMA) Yüzeyinde Katı Partikül Erozyonunun İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 436227.
- Önen, B., Fidan, S., Sınmazçelik, T., Çınar, A. (2016). Eroziyon Aşınma Davranışına Nozuldaki Çap Daralmasının Etkileri. VI. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI, Kocaeli, Türkiye, 28-30 Eylül 2016.
- Öztürk, B., Gedikli, H., Kılıçarslan, Y. (2019). Erosive Wear Characteristics of E-Glass Fiber Reinforced Silica Fume and Zinc Oxide-Filled Epoxy Resin Composites. *Polymer Composites*, 1-12. DOI: 10.1002/pc.25372
- Özzaim, P., Korkusuz, O. B., Fidan, S., Sınmazçelik, T. (2022). Investigation of Particle Erosion of Polytetrafluoroethylene and Its Composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. DOI: 10.1177/14644207221081964
- Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S., Dash, R. R. (2007). A Modeling Approach for Prediction of Erosion Behavior of Glass Fiber-Polyester Composites. *Journal of Polymer Research*, 15(2), 147-160. DOI: 10.1007/s10965-007-9154-2

- Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S., Dash, R. R. (2008). A Taguchi Approach for Investigation of Erosion of Glass Fiber – Polyester Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(8), 871-888. DOI: 10.1177/0731684407085728
- Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S., Dash, R. R. (2008). Implementation of Taguchi Design for Erosion of Fiber-Reinforced Polyester Composite Systems with SiC Filler. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(10), 1093-1111. DOI: 10.1177/0731684407087688
- Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S., Dash, R. R. (2008). Parametric Optimization Erosion Wear of Polyester-GF-Alumina Hybrid Composites Using The Taguchi Method. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(10), 1039-1058. DOI: 10.1177/0731684407086867
- Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S., Dash, R.R. (2009). Tribo-Performance of Polyester Hybrid Composites: Damage Assessment and Parameter Optimization Using Taguchi Design. *Materials and Design*, 30(1), 57-67. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.04.057
- Patnaik, A., Satapathy, A., Navin, C., Barkoula, N. M., Biswas, S. (2010). Solid Particle Erosion Wear Characteristics of Fiber and Particulate Filled Polymer Composites: A Review. *Wear*, 268(1-2), 249-263. DOI: 10.1016/j.wear.2009.07.021
- Rajesh, J. J., Bijwe, J., Tewari, U. S., Venkataraman, B. (2001). Erosive Wear Behavior of Various Polyamides. *Wear*, 249(8), 702-714. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00695-0
- Rao, S., Varadarajan, Y. S., Rajendra, N. (2015). Erosive Wear Behaviour of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composite. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 2975-2983. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.280
- Rout, A. K., Satapathy, A. (2013). Study on Mechanical and Erosion Wear Performance of Granite Filled Glass-Epoxy Hybrid Composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 229(1), 38-50. DOI: 10.1177/1464420713499483
- Roy, M., Vishwanathan, B., Sundararajan, G. (1994). The solid particle erosion of polymer matrix composites. *Wear*, 171(1-2), 149-161. DOI: 10.1016/0043-1648(94)90358-1
- Sarı, A., Nteziyaremye, Ö. S. (2016). Polimer Yatak Malzemelerin Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 446-453.
- Sezer, H. (2017). AA 6082-T6 Alaşımında Farklı Aşındırıcıların Katı Partikül Erozyonuna Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 511185.

- Shahapurkar, K., Darekar, V., Banjan, R., Nidasosi, N., Soudagar, M. E. M. (2020). Factors Affecting The Solid Particle Erosion of Environment Pollutant and Natural Particulate Filled Polymer Composites—A Review. *Polymers and Polymer Composites*. DOI: 10.1177/0967391120971411
- Shimizu, K., Xinba, Y., Araya, S. (2011). Solid Particle Erosion and Mechanical Properties of Stainless Steels at Elevated Temperature. *Wear*, 271(9-10), 1357-1364. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.038
- Shinde, S., Patil, P., Bhojwani, V. (2018). Investigation of Erosion Phenomena and Influencing Factors Due to The Presence of Solid Particles in The Flow: A Review. *International Journal of Ambient Energy*, 42(11), 1326-1334. DOI: 10.1080/01430750.2018.1550016
- Sınmazçelik, T., Taşkıran, İ. (2007). Erosive Wear Behaviour of Polyphenylenesulphide (PPS) Composites. *Materials and Design*, 28(9), 2471-2477. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.08.007
- Sinmazcelik, T., Sari, N. Y., (2009). Erodent Size Effect on The Erosion of Polyphenylene Sulfide Composite. *Polymer Composites*, 31(6), 985-994. DOI: 10.1002/pc.20883
- Srivastava, V. K., Pawar, A. G. (2006). Solid Particle Erosion of Glass Fibre Reinforced Flyash Filled Epoxy Resin Composites. *Composites Science and Technology*, 66(15), 3021-3028. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.02.004
- Suresh, A., Harsha, A. P., Ghosh, M. K. (2009). Solid Particle Erosion of Unidirectional Fibre Reinforced Thermoplastic Composites. *Wear*, 267(9-10), 1516-1524. DOI: 10.1016/j.wear.2009.03.041
- Şimşek, A. (2020). Güçlendirilmiş Döküm Poliamidin Otomotiv Jantı Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 623027.
- Tewari, U. S., Harsha, A. P., Häger, A. M., Friedrich, K. (2002). Solid Particle Erosion of Unidirectional Carbon Fibre Reinforced Polyetheretherketone Composites. *Wear*, 252(11-12), 992-1000. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00063-7
- Turgut, D. (2012). Farklı Tür Sıvı Ortamlarda Tutulan Kestamid Malzemelerde Darbe Dayanımının Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 326992.
- Vite-Torres, M., Laguna-Camacho, J. R., Baldenebro-Castillo, R. E., Gallardo-Hernández, E. A., Lasorsa, C. A., Villagrán-Villegas, L. Y. (2014). Study of Solid Particle Erosion on AISI D2 Using Angular Silicon Carbide and Steel Round Grit Particles. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 8(2), 105-110. DOI: 10.1179/1751584X13Y.0000000057

- Walley, S. M., Field, J. E., Yennadhiou, P. (1984). Single Solid Particle Impact Erosion Damage on Polypropylene. *Wear*, 100(1-3), 263-280. DOI: 10.1016/0043-1648(84)90016-4
- Yanatma, S. (2011). Kontrollü Polimerizasyon Yöntemiyle Organik / Anorganik Polimerik Kompozit Malzemelerin Sentezi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 300987.
- Yıldıran, Y. (2013). 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 342538.
- Zahavi, J., Schmitt, G. F. (1981). Solid Particle Erosion of Reinforced Composite Materials. *Wear*, 71(2), 179-190. DOI: 10.1016/0043-1648(81)90337-9
- URL-1: <https://docplayer.biz.tr/107339326-Metallerin-yerini-alan-endustriyel-plastik-kestamid-dokum-poliamid-kestamid-polikim-in-tescilli-markasidir.html>, (Ziyaret Tarihi: 18 Ekim 2021).
- URL-2: <https://nanovea.com/instruments/ps50/>, (Ziyaret Tarihi: 9 Mart 2022).
- URL-3: <https://web.itu.edu.tr/gulmezt/Metroloji/Metroloji%20Bolum%208.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 12 Aralık 2021).
- URL-4: <https://www.anadolukumlama.com/#>, (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2021).
- URL-5: <https://www.polikim.com.tr/>, (Ziyaret Tarihi: 6 Ekim 2021).
- URL-6: <https://www.teknolab.info/hizmetler/yuzey-puruzluluk-testi>, (Ziyaret Tarihi: 17 Aralık 2021).
- URL-7: <http://www.kozaymakina.com.tr/kumlama-malzemeleri>, (Ziyaret Tarihi: 2 Ekim 2021).
- URL-8: <http://www.torkmetal.com/urun.asp?id=25>, (Ziyaret Tarihi: 5 Şubat 2022).
- URL-9: http://www.turmetaldisli.com/?attachment_id=1208, (Ziyaret Tarihi: 28 Mart 2022).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Akpınar, S. E., Sınmazçelik, T. (2022). Kestamid ve Kompozitlerinin Eroziyon Aşınma Davranışının İncelenmesi. 2. *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu*, Balıkesir, Türkiye, 02-05 Mart 2022.



ÖZGEÇMİŞ

Seden Ezgi AKPINAR ilk ve orta öğrenimini Balıkesir, lise ve üniversite öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2016 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’ndeki Lisans eğitimini 2020 yılında 3,18 not ortalaması ile tamamladı. 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

