

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AŞINDIRICI PARTİKÜLLERİN PTFE MATRİSLİ POLİMER  
KOMPOZİTLERİN PARTİKÜL EROZYONUNA ETKİLERİ**

**PELİN ÖZZAİM**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AŞINDIRICI PARTİKÜLLERİN PTFE MATRİSLİ POLİMER**  
**KOMPOZİTLERİN PARTİKÜL EROZYONUNA ETKİLERİ**

**PELİN ÖZZAİM**

**Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Prof. Dr. Aziz Armağan ARICI**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Dr. Öğr. Üyesi Cihan KABOĞLU**  
**Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniversitesi** .....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 14.06.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Katı partikül erozyonu, yüksek hızlarda hareket eden aşındırıcı partiküllerin hedef yüzeye çarpıp bu malzemeyi aşındırmasıdır ve hedef yüzeyden malzeme koparma esaslı bir aşınma türüdür. Bu, makine elemanları ve mühendislik malzemelerine zarar veren bir süreçtir. Fakat aşınmaya etki eden faktörler iyi şekilde bilinirse aşınma nasıl kontrol altına alınır ya da partikül erozyonu yüzey pürüzlendirme veya temizleme gibi amaçlar doğrultusunda iyi yönde nasıl kullanılır tahmin yürütülebilir. Operasyon parametreleri, hedef malzeme özellikleri, aşındırıcı partikül özellikleri gibi faktörlerin etkisi altında gerçekleşen katı partikül erozyonu oldukça karmaşık bir süreçtir. Bu süreç literatürde yoğun şekilde çalışılmaktadır.

PTFE havacılık, otomotiv, savunma, gıda işleme, elektrik ve biyomedikal endüstrilerindeki uygulamalarıyla bilinir. Özellikle kendi kendini yağlama özelliği, yük taşıma kapasitesi ve düşük yoğunluğu nedeniyle tribolojik uygulamalarda kullanılır. Bu malzemeler yoğun şekilde katı partikül erozyonuna maruz kaldığından bunların erozif aşınma davranışının karakterize edilmesi büyük önem taşır.

Bu tez çalışmasında PTFE malzeme ve kompozitlerinin farklı aşındırıcı partiküller kullanımında gösterdiği erozif aşınma davranışının detaylı şekilde incelenmesi ve çıktıların akademik ve endüstriyel çalışmalara katkı sağlaması amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında her türlü imkân ve desteği sağlayan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Sinan Fidan'a ve bilgi, birikim ve tecrübesiyle yol gösterici olan ve sürekli cesaretlendiren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tamer Sınmazçelik'e bana verdiği tüm emekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi her konuda desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen canım annem Sevim Özzaim ve canım babam Adem Özzaim'e üzerimdeki tüm emekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Haziran-2021

Pelin ÖZZAİM

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ .....	1
1. POLİMERLER VE KOMPOZİTLER .....	4
1.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri .....	5
1.1.1. Kompozit malzemelerin bileşenleri .....	6
1.1.1.1. Fiber takviyeli kompozitler .....	6
1.1.1.2. Partikül takviyeli kompozitler .....	7
1.1.1.3. Yapısal kompozitler .....	8
1.1.2. Polimer matris kompozitler .....	10
1.2. Floropolimerler.....	11
1.2.1. Teflon (PTFE) malzemenin tipik özellikleri.....	11
1.2.2. Teflon (PTFE) malzeme üretimi.....	12
2. KATI PARTİKÜL EROZYONU .....	14
2.1. Partikül Erozyonu Mekanizmaları.....	15
2.1.1. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı.....	16
2.1.2. Aşındırıcı partiküllerin çarpma hızı.....	20
2.1.3. Aşındırıcı şekli.....	20
2.1.4. Aşındırıcı partikül boyutu.....	21
2.1.5. Aşındırıcı partikül sertliği.....	21
2.1.6. Aşındırıcı partikül yoğunluğu.....	21
2.1.7. Partiküller arası etkileşim .....	22
2.1.8. Sıcaklık .....	23
2.1.9. Hedef malzeme özellikleri.....	23
2.2. Polimer Matris Kompozitlerin Eroziyon Aşınması .....	24
3. AŞINDIRICI PARTİKÜL .....	26
3.1. Garnet Aşındırıcı .....	31
3.2. Alümina Aşındırıcı.....	32
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	34
5. MALZEME VE YÖNTEM.....	38
5.1. Malzeme .....	38
5.1.1. Hedef malzeme .....	38
5.1.2. Aşındırıcı malzeme .....	41
5.1.3. Yöntem.....	44
5.1.3.1. Erozyon testleri.....	44
5.1.3.2. Erozyon oranı hesapları.....	45
5.1.3.3. SEM analizleri .....	45
5.1.3.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.....	46

6. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	47
6.1. Katı Partikül Erozyonu Test Sonuçları.....	47
6.2. SEM Çalışmaları .....	55
6.3. Yüzey Profilometresi Çalışmaları .....	62
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	74
KAYNAKLAR .....	76
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	80
ÖZGEÇMİŞ .....	81



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Özelliklere göre malzeme karşılaştırma (a) saf metaller ve kompozit malzemeler (b) seramikler, polimerler ve kompozitler.....	5
Şekil 1.2.	Süreksiz fiber takviyeli kompozitlerin şematik diyagramı (a) süreksiz uzun fiberli ve yönlendirilmiş (b) süreksiz kısa fiberli ve yönlendirilmiş (c) süreksiz kısa ve rastgele yönelimli.....	7
Şekil 1.3.	Partikül takviyeli kompozit türleri (a) büyük partikül (b) dispersiyonla kuvvetlendirilmiş.....	8
Şekil 1.4.	Yapısal kompozitlerin şematik diyagramı (a) tabakalı kompozit (b) sandviç panel.....	8
Şekil 1.5.	Boyuna bir yüke maruz kalan sürekli fiber takviyeli kompozitin, fiberin ve sünek matrisin gerilme-gerinim eğrisinin şematik diyagramı.....	9
Şekil 2.1.	Polimerlerin ve kompozitlerin erozif aşınma performansına etki eden çeşitli faktörler.....	15
Şekil 2.2.	Erozyon tipik davranış biçimlerinin şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.3.	Sünek malzemede beklenen erozyon mekanizması (a) çarpmadan önce (b) krater oluşumu ve kraterin bir tarafında biriken malzeme (c) malzemenin yüzeyden ayrılması.....	18
Şekil 2.4.	Gevrek malzemede beklenen erozyon mekanizması (a) koni çatlağı ve orta çatlakların büyümesi (b) orta çatlağın kapanması ve yanal çatlakların oluşması (c) erozyona uğramış krater oluşması.....	18
Şekil 2.5.	Sünek malzemenin yüzey morfolojisi (a) çarpma açısı=30° ve (b) çarpma açısı=90°.....	19
Şekil 2.6.	Kırılgan malzemenin yüzey morfolojisi (a) çarpma açısı=30° ve (b) çarpma açısı=90°.....	19
Şekil 2.7.	Akış yoğunluğu (a) eğik çarpma simülasyonu ve (b) dik çarpma simülasyonu.....	23
Şekil 3.1.	Aşındırıcı partiküller için temel şekil tanımlamaları (a) grit ve (b) bilya.....	26
Şekil 3.2.	Garnet aşındırıcı malzeme için yuvarlaklık-küresellik diyagramı.....	27
Şekil 3.3.	Görüntü işleme tekniği ile değerlendirilen çelik bilye partiküllerinin dairesellik faktörleri.....	30
Şekil 5.1.	Aşındırıcı partiküllerin mikroskop görüntüleri (a) garnet ve (b) alümina.....	41
Şekil 5.2.	Katı partikül erozyonu kuşlama kabini düzeneği.....	44
Şekil 5.3.	SEM cihazı.....	46
Şekil 5.4.	Optik profilometre.....	46
Şekil 6.1.	Saf PTFE malzeme yüzeyine Garnet ve Alümina aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı püskürtülmesi durumunda erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi.....	47

Şekil 6.2.	Cam fiber takviyeli PTFE malzeme yüzeyine Garnet ve Alümina aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı püskürtülmesi durumunda erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi.....	48
Şekil 6.3.	Bronz partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine Garnet ve Alümina aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı püskürtülmesi durumunda erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi.....	49
Şekil 6.4.	Karbon partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine Garnet ve Alümina aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı püskürtülmesi durumunda erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi.....	50
Şekil 6.5.	Garnet aşındırıcı püskürtülmesi durumunda malzemelerde çarpma açısına bağlı olarak değişen erozyon oranı değerleri.....	51
Şekil 6.6.	Alümina aşındırıcı püskürtülmesi durumunda malzemelerde çarpma açısına bağlı olarak değişen erozyon oranı değerleri.....	52
Şekil 6.7.	Saf PTFE malzemenin SEM görüntüleri.....	56
Şekil 6.8.	Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri.....	56
Şekil 6.9.	Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri.....	57
Şekil 6.10.	Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri.....	58
Şekil 6.11.	Saf PTFE malzemenin SEM görüntüleri.....	59
Şekil 6.12.	Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri.....	60
Şekil 6.13.	Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri.....	60
Şekil 6.14.	Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri.....	61
Şekil 6.15.	Saf PTFE malzemenin aşındırılması durumundaki yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet / 45°, (b) Alümina / 45°, (c) Garnet / 90°, (d) Alümina / 90°.....	62
Şekil 6.16.	Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin aşındırılması durumundaki yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet / 45°, (b) Alümina / 45°, (c) Garnet / 90°, (d) Alümina / 90°.....	63
Şekil 6.17.	Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla saf PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri.....	64
Şekil 6.18.	Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla saf PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri.....	65
Şekil 6.19.	Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla cam fiber takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri.....	66
Şekil 6.20.	Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla cam fiber takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Rt değerleri.....	66
Şekil 6.21.	Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin aşındırılması durumundaki yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet / 45°, (b) Alümina / 45°, (c) Garnet / 90°, (d) Alümina / 90°.....	67

Şekil 6.22. Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin aşındırılması durumundaki yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet / 45°, (b) Alümina / 45°, (c) Garnet / 90°, (d) Alümina / 90° .....	68
Şekil 6.23. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla bronz partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri.....	69
Şekil 6.24. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla bronz partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Rt değerleri.....	70
Şekil 6.25. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla karbon partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri.....	71
Şekil 6.26. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla karbon partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Rt değerleri.....	71
Şekil 6.27. Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin 45° çarpma açısıyla aşındırılması durumunda yüzeylerin optik profilometre görünümleri; (a) Garnet ve (b) Alümina.....	72
Şekil 6.28. Saf PTFE malzemenin garnet ile aşındırılması durumunda yüzeylerin optik profilometre görünümleri; (a) 45° ve (b) 90° çarpma açısında.....	73
Şekil 6.29. Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin alümina ile aşındırılması durumunda yüzeylerin optik profilometre görünümleri; (a) 45° ve (b) 90° çarpma açısında.....	73



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. AISI 1020 çeliğin aşındırıcı partikülleri ve erozyon oranı.....	22
Tablo 3.1. Aşındırıcı partiküller için şekil parametreleri (Wadell).....	28
Tablo 3.2. Köşeli ve yuvarlak partikül şekillerinin tanımlanması (Hansink).....	29
Tablo 3.3. Garnet aşındırıcı malzemelerin şekil faktörleri ve şekil özellikleri (Vasek).....	30
Tablo 5.1. PTFE malzeme ve kompozitlerinin fiber ve partikül içeriği ve özellikleri.....	39
Tablo 5.2. PTFE malzeme ve kompozitlerinin teknik değerleri.....	40
Tablo 5.3. Garnet ve alümina aşındırıcı partiküllerin boyutları.....	41
Tablo 5.4. Alümina mineralinin fiziksel özellikleri.....	42
Tablo 5.5. Garnet mineralinin fiziksel özellikleri.....	42
Tablo 5.6. Garnet aşındırıcı partikül için değerler.....	43
Tablo 5.7. Alümina aşındırıcı partikül için değerler.....	43

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum oksit
Ca	: Kalsiyum
CaCO <sub>3</sub>	: Kalsiyum karbonat
Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	: Apatit
Fe <sup>2</sup>	: Ferröz demir
Fe <sup>3</sup>	: Ferrik demir
F <sub>P</sub>	: Malzeme yüzeyine paralel çarpma kuvveti, (N)
F <sub>V</sub>	: Malzeme yüzeyine dik çarpma kuvveti, (N)
Mg	: Magnezyum
MoS <sub>2</sub>	: Molibden Disülfid
m	: Kütle, (g)
M	: Toplam aşındırıcı kütlesi, (g)
SiC	: Silisyum karbür
SiO <sub>2</sub>	: Silisyum Dioksit
t	: Süre, (s)
Ti	: Titanyum
v	: Hız, (m/s)
Δm	: Ağırlık farkı, (g)
σ*	: Gerilim
ε*	: Gerinim

## Kısaltmalar

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
PEEK	: Polietereterketon
PEI	: Polieterimid
PPS	: Polifenilen sülfid
PSU	: Polisülfon
PTFE	: Politetrafloroetilen
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

# AŞINDIRICI PARTİKÜLLERİN PTFE MATRİSLİ POLİMER KOMPOZİTLERİN PARTİKÜL EROZYONUNA ETKİLERİ

## ÖZET

Günümüzde polimerler ve polimer kompozitler yüksek spesifik özellikleri nedeniyle makine elemanlarında ve mühendislik sistemlerinde yapısal malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek dayanım/ağırlık oranı, üretim kolaylığı gibi özellikleri sayesinde metallerle karşılaştırıldığında pek çok avantaj sunar. Ancak polimerler ve polimer kompozitler oldukça zayıf erozyon direnci göstermektedir. Polimerlerin aşınma dirençleri metallerden 2 ila 3 kat daha azdır ve bu malzemeler parçaların güvenliğini etkileyen farklı ve önemli ölçüde karmaşık hasar ve aşınma mekanizmalarına sahiptir. Polimer kompozitler sıklıkla aşındırıcı partiküllerle etkileşen ortamlarda çalışmaktadır. Aşındırıcı partiküllerin yüksek hızda ve tekrarlı bir şekilde çarpmaları ile hedef yüzeyde malzeme kaybı gerçekleşir, bu da parçaların çalışma performanslarını ve kullanım ömürlerini olumsuz etkiler. Dolayısıyla bu tür uygulamalarda meydana gelebilecek katı partikül erozyonunun önceden tahmin edilebilmesi ve parçaların erozif aşınmaya karşı davranışının iyi şekilde bilinmesi oldukça önemlidir.

Teflon (PTFE) ve kompozitleri, üstün mekanik özellikleriyle kendini ispatlamış olan ve tribolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan fakat partikül erozyonu davranışı hakkında yeterli literatür bilgisi olmayan malzemelerdir. Bu çalışmada PTFE malzeme ve rastgele dağılımlı kısa cam fiber takviyeli ile bronz ve karbon partikül takviyeli kompozitlerinin katı partikül erozyon davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda hedef yüzey garnet ve alümina olmak üzere farklı türde iki partiküle maruz bırakılmıştır. Aşınan malzemelerin yüzey morfolojilerindeki değişimler yüzey profilometresi ile incelenmiştir. Malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için SEM çalışmaları yapılmıştır. Hem takviye türünün hem de aşındırıcı partikül tipinin malzemenin erozif aşınma davranışına etkisinin oldukça belirgin olduğu anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aşındırıcı Partikül, Erozif Aşınma, Erozyon Oranı, Polimer Kompozit, PTFE.

## **EFFECTS OF EROSIVE PARTICLES ON PARTICLE EROSION OF POLYMER COMPOSITES WITH PTFE MATRIX**

### **ABSTRACT**

Today, polymers and polymer composites are widely used as structural materials in machine elements and engineering systems due to their high specific properties. Thanks to its features such as high strength / weight ratio and ease of production, it offers many advantages compared to metals. However, polymers and polymer composites show very poor erosion resistance. The erosion resistance of polymers is 2 to 3 times less than metals, and these materials have different and significantly complex damage and wear mechanisms that affect the safety of parts. Polymer composites often operate in environments that interact with erosive particles. Erosive particles crash at high speed and repeatedly cause material loss on the target surface, which negatively affects the working performance and service life of the parts. Therefore, it is very important to be able to predict the solid particle erosion that may occur in such applications and to know the behavior of the parts against erosive wear well.

Teflon (PTFE) and its composites are materials that have proven themselves with their superior mechanical properties and are widely used in tribological applications, but lack sufficient literature on particle erosion behavior. In this study, the solid particle erosion behavior of PTFE material and randomly distributed short glass fiber reinforced and bronze and carbon particle reinforced composites were investigated. In experimental studies, the target surface was exposed to two different types of particles, garnet and alumina. The changes in the surface morphology of the eroded materials were examined by surface profilometry. SEM studies have been carried out to determine the effective erosive wear mechanisms seen in the material. It has been found that both the reinforcement type and the erosive particle type have a significant effect on the erosive wear behavior of the material.

**Keywords:** Erosive Particle, Erosive Wear, Erosion Rate, Polymer Composite, PTFE.

## GİRİŞ

Katı partikül erozyonu, katı partiküllerin tekrarlanan etkisine bağlı olarak malzemenin hedef yüzeyden aşamalı olarak uzaklaştırılması sürecidir. Temas geriliminin, bir yüzeyle karşılaştığında hava veya sıvı akımında akan partiküllerin kinetik enerjisinden kaynaklandığı bir aşınma şeklidir [1]. Katı partikül erozyonunun endüstriyel bileşenlerin güvenilirliği üzerindeki etkisi ve yüksek aşınma maliyetleri yaygın şekilde kabul edilmektedir fakat aynı zamanda erozyon işlemi döküm parçaların kumlanması, dönen bileşenlerin bilyeli dövülmesi, sert ve kırılğan malzemelerin aşındırıcı jetlerle kesilmesi gibi bir dizi durumda avantaj sağlamak için kullanılmaktadır. Bu nedenle erozyonun teknolojik ve ticari önemi göz ardı edilemez [2]. Dolayısıyla erozif aşınmaya ilişkin çalışmalar yalnızca makine parçaları ve mühendislik malzemelerinde mevcut aşınma risklerinin göz önüne alınarak malzeme seçimi ve tasarımının buna uygun yapılmasını sağlamaya yönelik değil aynı zamanda makine parçalarına ve mühendislik malzemelerine istediğimiz yüzey özelliklerini kazandırmak amacıyla malzemenin hangi parametreler altında aşındırılması gerektiğinin belirlenmesiyle de ilgilidir.

Polimerlerin farklı özellikleri onları genellikle mekanik bileşenler olarak kullanılan önemli bir mühendislik malzemeleri sınıfı haline getirir. Yüksek özgül mukavemet ve özgül sertlik değerleri nedeniyle çok çeşitli yapısal ve tribolojik uygulamalar için yaygın olarak kullanılır [3]. Polimerlerin hafiflik, mükemmel termal ve kimyasal kararlılık, düşük sürtünme katsayısı, biyouyumluluk ve kendinden yağlamalı olabilmesi gibi özellikleri onları aviyonik, otomotiv, biyomedikal, elektronik endüstrileri ve kozmetikte geniş kullanım ölçeğine uygun hale getirir. Polimerik malzemelerin ve bunların kompozitlerinin uygulamaları düşük maliyetleri, üretilebilme kolaylığı ve verimli tribolojik özellikleri nedeniyle hızla artmaktadır. Endüstriyel öneme sahip polimerlerden biri olan politetrafloroetilen (PTFE) de düşük sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklık kararlılığı, yüksek kimyasal direnç ve hidrofobik yapı gibi özellikleri nedeniyle günlük uygulamalarda geniş kullanım alanı bulan bir

karbon ve flor bileşimidir [4]. Özellikle rulmanlarda ve contalarda yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte PTFE, zayıf aşınma direnci sergiler ve contalarda erken arıza ve sızıntı sorunlarına yol açar [5]. PTFE çok düşük sürtünme katsayısı nedeniyle kuru yağlayıcılar alanında da büyük bir kullanım alanı bulur [4].

Bu tez çalışmasında tribolojik uygulamalarda yaygın kullanılan, özellikleri iyi bilinen fakat partikül erozyonu davranışı hakkında yeterli literatür bilgisi bulunmayan Teflon (PTFE) malzeme ve cam fiber, karbon partikül ve bronz partikül ile takviye edilmiş kompozitlerinin katı partikül erozyon davranışları çeşitli çalışma parametrelerinde garnet ve alümina olmak üzere farklı türde iki partiküle maruz bırakılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Garnet ve alümina aşındırıcı partiküller insan sağlığına zararsız, aşındırma özelliği yüksek, maliyeti düşük ve literatürde yaygın olarak kullanılan minerallerdir.

Erozyon testleri bir erozif aşınma test düzeneği kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Garnet ve alümina aşındırıcı partiküller 3 Bar sabit basınçlı hava etkisiyle nozuldan ayrılmış ve numune yüzeyine 6 farklı açıyla (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) 20 mm mesafeden 30 saniyelik süre boyunca çarpmıştır. Katı partikül erozyonu karmaşık bir tribolojik süreçtir. Malzemelerin katı partikül erozyonu; çalışma parametreleri (partikül çarpma açısı, hız, ivme, basınç, kütleli debi vb.), aşındırıcı partikül özellikleri (şekil, sertlik, boyut, tip vb.), hedef malzeme özellikleri (sertlik, tokluk, modül, kırılma davranışı vb.) ve çevre ve test koşulları (sıcaklık, aşındırıcının hedef malzeme ile kimyasal etkileşimi) gibi faktörlere bağlı olduğundan her bir faktörün sebep olduğu hasarın karşılaştırmalı görüntülerinin bir arada sunulması önemlidir [1]. Tez çalışmasında katı partikül erozyonuna bağlı olarak ortaya çıkan hasarlar taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca aşınan yüzeylerin yüzey topografyasının incelenmesi ve yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi için optik profilometre (Nanovea PS50, USA) kullanılmıştır. Çalışmalarda özellikle bu görüntüler ve sonuçlardan yararlanılarak farklı partikül tiplerinin ve çarpma açılarının PTFE malzeme ve kompozitlerinin erozif aşınma davranışına olan etkileri ilişkilendirilmiş ve yorumlanmıştır.

Tez çalışmasında, farklı parametreler altında gerçekleştirilen katı partikül erozyonu ile aşındırma uygulamasında garnet ve alümina aşındırıcı partiküllerin farklı katkı

maddeleriyle takviye edilmiş PTFE malzemenin aşınması üzerindeki etkilerinin görülmesi, aşınan PTFE malzeme ve kompozitlerinde görülen eroziv aşınma mekanizmalarının ve yüzey morfolojilerinin değişiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu araştırmanın, PTFE ve kompozitlerinin tribolojik özelliklerinin anlaşılmasını arttırmaya yardımcı olması beklenmektedir.



## 1. POLİMERLER VE KOMPOZİTLER

Günümüzde polimerler ve kompozitler mükemmel spesifik özellikleri nedeniyle çeşitli bileşenlerde ve mühendislik sistemlerinde yapısal malzemeler olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Polimerler ve kompozitler çeşitli kısıtlamalar nedeniyle sıvı yağlayıcıların kullanılmadığı yataklar, dişliler vb. gibi triboloji uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Bazı polimerler ve kompozitler abrazyon, adhezyon, titreşimli, ileri geri hareket eden ve erozyon gibi aşınma durumlarında mükemmel bir malzeme potansiyeli sergiler. Metallerle karşılaştırıldığında kolay işlenebilirlik ve şekillendirmede tasarımcı özgürlüğü (özellikle termoplastiklerle) gibi bazı ekstra faydalar sunar. Bununla birlikte metallerle karşılaştırıldığında kompozitler, ilgili parçaların güvenliğini de etkileyen farklı ve önemli ölçüde daha karmaşık hasar ve arıza mekanizmaları sunar [6].

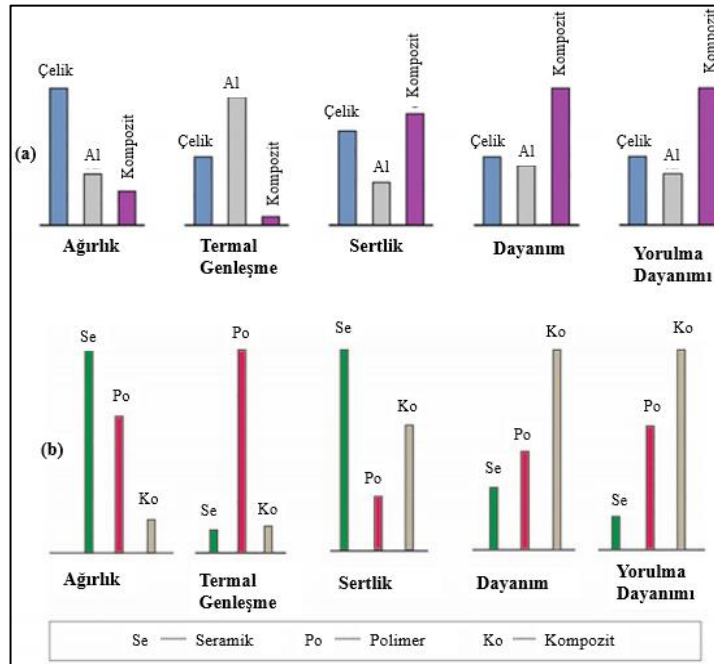
Polimerler ve kompozitler yüksek hızlı araçlar ve uçaklar, radomlar, helikopter rotor kanatları, gaz ve buhar türbin kanatları, pompa pervane kanatları, lokomotif dişlileri, konveyör bantları, kum taşıyan boru hatları gibi bileşenlerin toz, kum, malzeme parçacıkları, katı partikül bulamacı gibi çok sayıda aşındırıcının etkisiyle karşılaştığı ve dolayısıyla malzemelerin erozyon aşınmaya uğradığı uygulamalarda kullanılır. Bu nedenle, çeşitli çalışma koşullarında polimerik mühendislik malzemelerinin erozyon aşınma davranışını incelemek zorunlu hale gelir [6,7]. Polimerler ve polimer kompozitler metallerle karşılaştırıldığında metal malzemelerinkinden iki veya üç kat daha düşük olan erozyon direnci ile oldukça zayıf bir erozyon direnci sergiler. Ayrıca geleneksel malzemeler için önerilen modellerin hiçbiri polimerlerin ve polimer kompozitlerin aşınma davranışını güvenilir bir şekilde tahmin etmek için benimsenemez [2,6]. Geçerli tahmini modellerin yokluğu ya da yetersiz olması, polimerlerin ve polimer kompozitlerin erozyon davranışı hakkında bilgi veren bir veri tabanı oluşturma ihtiyacını yoğunlaştırır. Polimerlerin ve ilgili kompozitlerin erozyon davranışının son otuz yılda yoğun olarak araştırılmasının nedeni budur [6].



## 1.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Gösterdiği yüksek mukavemet ve hafiflik özelliği sayesinde kompozit malzemenin kullanım alanı geniştir. Bu malzemeler savunma sanayii, uzay teknolojisi ve havacılık sektörü, otomotiv sektörü, inşaat sektörü, ulaşım sektörü, sağlık sektörü gibi birçok önemli kullanım alanı bulur. Kompozitlere örnek olarak cam fiberli plastik, beton, araba lastiği verilebilir [8].

Kompozit, belirli karakteristikler ve özellikler elde etmek için seçilen bir dolgu maddesi veya takviye elemanı ve uyumlu bir matris bağlayıcı olmak üzere iki veya ikiden fazla bileşenin sentetik olarak bir araya getirilmesiyle oluşturulan birleşik bir malzemedir [8]. Kompozit malzemeler gerilme dayanımı, korozyon dayanımı, hafiflik, termal özellikler, elektrik iletkenliği, akustik özellikler ve maliyet gibi özelliklerin geliştirilmesine olanak sağlar. Dolayısıyla bu malzemenin önceden belirlenmiş fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal özelliklere sahip olacak şekilde üretilebilmesi diğer malzeme türlerine (metaller ve alaşımları, seramikler, polimerler) göre benzersiz avantajlar sunar. Şekil 1.1(a) saf metal malzemeler ile kompozit malzemeler arasındaki karşılaştırmayı ve Şekil 1.1(b) seramikler, polimerler ve kompozitler arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir [9].



Şekil 1.1. Özelliklere göre malzeme karşılaştırma (a) saf metaller ve kompozit malzemeler (b) seramikler, polimerler ve kompozitler [9]

Kompozit malzemelerin termal genleşme katsayıları nispeten düşüktür, bunlar sert ve dayanıklı bir yapı oluştururlar ve yüksek boyut kararlılığı gösterirler. Çekme, basma, darbe, yorulma dayanımları yüksektir. Kimyasal direnci ve ısı dayanımı polimerlere göre yüksektir [8].

### **1.1.1. Kompozit malzemelerin bileşenleri**

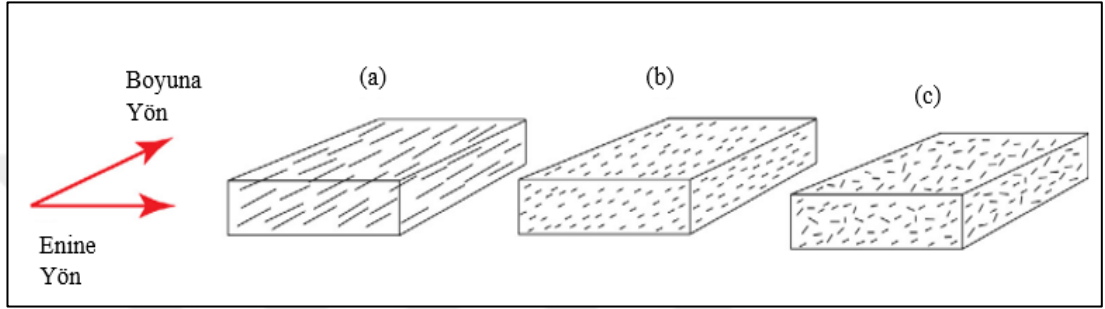
Kompozit malzemenin bileşenleri çözünmez veya tamamen birbiriyle birleşmez ancak aynı hacimde uyum içinde hareket eder [8]. Üretilen bir kompozit malzemenin nihai özellikleri bileşenlerin bireysel özelliklerine ve bunların nispi miktarlarına, geometrisine ve dağılımına bağlıdır. Çoğu kompozit malzemenin iki fazdan oluştuğu düşünülürse birincil faz, ikincil fazın içinde gömülü olduğu matrisi oluşturur, ikincil faz ise kompozit malzemenin dayanımını artıran takviye malzemesidir [9]. Takviye fazının fonksiyonu birincil fazı güçlendirmektir. Kompozit malzemeler dayanımlarını genellikle sert ve nispeten gevrek yapıya sahip takviye bileşeninden alır, matris bileşeni ise takviye elemanlarını bir arada tutmaya yarar ve yapıya tokluk ve süneklik kazandırır [8]. Bazı durumlarda fazları bağlamak için üçüncül faz olan arafaz eklenir. Bu faz, birincil ve ikincil fazları birleştiren yapıştırıcı bir tabaka olarak düşünülebilir. Bu yapışmanın, yükün verimli şekilde iletilebilmesi için kuvvetli olması şarttır. Yük altında ara faz bölgesi matristen daha az dayanım gösterirse fiber ve matris ara yüz ayrılması ve delaminasyon hasarları oluşur [10].

Kompozitler yapısal bileşenlerinin biçimine göre fiber takviyeli (bir matris içindeki fiberlerden oluşur), partikül takviyeli (matris içindeki partiküllerden oluşur) ve yapısal (malzeme katmanlarından oluşur) olarak sınıflandırılır [8].

#### **1.1.1.1. Fiber takviyeli kompozitler**

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde matris malzemesi genelde sünektir, fiberler ise yüksek dayanıma ve yüksek elastik modülüne sahiptir [8]. Fiber yönelimlerine bağlı olarak fiber takviyeli kompozitler sürekli veya uzun ve yönlendirilmiş, süreksiz veya kısa ve yönlendirilmiş ve süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş olarak üç ana grupta sınıflandırılmıştır [9]. Takviye fazı olarak kullanılan uzun fiberlerin yönlendirilmesi tek veya iki yönlü olabilir. Bir diğer takviye fazı olan kısa fiberler ise rastgele dağılımlı olabilir veya istenilen şekilde yönlendirilebilir. Uzun fiberli kompozitler, kısa fiberli

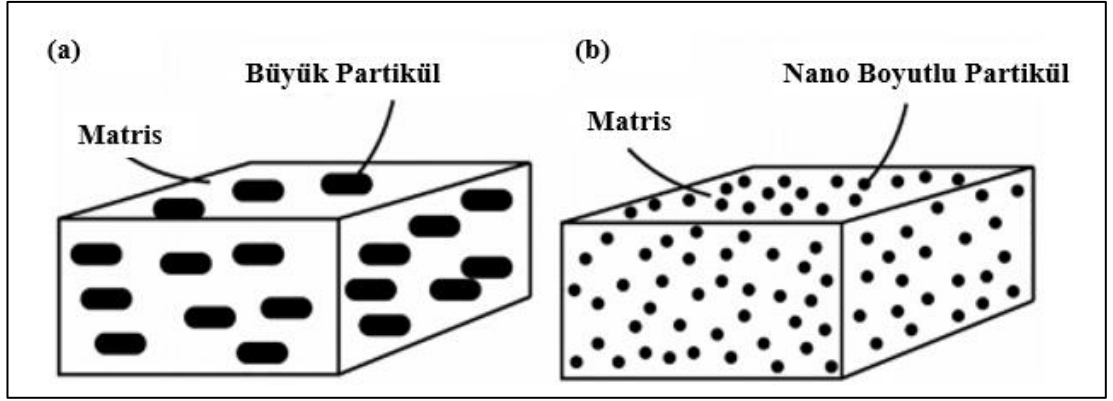
kompozitlere göre daha dayanıklıdır ve bunların yük taşıma kapasitesi daha yüksektir. Takviye fazı olarak kullanılan fiberin uzunluğu, çapı, oryantasyonu ve konsantrasyonu kompozitin performansını etkileyen faktörlerdir. Fiberler genelde rijittir ve yüzeyleri kusurludur, bu sebeple bunlar kırılmaya eğilimli özellik gösterir. Yüzey kusurlarının azaltılması için izlenecek yol, yüzey alanını azaltacağından dolayı fiber çapının küçültülmesidir [10]. Süreksiz fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber yönelimlerine bağlı olarak sınıflandırılması Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Süreksiz fiber takviyeli kompozitlerin şematik diyagramı (a) süreksiz uzun fiberli ve yönlendirilmiş (b) süreksiz kısa fiberli ve yönlendirilmiş (c) süreksiz kısa ve rastgele yönelimli [9]

#### 1.1.1.2. Partikül takviyeli kompozitler

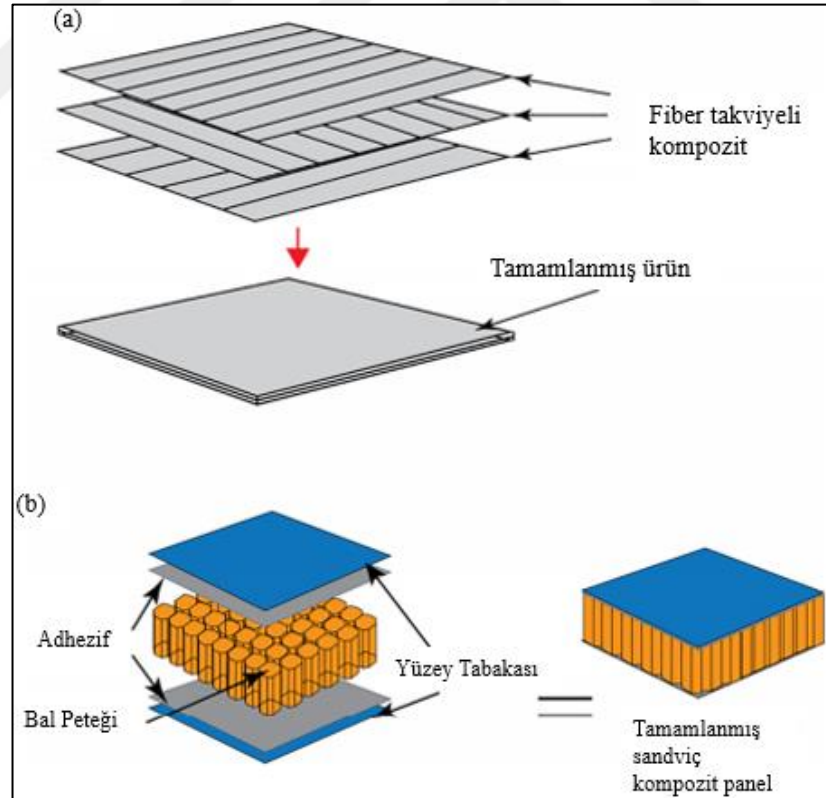
Partikül takviyeli kompozitlerde takviye olarak kısa partiküller kullanılır ve bu takviyelerin ortalama boyutuna bağlı olarak bu kompozit tipi, büyük partikül takviyeli veya dispersiyonla kuvvetlendirilmiş kompozitler olarak sınıflandırılabilir [9]. Büyük partikül takviyeli kompozitlerde takviye fazı olarak kullanılan ve milimetre ölçülerinde veya daha büyük olan büyük partiküller ana yük taşıyıcılarıdır ve ortak yüzeyleri etrafındaki matris deformasyonunu kısıtlama eğilimindedir. Bu kısıtlamalar, büyük partiküllü kompozitlerde ana güçlendirme mekanizmasıdır. Dispersiyonla güçlendirilmiş kompozitlerde ise takviye fazı olarak nanometre boyutlarındaki partiküller kullanılır ve büyük partiküllü kompozitlerin aksine, matris mekanik bir gerilime maruz kaldığında yükün büyük kısmını taşır. Bu durumda güçlendirme mekanizması atomik seviyede gerçekleşir ve matris boyunca dislokasyon çizgilerinin yayılmasının dağılmış partiküller tarafından engellenmesini içerir [9,10]. Partikül takviyeli kompozitlerin partiküllerin boyutuna göre sınıflandırılması Şekil 1.3’te gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Partikül takviyeli kompozit türleri (a) büyük partikül (b) dispersiyonla kuvvetlendirilmiş [9]

### 1.1.1.3. Yapısal kompozitler

Yapısal kompozitler homojen bir yapışkan malzeme ile dikkatlice düzenlenen ve bir arada tutulan bir kompozit sistemidir. Şekil 1.4 yapısal kompozitlerin iki temel türünü göstermektedir.

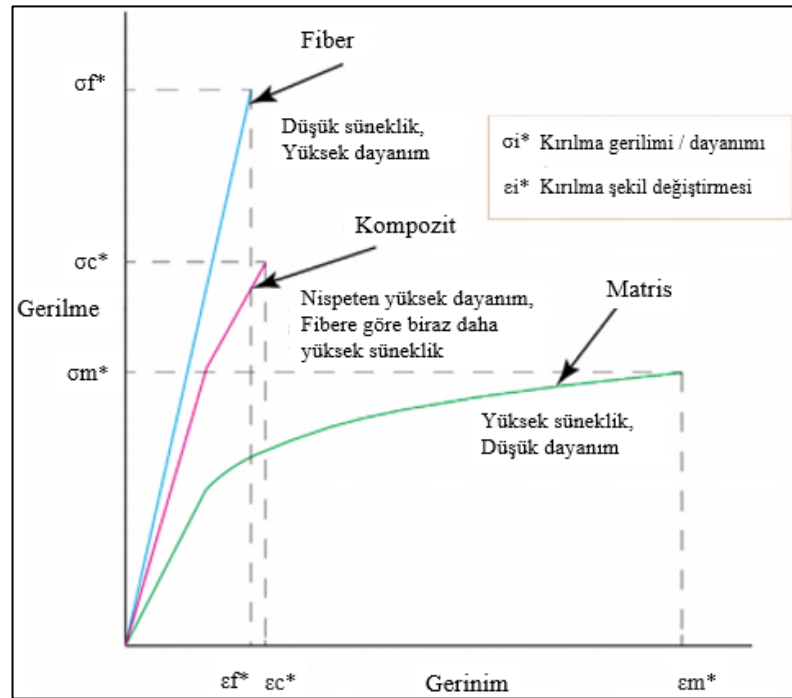


Şekil 1.4. Yapısal kompozitlerin şematik diyagramı (a) tabakalı kompozit (b) sandviç panel [9]

Bir yapısal kompozitin mekanik ve yapısal bütünlüğü, her bir bileşenin ayrı ayrı bileşimlerinin özelliklerine ve yapısal elemanların şekli ve boyutu gibi geometrik tasarımlara bağlıdır. Tabakalı kompozitler ve sandviç paneller olmak üzere iki ana tip yapısal kompozit mevcuttur. Bu tabakalar genellikle kesintisiz ve yönlendirilmiş fiber takviyeli kompozitlerdir. Fiber tabakaları uygun sayılarda, açılarda ve yönlerde yerleştirilerek çok katmanlı yapı oluşturulur. Sandviç paneller yüksek mukavemetli iki yüzey tabakası ve nispeten yumuşak bir çekirdekten yapılmıştır [9].

Kompozit malzemelerde matris malzemesi polimer, seramik veya metal ve metal alaşımı olabilir. Polimer kompozitler genellikle  $1,5-2 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğundayken metal kompozitler  $2,5-4,5 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahiptir ve seramik kompozitlerin yoğunluğu ikisi arasındadır [8]. Metaller ve polimerler kısmen esneyebilir malzemelerdir fakat seramikler kırılındır ve takviye malzemelerle kırılmaya karşı dayanıklı hale getirilmeleri gerekir [10]. Seramik malzemeler sert ve kırılğan olduklarından süneklik ve toklukları düşüktür bu sebeple genellikle fiberlerle takviye edilir [11].

Fiber, matris ve kompozit için gerilme-gerinim diyagramı Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Boyuna bir yüke maruz kalan sürekli fiber takviyeli kompozitin, fiberin ve sünek matrisin gerilme-gerinim eğrisinin şematik diyagramı [9]

Kompozitlerin çekme yükü altındaki davranışı açısından gerilme-gerinim ilişkisi, fiberin boyuna eksenine göre yükün yönüne bağlıdır. Bu sadece sürekli ve yönlendirilmiş fiber kompozitler için geçerlidir. Süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş fiber türü farklı davranır.

Fiber malzemenin kırılma mukavemeti genellikle matriste olandan çok daha yüksektir. Bununla birlikte, matris daha yüksek süneklığe ve dolayısıyla fibere göre daha yüksek kırılma gerinimine sahiptir. Bunlardan dolayı fiber takviyeli kompozitlerin kırılma mukavemeti ve gerilmesi ilgili fiber ve matrislerin arasında yer alır [9].

### **1.1.2. Polimer matris kompozitler**

Polimer kompozitler üstün mekanik, termal ve kimyasal özelliklerinin bir sonucu olarak otomobil, uçak, uzay aracı vb. gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanımı nedeniyle önemli bir yere sahiptir. Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi bir polimer malzeme ve takviye malzemesi de fiberler veya diğer takviye malzemeleridir. Polimer kompozitlerde matris malzemesi termoplastik ve termoset olarak sınıflandırılabilir. Termoset matrisler fiber takviyeli kompozit yapımında daha fazla kullanılır [11]. Takviye malzemelerinin kullanımı çeşitli gereksinimleri karşılamak için herhangi bir termoset veya termoplastik matris özelliğinin iyileştirilmesini veya değiştirilmesini mümkün kılar [9]. Polimer matrisli kompozitlerde takviye malzemeleri polimer matristen çok daha güçlüdür, bu da takviyeleri yük taşıyıcı bileşenlere dönüştürür [12]. Bu malzemelerde de takviye malzeme partikül, fiber veya tabaka olabilir. Partikül takviye için esas üzerinde durulan konu matris malzemenin özelliklerini geliştirmesi ve maliyeti düşürmesidir. Bu partiküller küresel, kübik şekillere ve düzgün veya düzensiz geometrik formlara sahip olabilir. Fiber takviyeli polimer matris kompozitler içerdikleri takviye malzemelerine göre cam fiber takviyeli polimer kompozitler, karbon fiber takviyeli polimer kompozitler, aramid fiber takviyeli polimer kompozitler ve diğer fiber takviyeli polimerler olmak üzere dört grup altında toplanabilir [10].

Kompozit uygulamalarında en yaygın kullanılan polimer kompozitlerden özellikle fiber takviyeli olanlar ile karmaşık şekillerin üretimi mümkün olmaktadır. Bu, diğer malzemelerle ulaşılması zor bir durumdur. Bunlar hafiftir, takviyelerinin yönü boyunca dayanımı, sertliği, kırılma veya çatlama dayanıklılığı yüksektir, aşınmaya ve

koroziona karşı dirençlidir. Çevresel bozulma, termal dirençlerinin düşük olması ve ısıl genleşme değerlerinin yüksek olması polimer matris kompozitlerin önemli dezavantajlarıdır. Polimer kompozitlerin performansı genellikle fiberin özellikleri, polimer matrisin özellikleri, kompozitteki fiberin polimer matrisine oranı (fiber hacim fraksiyonu) ve kompozitteki fiberin geometrisi ve oryantasyonu ile belirlenir [9,11].

## **1.2. Floropolimerler**

Etilen ve tetrafloroetilen kopolimerleri veya etilen ve klorotrifloro etilenin yanı sıra vinil florür veya vinilidendiflorür gibi diğer flor içeren monomerlerin homopolimerleri gibi termoplastik olarak işlenebilen floropolimerlere artan bir ilgi vardır. Floropolimerler nem ve ortam şartlarından etkilenmeme, kimyasal direnç, esneklik, geniş çalışma sıcaklığı aralığı, düşük sürtünme katsayısı, yapışmayan yüzey ve üstün elektriksel yalıtım özelliklerine bir arada sahip olan malzemelerdir. Floropolimerler kısa sürede insan vücudundan uzaya kadar geniş kullanım alanına ulaşmıştır. Floropolimerlerin mükemmel özellikleri karbon atomu ve flor atomu arasındaki yüksek bağlanma enerjisi ile gerçekleştirilir. Florlu termoplastikler yüksek ısı, düşük sıcaklık, kimyasal inertlik, yüksek saflık, yapışmama ve kendi kendini yağlama özellikleriyle ilgili yüksek performanslı uygulamalar için kullanılır [13].

Politetrafloroetilen veya PTFE, DUPONT laboratuvarlarındaki çalışmaların ardından bulunmuştur ve günümüzde daha çok Teflon adı ile tanınmaktadır. PTFE, karbon ve flor atomlarından oluşan yaygın olarak kullanılan çok yönlü, yüksek performanslı floropolimerdir ve floropolimer pazarının %60'ını oluşturmaktadır [13]. Politetrafloroetilen (PTFE), özellikle şiddetli ortamlarda tribolojik uygulama gibi kimyasal ve termal oksidasyon direncinin ve iyi bir yağlama kabiliyetinin avantajlarını gerektiren ortamlarda tercih edilen matrislerden biridir [14]. PTFE havacılık, otomotiv, savunma, gıda işleme, elektrik ve biyomedikal endüstrilerindeki uygulamalarıyla bilinir. PTFE kendi kendini yağlama özelliği, yük taşıma kapasitesi ve düşük yoğunluğu nedeniyle tribolojik uygulamalarda kullanılır [15].

### **1.2.1. Teflon (PTFE) malzemenin tipik özellikleri**

PTFE plastikleri opak, kristalin ve sünektir. 340°C sıcaklığın üzerine ısıtıldığında saydam ve amorf olur ancak soğutulduğunda tekrar eski halini alır [16]. PTFE'yi

yüksek ticari değere sahip malzeme yapan temel özellikleri yüksek kimyasal direnç, yüksek ve düşük sıcaklığa karşı iyi direnç, sıcak ve nemli ortamlarda iyi elektriksel yalıtım gücü, ışığa, UV ışınlarına ve hava koşullarına karşı iyi direnç, düşük sürtünme katsayısı (statik 0,08 ve dinamik 0,01), makro moleküllerin oldukça simetrik yapısı nedeniyle düşük dielektrik sabiti (2,00), güçlü yapışma önleyici özellikler, esneklik, düşük gerilme altında iyi yorulma direnci ve düşük su emilimi özelliğidir. PTFE %90'a kadar kristallik sağlayabilecek şekilde oldukça kristaldir ve basit bir şekilde ısıtılarak erimez. Çalışma sıcaklığı aralığı -200°C ile +250°C'dir. Yoğunluğu 2,1- 2,3 g/cm<sup>3</sup> aralığındadır ve saniyede 1-10 GPa aralığında eriyik viskozitesine sahiptir. Kullanım sıcaklığı aralığında kullanışlı mekanik özelliklere sahiptir. PTFE'nin mekanik özellikleri genellikle oda sıcaklığında mühendislik plastiklerinden daha düşüktür. Bu eksikliğin üstesinden gelmek için dolgu maddeleri kullanılabilir [17]. Polimerler ve bunların kompozitleri çok önemli bir tribo mühendislik malzemeleri sınıfını oluşturur ve her zaman mekanik bileşenlerde kullanılır, burada yağlanmamış durumdaki aşınma performansı malzeme seçimi için anahtar bir parametredir. PTFE mükemmel bir katı yağlayıcıdır ve genellikle yatak ve sızdırmazlık uygulamalarında kullanılır. Bununla birlikte, PTFE normal sürtünme koşullarında yüksek aşınma oranı sergiler [18]. Zayıf aşınma direnci ve yüksek aşınma oranı erken arızaya neden olur ve bu da onu birçok mühendislik uygulamasında savunmasız hale getirir [15]. Makine mühendisliği tasarımında malzeme seçimini optimize etmek ve yeni tip kendinden yağlamalı malzemeler geliştirmek için PTFE kompozitlerinin sürtünme ve aşınma mekanizmaları üzerine yıllardır araştırma yapılmaktadır [14].

### **1.2.2. Teflon (PTFE) malzeme üretimi**

PTFE bir emülsiyon veya süspansiyon işlemi kullanılarak tetrafloretilenin (TFE) polimerizasyonu ile elde edilir. TFE bir başlatıcı ve diğer katkı maddelerinin varlığında bir yüzey aktif madde kullanılarak veya kullanılmadan suda polimerize edilir [17].

Emülsiyon polimerizasyonu için bir peroksit başlatıcı ve özel emülsiyonlaştırıcılardan oluşan sulu bir çözelti hazırlanır daha sonra monomer eklenir ve yüksek basınç altında dağıtılır. Polimer emülsiyondan izole edilir. Bu yöntem dispersiyonun ve ince toz PTFE'nin üretildiği yöntemdir. Hafif karıştırma ve bol miktarda yüzey aktif madde



emülsiyon polimerizasyon yönteminin özellikleridir. TFE polimerize edildiğinde ürünü dispersiyona ve ince toz ürünlere dönüştürmek için farklı bitirme teknikleri kullanılır [17].

Süspansiyon işleminde ise TFE genellikle bir yüzey aktif madde olmadan veya çok az miktarda yüzey aktif madde ile şiddetli karıştırma eşliğinde polimerize edilir. Peroksitler tarafından başlatılan polimerizasyon sabit monomer basıncında gerçekleştirilir. Süspansiyon polimerizasyonu ile granüler polimerler üretilir [17].

Bu yöntemlerde polimerizasyon ortamı inorganik ve organik safsızlıklardan neredeyse yoksun olan yüksek oranda saflaştırılmış sudur. Tepkimelerdeki yüzey aktif madde seçimi bir anyonik yüzey aktif maddedir. TFE dallanma olmaksızın doğrusal olarak polimerleşir, bu da oldukça yüksek moleküler ağırlıklara kadar neredeyse mükemmel bir zincir yapısı ile sonuçlanır. Zincirler neredeyse %100 kristal yapı oluşturmak için kristalleşir. Termoplastikler zincirler arası çekici kuvvetlerden kaynaklanan Van der Waals kuvvetleri nedeniyle iyi mekanik özellikler geliştirir [17].

## 2. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Aşınma, yüzey ile bu yüzeye temas eden bir madde veya maddeler arasındaki göreceli hareket nedeniyle genellikle aşamalı malzeme kaybını içeren, katı bir yüzeye verilen hasardır, mekanik veya kimyasal olabilir. Aşınmanın endüstriyel bileşenlerin güvenilirliği üzerindeki etkisi ve sebep olduğu maliyetin yüksek oluşu yaygın olarak kabul edilmektedir. Aşınan parça değişimleri, artan iş ve zaman kaybı, üretkenlik kaybı gibi aşınma arızalarının doğrudan maliyetleri ile dolaylı enerji kayıpları günlük işlerde sorun yaratır. Aşınma bilimsel olarak kapsamlı bir şekilde araştırılmış olsa da 21. yüzyılda endüstriyel uygulamalarda hala aşınma sorunları mevcuttur. Bu aslında aşınma olgusunun karmaşıklığını ortaya çıkarır [19].

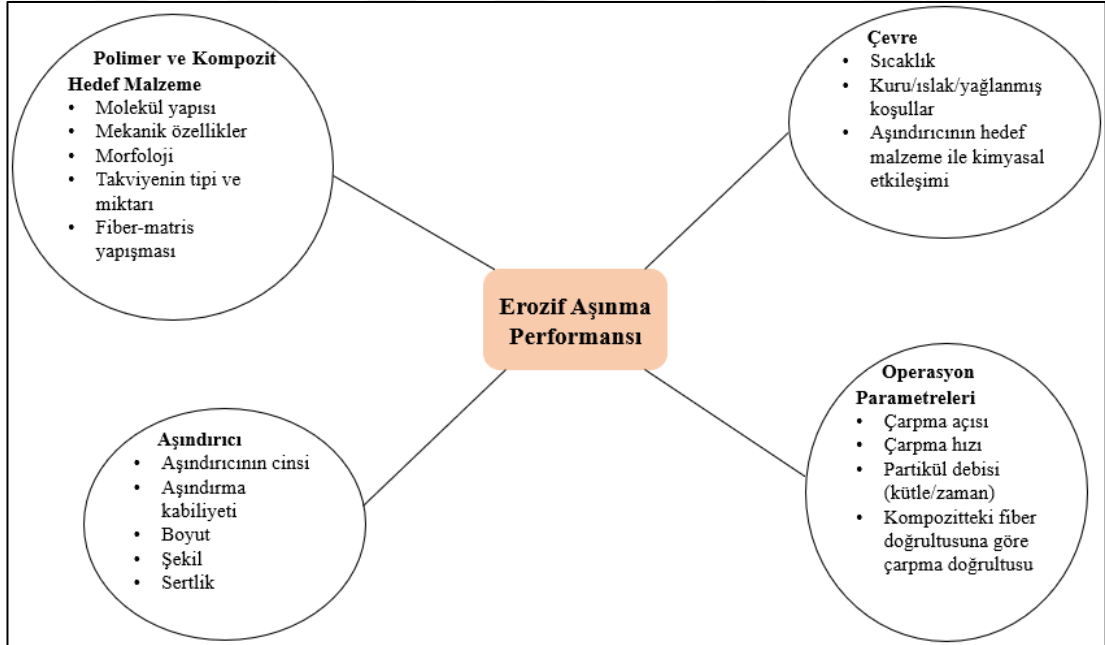
Birçok endüstriyel uygulamada makine parçaları ya da malzemeler aşındırıcı partikülle etkileşen ortamlarda çalışmaktadır [19]. Tipik bir aşınma modu olan katı partikül erozyonu küçük, katı partiküllerin belirli bir hızla tekrarlı olarak hedef yüzeye çarpmasından kaynaklanan malzeme kaybıdır [2,19]. Dolayısıyla katı partiküller bir hedef yüzeye çarparsa ve malzeme kaldırmayla birlikte yerel hasara neden olursa bu tür aşınmaya partikül erozyonu denir [20]. Katı partiküller belli bir hızda sıvı veya gaz ortamda hedef yüzeye sürüklenir. Her iki durumda da partiküller hızlandırılabilir veya yavaşlatılabilir. Bazı durumlarda katı partikül erozyonu, kumlama ve yüksek hızlı aşındırıcılı su jeti kesiminde olduğu gibi faydalı bir durumdur ancak buhar ve jet türbinleri, akışkan yataklı yakma sistemi, boru hatları ve partikül madde taşıyan valfler dahil olmak üzere birçok mühendislik sisteminde ciddi bir sorundur. Katı partikül erozyonu karmaşık bir süreçtir, ana süreç katı partiküllerin hedef malzemeye çarpmasının neden olduğu mekanik etki olsa da erozyon sırasında termal, kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar gibi ikincil işlemler de gerçekleşebilir. Eroziif aşınma mekanizmalarının anlaşılmasını geliştirmeye yönelik çalışmalar kum bulamaçları taşıyan boru hatları, uçak gaz türbini / kompresör kanatları, petrol arıtımı ve küle maruz kalan kazan boruları gibi aşındırıcı ortamlarda kullanılan mekanik bileşenlerin hasarlarına ve azalan ömre göre gerçekleştirilir. Erozyon konusuna halihazırda büyük miktarda çalışma tahsis edilmiş olmasına rağmen birçok soru hala açıktır. Bu açık

soruların arkasındaki temel sorunlar erozyon sırasında malzeme kaldırmanın bazen sayıları yirmiyi aşan birbiriyle ilişkili birçok faktöre bağlı olması gerçeğiyle bağlantılıdır. Etkileyen faktörlerin tüm farklı kombinasyonları için deneyler yapmak kolay olmadığından erozyon davranışını tahmin etmek için çeşitli yöntemler ve teorik modeller geliştirmek için kapsamlı araştırmalara ihtiyaç vardır. Geleneksel malzemeler için önerilen modellerin hiçbirinin polimerlerin ve polimerik kompozitlerin aşınma davranışını güvenilir bir şekilde tahmin etmek için benimsenmeyeceği kabul edilmektedir [2].

## 2.1. Partikül Erozyonu Mekanizmaları

Erozyon sırasında malzeme kaldırma çarpma hızı, partikül boyutu ve şekli, hedef malzemenin ve katı partiküllerin mekanik özellikleri gibi birbiriyle ilişkili birçok faktörden etkilenen karmaşık bir süreçtir [21].

Şekil 2.1’de polimer ve kompozit malzemelerin aşınma performansını belirleyen çeşitli operasyon parametreleri ve malzeme özellikleri gösterilmektedir [22].



Şekil 2.1. Polimerlerin ve kompozitlerin erozif aşınma performansına etki eden çeşitli faktörler [22]

Aşınma performansını etkileyen tüm bu faktörlerin bir araya gelmesi çevresel şartlarla birleşerek kompleks bir yapı oluşturur [22].

### 2.1.1. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı

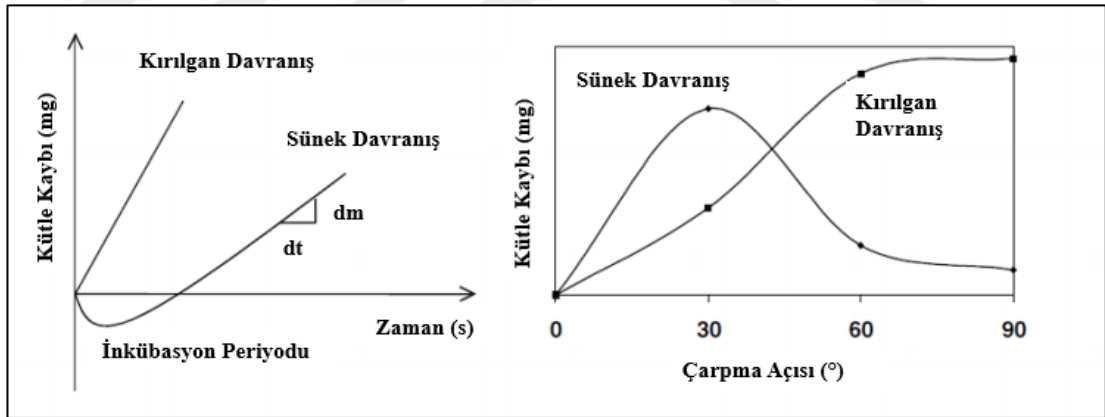
Erozif aşınma temas geriliminin aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisinden kaynaklandığı bir aşınma şeklidir. Partikül hızı ve çarpma açısı, aşındırıcının boyutuyla birleştiğinde çarpan partiküllerin kinetik enerjisinin bir ölçüsünü verir [1].

Çarpma açısı genellikle çarpışmadan hemen önce hedef yüzey ile partikülün yörüngesi arasındaki açı olarak tanımlanır [20]. Aşındırıcı partiküller hedef yüzeye düşük açılarla çarptığında çarpma kuvveti iki bileşene bölünebilir. Bunlardan biri malzemenin yüzeyine paralel  $F_P$  kuvveti ve diğeri dikey  $F_V$  kuvvetidir.  $F_P$  kuvveti aşınmayı kontrol eder,  $F_V$  kuvveti ise çarpma olayından sorumludur.  $90^\circ$  açı ile çarpma durumunda mevcut tüm enerji çarpma ve mikro çatlama ile dağıtılır, eğik açılarda ise  $F_P$  kuvvetinin belirleyici rolü nedeniyle hasar mikro kesme ve mikro sürme ile meydana gelir. Bu özelliklerin her ikisi de malzemenin aşınma şeklini etkiler. Bunlar aynı zamanda Şekil 2.2'de gösterildiği gibi sünek ve kırılğan olmak üzere farklı malzeme türlerinin farklı açısız bağlılıklar sergileyeceğini de gösterir [1]. Erozyon mekanizmasının temel olarak yüzeyin sünekliğine bağlı olarak değiştiği birçok araştırmacı tarafından kabul edilmiştir [23].

Şekil 2.2, sırasıyla çarpma süresinin ve açının bir fonksiyonu olarak tipik erozyon diyagramlarını göstermektedir. Abrazif aşınma durumunda olduğu gibi aşınan malzemeye ve çalışma parametrelerine bağlı olarak plastik deformasyon ve / veya gevrek kırılma ile erozif aşınma meydana gelir. Kırılğan ve sünek erozyonda malzeme kaldırma mekanizmalarıyla bağlantılı farklı aşınma mekanizmalarından bahsedilebilir. Bunlar kauçuklar için yırtılma ve yorulma, sünek metaller ve polimerler için kesme ve talaş oluşumu, seramikler, camlar ve kırılğan polimerler için çatlak oluşumu ve gevrek kırılmaya kadar değişen mekanizmalardır [2]. Katı partikül erozyonunun mevcut modelleri, sünek ve kırılğan malzemeleri ayrı olarak ele alarak iki temel teori oluşturur. Kırılğan malzemede erozyon aşındırıcı partikülün çarpma noktasından dışarıya yayılan çatlakların oluşumu ve kesişmesi ile meydana gelirken sünek malzemelerde aşındırıcı partiküllerin plastik deformasyonu, sürülmesi veya kesme hareketi nedeniyle aşınma meydana gelebilir [1].

Kırılğan malzemede maksimum erozyon oranı  $90^\circ$  çarpma açısında meydana gelirken sünek malzemeler için bazı orta ve genellikle  $15^\circ$ - $30^\circ$ lik çok daha küçük açıda

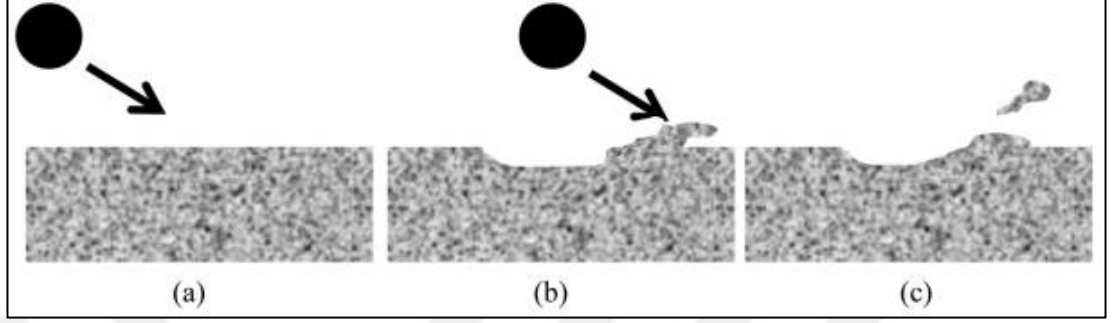
meydana gelir [1]. Sünek malzemelerde bir partikül düşük çarpma açısıyla yüzeye çarptığında bir krater oluşur ve ardından gelen diğer partiküllerin çarpması krateri büyütür ayrıca krater etrafında malzeme biriktirir. Üst üste yığılmış malzeme en sonunda devam eden partikül akışı etkisiyle kaldırılır. Bu yüzden maksimum erozyon düşük çarpma açılarında gerçekleşir. Kırılgan malzemelerde bir partikül yüzeye çarptığında yanıl ve radyal çatlaklar oluşur ve çarpan diğer partiküller ise bu çatlakların büyümesine sebep olur. Çatlaklar yüzeyi daha küçük parçalara böler ve diğer partiküller tarafından çıkarılabilir kılar. Bu yüzden maksimum erozyon 90° çarpma açısında gerçekleşir [23]. Yani erozyon oranı tipik olarak 15°-30° aralığında çarpma açılarında maksimumdan geçerse aşınan malzemenin tepkisi sünek olarak kabul edilir. Aksine, erozyon oranı artan çarpma açısı ile sürekli olarak artarsa ve 90° 'de (normal çarpma) maksimuma ulaşırsa aşınan malzemenin tepkisi kırılgandır. Kırılgan erozyon koşulları altında erozyon oranının büyüklüğü çarpma hızının sadece dikey bileşeni tarafından belirlenir ve aşındırıcı partikül boyutu erozyon oranını güçlü bir şekilde etkiler [22]. Sünek ve kırılgan malzemenin beklenen erozyon mekanizmaları Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te verilmiştir.



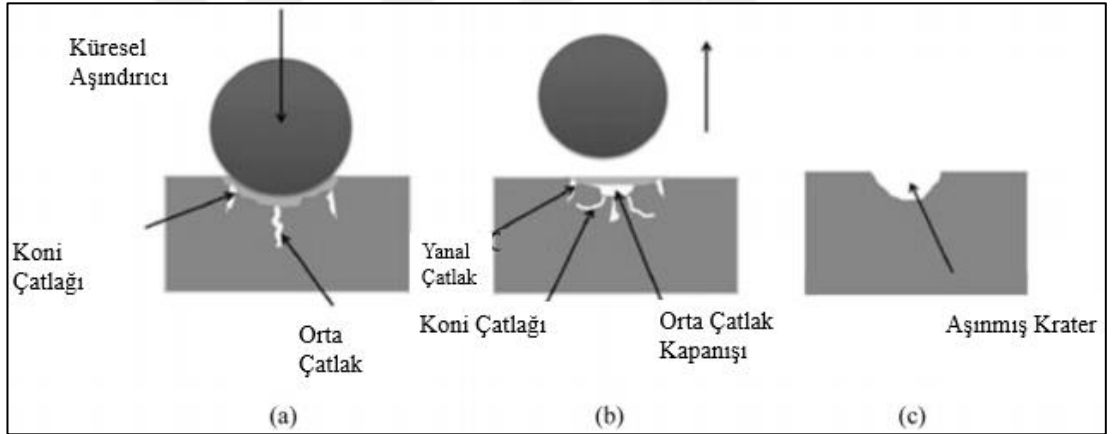
Şekil 2.2. Erozyon tipik davranış biçimlerinin şematik gösterimi [6]

Sünek erozyon sabit bir duruma gelmeden önce hedefin ağırlığının ilk önce arttığı bir inkübasyon (kuluçka) periyodunu içerebilir. Bu inkübasyon periyodu sırasında hedef malzemenin ağırlığı önce artar ve ardından kararlı bir duruma ulaşır. Normal çarpma durumunda hedef malzemenin ağırlık artışı, partikülün hedef yüzeye ilk gömülmesi ile ilgilidir. Normal açılarda erozyon ilerledikçe bu partiküller yüzeyden uzaklaştırılır ve kararlı bir duruma ulaşılır. Daha düşük çarpma açılarında inkübasyon süresi gömülü partiküllerle daha az ilişkilidir ve daha çok erozyon sırasında gerçekleşen

pürüzlendirme süreciyle ilişkilidir, çarpma enerjisi esas olarak hedef yüzeyin pürüzlendirilmesinde dağıtılır. Pürüzlendirme işlemi, basma ve çekme gerilmeleri altında polimerin yüksek derecede plastik deformasyonunu içerir. Bu, malzeme çarpma bölgesinden uzağa itilirken küçük yüzey tümseklerine neden olur. [2,6].

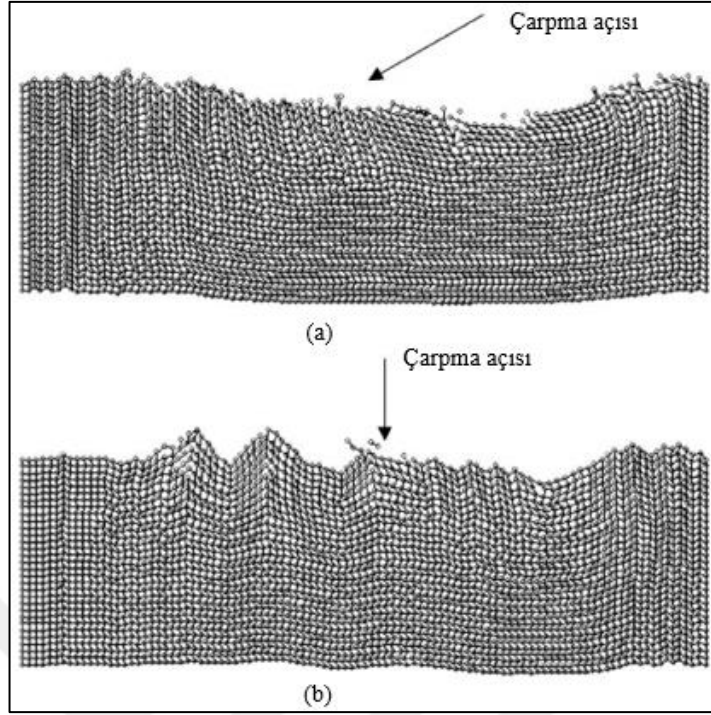


Şekil 2.3. Sünek malzemede beklenen erozyon mekanizması (a) çarpmadan önce (b) krater oluşumu ve kraterin bir tarafında biriken malzeme (c) malzemenin yüzeyden ayrılması [23]

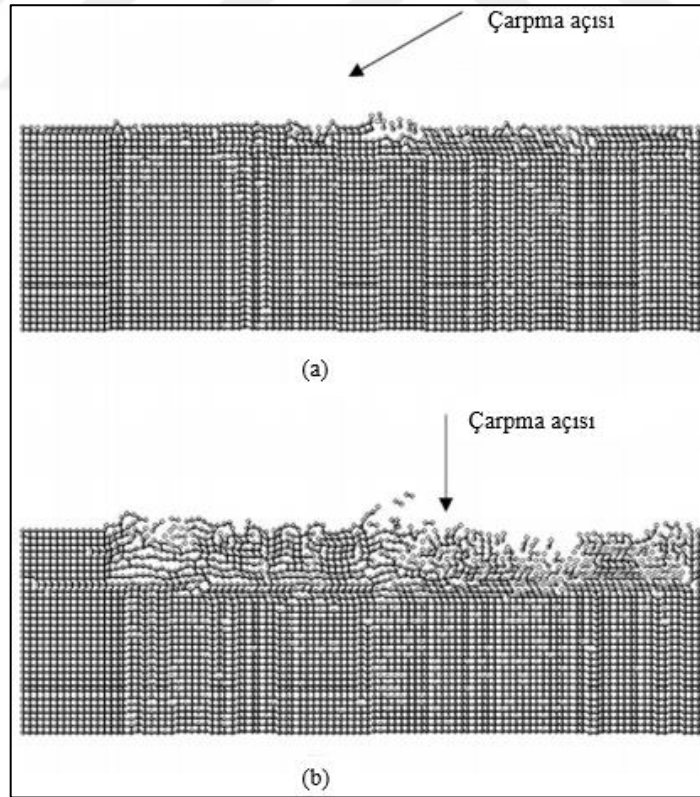


Şekil 2.4. Gevrek malzemede beklenen erozyon mekanizması (a) koni çatlak ve orta çatlakların büyümesi (b) orta çatlakların kapanması ve yanıl çatlakların oluşması (c) erozyona uğramış krater oluşması [23]

Sünek malzeme için  $30^\circ$  gibi düşük çarpma açılarının sebep olduğu kafes zararı,  $90^\circ$  gibi yüksek çarpma açılarının neden olduğundan önemli ölçüde daha büyük olur. Kırılmal malzemelerde durum tam tersidir,  $90^\circ$  açıda çarpmanın neden olduğu yüzey tabakasının çatlama ve hasarı,  $30^\circ$  çarpma açısında çarpmanın neden olduğu ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6, hedef malzemelerin  $30^\circ$  ve  $90^\circ$  çarpma açısında aşındıktan sonraki yüzey morfolojilerini göstermektedir.



Şekil 2.5. Sünek malzemenin yüzey morfolojisi (a) çarpma açısı=30° ve (b) çarpma açısı=90° [21]



Şekil 2.6. Kırılgan malzemenin yüzey morfolojisi (a) çarpma açısı=30° ve (b) çarpma açısı=90° [21]

Sünek bir malzeme plastik deformasyon kabiliyetinin iyi olması nedeniyle çarpmaya karşı nispeten yüksek bir dirence sahiptir. Kırılmanın genellikle çekme veya kesme gerilmesinden kaynaklandığı bilinmektedir. Katı partiküller 90° çarpma açısında (dikey yönde) çarptığında yanal çekme gerilimi, sünek malzemenin büyük kırılma gerilmesi nedeniyle etkili bir şekilde kırılmaya neden olmayabilir. Dolayısıyla sünek malzemeler 90° çarpma açısında düşük oranda hasar gösterirler. Ancak kırılğan malzeme deformasyona karşı savunmasızdır. Basma gerilimi altında bile yanal genişleme kırılmaya neden olmak için yeterli olabilir. Bu nedenle kırılğan bir malzeme çarpma enerjisine daha duyarlıdır, 30°’den 90°’ye doğru çarpma enerjisi artar. Sonuç olarak kırılğan malzeme için çarpma açısı arttıkça erozyon hasarı artar ve 90°’de maksimuma ulaşır [21].

### **2.1.2. Aşındırıcı partiküllerin çarpma hızı**

Çarpma hızının etkisi sünek ve kırılğan malzeme fark etmeksizin hız artışıyla erozyonun artışı şeklindedir [21]. Çarpma hızı çok düşük olduğunda çarpma anında oluşan gerilmeler kalıcı deformasyon oluşturamaz ve aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder, çarpma hızı arttığında kalıcı deformasyon gerçekleşebilir. Partiküllerin çarpma hızlarının çok yüksek olması polimerik malzemelerin çarpma yüzeylerindeki sıcaklığı ergime seviyelerine çıkarabilir [6,24].

Aşınma oranıyla çarpma hızı arasındaki ilişki Denklem (2.1)’de tanımlanmıştır;

$$-dm/dv = kv^n \quad (2.1)$$

burada “m” aşınan malzemenin kütlesi, “t” işlemin devam etme süresi, “k” deneysel bir sabit, “v” hız değeridir. “n” değeri malzemenin özelliğine göre değişmektedir, polimer kompozit malzeme kırılğan yapıda ise 3-5 aralığında, sünek yapıda ise 2-3 aralığında değer alabilmektedir [6, 24].

### **2.1.3. Aşındırıcı şekli**

Boyut, sertlik ve şekil gibi partikül özelliklerinin katı partikül erozyonu üzerinde önemli etkisi vardır. Erozyon oranının büyüklüğü üzerinde partikül keskinliğinin etkisi yüksektir. Keskin köşeli partiküllerden kaynaklanan erozyon oranı sonuçları yuvarlak partiküllerden kaynaklanan erozyon oranı sonuçlarından daha yüksektir [25].



Aşındırıcı partiküller eğer küresele yakın şekle sahipse erozyon plastik deformasyon ağırlıklı olarak eğer partiküller keskin kenarlı ise kesme, kırılma ve parçalanma şeklinde gerçekleşir [24]. Partikül şeklinin etkisinin temas alanıyla ilişkili olduğu söylenebilir. Üçgen şekilli ve benzer partiküller az temas alanına sahip olduğundan büyük temas gerilimi ve böylece büyük malzeme kaybı oluşur. Kare şekilli ve benzer partiküller fazla temas alanına sahip olduğundan küçük temas gerilimi ve böylece az malzeme kaybı oluşur [21].

#### **2.1.4. Aşındırıcı partikül boyutu**

Partikül boyutu erozyon büyüklüğünü etkileyen bir başka önemli partikül özelliğidir, büyük partiküller daha küçük partiküllerle aynı hızda bir hedefe çarpsalar bile daha büyük kinetik enerjilere sahiptir. Genel olarak daha küçük partikül daha düşük erozyon oranlarına neden olur çünkü daha küçük kinetik enerjiye ve yüzeyi aşındırmak için daha küçük çarpma kuvvetine sahiptir. Bununla birlikte erozyon miktarının 100-200 µm arasında kritik bir değer üzerinde partikül büyüklüğünden bağımsız olduğu kabul edilir. Partikül yoğunluğu, şekli ve sertliği de erozyonu etkiler ancak genel olarak daha büyük partikül benzer çarpma hızı ve partikül şekli, yoğunluğu ve sertliği için daha fazla erozyon hasarına neden olur [23].

Ancak küçük keskin partiküllerin büyük yarı yuvarlak veya yuvarlak partiküllerden daha aşındırıcı olabileceği dikkate alınmalıdır [23].

#### **2.1.5. Aşındırıcı partikül sertliği**

Yumuşak partiküllerin parçalanması ve yüzeye yapışması kinetik enerjiyi azaltır ve aynı zamanda erozyon oranını da düşüren bir parça partikül tabakası ile hedef yüzeyi kaplar. Bu nedenle daha sert partiküller daha aşındırıcı olabilir çünkü hedef yüzeye çarptığında daha az parçalanır. Bununla birlikte partiküllerin artık parçalanmadığı kritik bir sertlik değerinin ötesinde sertlikte daha fazla artış, aşındırıcılığı artırmaz [23].

#### **2.1.6. Aşındırıcı partikül yoğunluğu**

Aşındırıcı partikül yoğunluğu erozyonu belirlemede bir başka önemli faktördür. Daha yüksek yoğunluklu partiküller daha yüksek kinetik enerjiye sahiptir ve daha yüksek

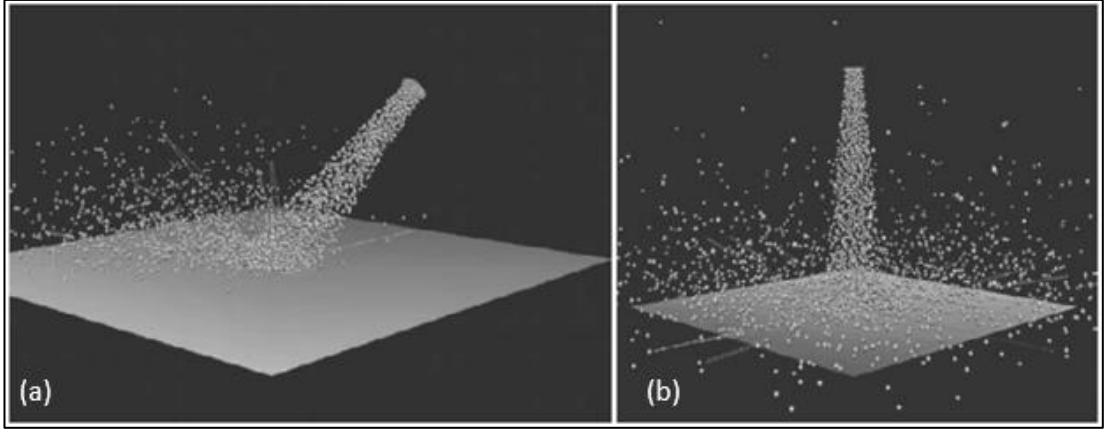
erozyon oranlarına neden olan daha fazla çarpma kuvveti oluşturur. Tablo 2.1’de gösterilen AISI 1020 çeliği üzerinde yapılan testte kullanılan partiküllerden çelik grit, alümina ( $Al_2O_3$ ), SiC ve  $SiO_2$  ile karşılaştırıldığında daha yüksek yoğunluğa sahiptir ve sonuç olarak daha yüksek erozyon oranına neden olur. SiC,  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$  neredeyse aynı yoğunluğa sahiptir ve partikül şekli ve boyutu benzer olduğundan neredeyse aynı erozyon oranına neden olur [23].

Tablo 2.1. AISI 1020 çeliğin aşındırıcı partikülleri ve erozyon oranı [23]

Partikül Bileşimi	Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	Mohs Sertliği	Vickers Sertliği	Erozyon Oranı (g/g)	
				$\alpha=30^\circ$	$\alpha=90^\circ$
$CaCO_3$	-	3	115	0,03	-
$Ca_5(PO_4)_3$	-	5	300	0,5	0,3
$SiO_2$	2,7	7	700	3,0	1,6
$Al_2O_3$	4,0	9	1900	2,6	1,4
SiC	3,2	>9	3000	3,3	1,9
Çelik grit	7,9	-	-	5,3	-
Çelik bilya	7,9	-	-	1,4	-

### 2.1.7. Partiküller arası etkileşim

Yüksek partikül konsantrasyonlarında partiküllerin hedef yüzeyden geri teptiklerinde hedef yüzeye doğru hareket eden ve onları yavaşlatan partiküllere çarptıkları öne sürülmüştür. Hedef yüzeyden seken partiküller, hedef yüzeye gelmekte olan partiküllere çarptıklarında bu partiküllerin parçalanmasına, yavaşlamasına ve kinetik enerjilerinin düşmesine sebep olabilir. Bu nedenle daha yüksek partikül konsantrasyonları daha düşük erozyon oranına neden olabilir ve belirli oranda erozyonu sağlamaya çalışan uygulamalarda istenmeyen bir durumdur [23]. Eğik ve dik çarpma durumlarında akış yoğunluğu Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Akış yoğunluğu (a) eğik çarpma simülasyonu ve (b) dik çarpma simülasyonu [32]

### 2.1.8. Sıcaklık

Isıl iletkenlik ve camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) katı partikül erozyonunu kontrol eden faktörlerdendir. Yüksek sıcaklıklar malzemeyi yumuşatabilir. Bu durum özellikle polimerler malzemelerin ısının etkisiyle yumuşayıp kolay deforme olur hale gelmesine sebep olmaktadır çünkü polimerlerin ısı iletme yetenekleri düşüktür. Artan sıcaklık polimerlerin mekanik özelliklerinin düşmesine sebep olur ve bu durumda bozulma ve malzeme kaybı meydana gelir. Oda sıcaklığından daha yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip olan polimerlerin erozyon aşınması, oda sıcaklığından daha düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip olanlardan daha yüksektir [23,26].

### 2.1.9. Hedef malzeme özellikleri

Birçok deneysel veriye rağmen hedef malzeme ile erozyon oranı arasındaki ilişki hala net değildir. Bazı araştırmacılar daha yüksek sertliğe sahip malzemeler kullanmanın hem daha yüksek erozyon direnci ile sonuçlandığına hem de sünekliğin, yüzeyin partikül çarpma kinetik enerjisini plastik deformasyonla dağıtmasına izin verdiğini ve bunun daha düşük erozyon oranına neden olabileceğini düşündüğünden yüksek sertliğe sahip bir malzemenin daha düşük sertliğe sahip malzemelere kıyasla daha yüksek bir erozyon oranına neden olabileceğine inanmışlardır. Hedef malzemenin tokluğu erozyon performansının daha iyi bir göstergesi olabilir çünkü artan sertlik sünekliği azaltabilir ve sonuç olarak gevrek mekanizmanın neden olduğu erozyon oranını artırabilir ancak artan tokluk, süneklikte azalma olmadan malzemenin enerji emme kabiliyetinin arttığını gösterir [25]. Tokluk bir malzemenin enerji emme

kabiliyetinin göstergesi olduğundan dolayı daha yüksek tokluğa sahip malzemeler daha yüksek erozyon direnci göstermektedir [27]. Lamy sertlik/kırılma tokluğu olarak kırılma indeksi önermiştir ve yaptığı çalışmalarda erozyon oranının kırılma indeksinin artmasıyla arttığını bulmuştur [26].

## **2.2. Polimer Matris Kompozitlerin Eroziyon Aşınması**

Yapılan birçok araştırma polimer kompozit malzemelerin saf polimerlere göre daha zayıf erozyon direnci sergilediğini göstermiştir [28]. Hedef malzeme bir polimer kompozit malzeme ise eroziyon aşınma için matris malzemesi, fiber içeriği ve fiber oryantasyonu önemli parametrelerdir. Termoplastik matrisli kompozit malzemeler sünek davranış (plastik deformasyon, sürme, sünek yırtılma) gösterirken ısıyla sertleşen (termoset) matrisli kompozitler gevrek kırılma (yüzey altı yanal çatlakların oluşması ve yayılması) ile aşınır. Yapılan birçok araştırma kırılma fiberlerin hem termoset hem de termoplastik matrislere dahil edilmesinin daha düşük erozyon direncine sahip bileşimlere yol açtığını göstermiştir. Araştırmalar eroziyon aşınmanın, termoplastik matrisli kompozitler için fiberlerin çarpma yönüne paralel olarak hizalanması durumunda, çarpma yönüne dikey olarak hizalanmasından daha büyük olduğunu göstermiştir [29]. Bu durumda paralel partikül akışı altında fiber demetleri çok daha kolay eğilir ve kırılır [20]. Paralel hizalanma durumundaki erozyonda matris düzgün şekilde oluklanır ve yerel malzeme kaldırmayla krater haline getirilir, burada deformasyon sünek davranış gösterir ve sürme mekanizması hâkim olur. Çarpma kuvvetinin paralel bileşeni aşındırıcı partiküllerin aşınmış yüzeye girmesini sağlayabilir. Sünek davranış ve aşındırıcının matrisle penetrasyonu, dikey yönde hizalanmış fiberler tarafından engellenmektedir bu nedenle oluklar çok daha az yoğun olur ve daha az malzeme çıkarılmış olur [29]. Termoset matrisli kompozitler için erozyon, partiküllerin fiber doğrultusuna dik yönde çarpması durumunda fiber doğrultusuna paralel yönde çarpmasına göre daha yüksektir. Dik çarpma durumunda fiber demetleri daha kolay bükülür ve kırılır. Bu, eroziyon aşınmada bir artışa neden olur. Paralel çarpma durumunda mikro bükülmeye karşı direnç yüksektir, burada matris malzemesinin hedef yüzeyden yerel olarak çıkarılması ve fiberlerin açığa çıkması söz konusudur [20]. Partikül takviyeli kompozitlerin erozyon davranışı takviye malzemesinin türüne ve takviye oranına bağlıdır. Kırılma yapıları partiküllerin takviyesi süneklikte kayba neden olmaktadır [30,31]. Sertlik, kırılma tokluğu, gerilme

mukavemeti ve nihai uzama gibi mekanik özellikler polimerlerin erozif aşınmasının kontrol edilmesinde önemli bir rol oynarken camsı geçiş sıcaklığının ( $T_g$ ) da polimerlerin katı partikül erozyonu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. PEEK, PPS gibi düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip yarı kristalin termoplastikler erozyon başlangıcında partikül gömülmesi sebebiyle kütle kazanımına yatkındır. PEI, PSU gibi yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip, sert ve amorf termoplastiklerde partikül gömülmesi gözlenmez. Daha yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip amorf polimerler, yarı kristalin polimerlerden daha hızlı aşınır. Tek bir çarpmanın ürettiği gerilme malzeme kaldırmaya neden olmak için yetersizdir ve gerilimi malzeme kaldırmaya neden olacak yeterli bir düzeye çıkarmak için birkaç ardışık çarpma gereklidir, bu nedenle elastomerlerin erozyon direnci ve inkübasyon süresi daha yüksektir [28].

### 3. AŞINDIRICI PARTİKÜL

Bilya, grit ve silindirik, kum püskürtme uygulamalarında kullanılan aşındırıcı partikül için üç temel şekil tanımıdır. Bilya, küresel şekle sahip partikülleri karakterize eder, bunların uzunluk/çap oranı 2'den küçüktür ve keskin kenarlar veya kırık kısımlar göstermezler. Grit, köşeli bir şekle sahip olan partikülleri karakterize eder, bu partiküller keskin köşelidir ve kırık kısımlar gösterir. Silindirik terimi bir kesme işlemi ile üretilen taneleri belirtir, bu tanelerin uzunluk/çap oranı 1'dir [32]. Şekil 3.1(a) grit ve Şekil 3.1(b) bilya olmak üzere temel partikül şeklini göstermektedir.

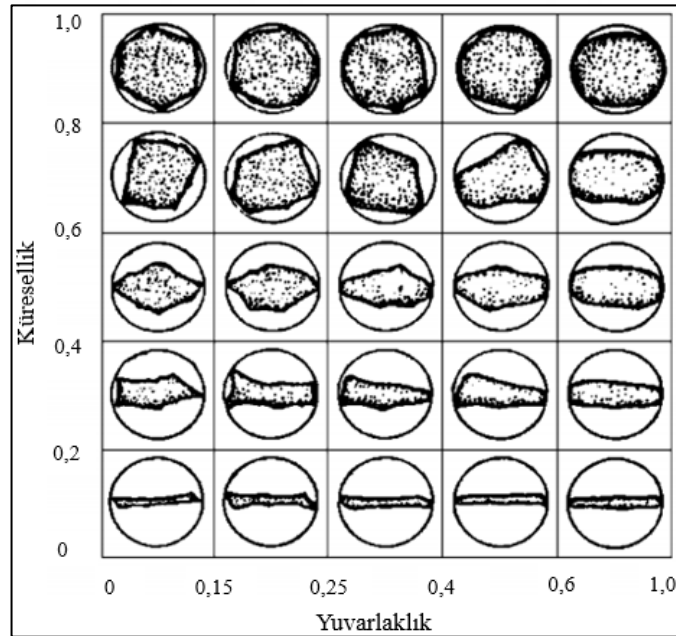


Şekil 3.1. Aşındırıcı partiküller için temel şekil tanımlamaları (a) grit ve (b) bilya [32]

Bahadır ve Badruddin aşındırıcı partikül şeklinin erozyon süreçleri üzerindeki etkisini uzama oranını esas alarak araştırıp aşındırıcı türü, aşındırıcı partikül çapı ve aşındırıcı partikül şekli arasında dikkate değer ilişkiler bulmuştur. Silika karbür partikülleri,

partikül boyutundaki artışla daha uzun ve daha az dairesel hale gelirken alüminyum oksit partikülleri için durum tam tersi olmuştur. Silika oksidin genel varyasyonu sistematik olmasa da silika karbür partiküllerininkine benzer bulunmuştur. Silis karbür partikülleri ve alüminyum oksit için uzama oranları küçük partikül aralığında partikül boyutuna çok duyarlı olmuştur. Eşit tane boyutları için silika oksit partikülleri, silika karbür partiküllerinden çok daha yüksek uzama oranlarına sahip olmuştur. Partikül boyutu ve şekli arasında bir ilişki de Djurovic ve arkadaşları tarafından not edilmiştir. Bu yazarlar küçük partiküllerin büyük partiküllerden daha az uzamış olduğunu bulmuştur. Bu sonuçlar partikül şeklinin aşındırıcı bir malzeme özelliği olarak kabul edilebileceğini açıkça göstermektedir [32].

Geometrik form bir partikülün ideal bir geometrik forma (küp, küre veya dörtyüzlü) yaklaşma derecesini temsil eden hacimsel bir şekil faktörüdür. Küresellik ve yuvarlaklık parametreleri partiküllerin geometrik biçimini tanımlayabilir. Aşındırıcı partiküllerin şeklini karakterize etmek için çeşitli referanslarda yuvarlaklık-küresellik diyagramları kullanılmıştır [32]. Böyle bir yuvarlaklık-küresellik diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

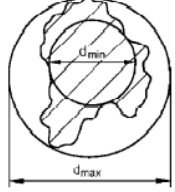
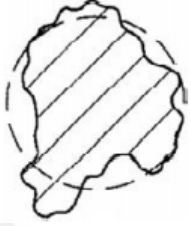
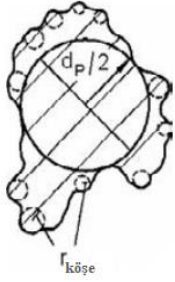
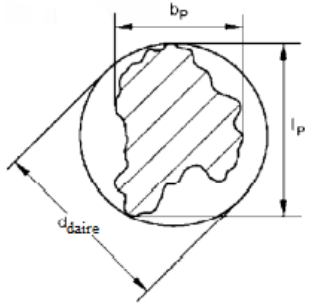
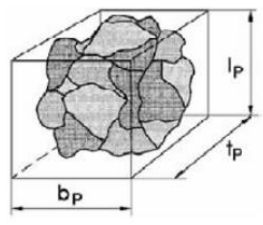


Şekil 3.2. Garnet aşındırıcı malzeme için yuvarlaklık-küresellik diyagramı [32]

Wadell tarafından sunulan küresellik, Tablo 3.1'de tanımlanmış ve gösterilmiştir. İki boyutta küresellik, kürenin iz düşüm alanıyla ilgilidir. Hem küresellik hem de

yuvarlaklık, çok köşeli partiküller için 0'dan ideal yuvarlak partiküller için 1'e kadar değişir [32].







Tablo 3.1. Aşındırıcı partiküller için şekil parametreleri (Wadell) [32]

Parametre ve Tanım	Grafiksel İfade
<p>Şekil Faktörü</p> $F_{\text{şekil}} = \frac{d_{\text{min}}}{d_{\text{max}}}$	
<p>Dairesellik Faktörü</p> $F_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_p}{\text{Çevre}^2}$	
<p>Yuvarlaklık</p> $S_R = \frac{\sum \left( \frac{2 \cdot r_{\text{köşe}}}{d_p} \right)}{N_{\text{köşe}}}$	
<p>Küresellik</p> $S_p = \frac{\sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot b_p \cdot l_p}}{d_{\text{daire}}}$	
<p>Uzama Oranı</p> $r_E = \frac{l_p}{b_p}$ <p>Yassılık Oranı</p> $r_F = \frac{l_p}{t_p}$	















Hansink, aşındırıcı partiküllerin şekillerinin değerlendirilmesi için alternatif bir yuvarlaklık ölçeği tanımlamıştır [32]. Köşeli ve yuvarlak partikül şekillerinin tanımlanması Tablo 3.2’de gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Köşeli ve yuvarlak partikül şekillerinin tanımlanması (Hansink) [32]

İsim	Çok köşeli	Köşeli	Az köşeli
Tanım	0,5	1,5	2,5
Şekil görüntüsü			
İsim	Az yuvarlak	Yuvarlak	İyi yuvarlak
Tanım	3,5	4,5	5,5
Şekil görüntüsü			

Gillespie ve Fowler kumlama ortamı için dairesellik faktörlerini araştırmak amacıyla görüntü analizi uygulamışlar ve  $F_0 > 0,83$  dairesellik parametresini bilyeli dövme uygulamaları için kabul edilebilir olarak tanımlamışlardır [32].

Bir dizi aşındırıcı partikül için dairesellik faktörü sonuçları Şekil 3.3'te gösterilmektedir, bazı partiküllerin kritik dairesellik faktörünü karşılamayacağı görülebilir. Kritik dairesellik faktörünü karşılamayan partiküller, Gillespie ve Fowler tanımlamasına göre bilyeli dövme uygulamaları için kabul edilebilir değildir.  $F_0 > 0,83$  dairesellik parametresine sahip partiküllerin  $F_0$  değerleri 0,83’ten daha büyük değerlere gittiğinde şekillerinin küreye yaklaştığı, 0,83’ten daha küçük değerlere gittiğinde ise şekillerinin köşeli yapıya doğru kaydığı görülebilir. Bu tanımlamaya göre bilyeli dövme uygulamaları için küreye yakın şekle sahip partiküllerin uygun olduğu söylenebilir.

		
0,958	0,923	0,921
		
0,921	0,872	0,858
		
0,849	0,823	0,799
		
0,772	0,717	0,704

Şekil 3.3. Görüntü işleme tekniği ile değerlendirilen çelik bilye partiküllerinin dairesellik faktörleri [32]

Tablo 3.3, bir dizi farklı aşındırıcı malzemenin dairesellik ve şekil faktörleri için bazı tipik değerleri listelemektedir.

Tablo 3.3. Garnet aşındırıcı malzemelerin şekil faktörleri ve şekil özellikleri (Vasek) [34]

Mineral	Alt Tür	Şekil Parametresi	
		F <sub>0</sub>	F <sub>şekil</sub>
Almandin	B	0,66	0,65
	M	0,69	0,67
	K	0,68	0,66
	G	0,66	0,64
Grossular	-	0,71	0,70
Andradit	V-A	0,67	0,65
	V-B	0,68	0,68
	V-C	0,65	0,68

Aşındırıcı olarak nitelendirilen malzemenin en önemli fiziksel özellikleri sertlik, tokluk, tane şekli ve boyutu, kırılma karakteri ve saflıktır. Herhangi bir kullanım için özellikler tek başına çok önemli değildir. Farklı uygulamalarda farklı özellikler aranabilir. Bazı uygulamalar matkap uçları için elmaslarda olduğu gibi aşırı sertlik ve tokluk gerektirir. Diğer kullanımlar için en büyük öneme sahip faktörler sertlik, yavaş parçalanma kabiliyeti ve işlem sırasında partikül aşındığında yeni kesme kenarları geliştirmesidir. Örneğin garnet zımpara kağıdında hızlı parçalanabilir, ufalanabilir veya son derece sert taneler arzu edilmez. Kritik uygulamalarda verimli kullanım için farklı tipteki aşındırıcılar nadiren tamamen birbirinin yerine kullanılabilir. Zımpara kağıdında hem kuvars hem de garnet kullanılmasına rağmen iki aşındırıcı uygulamalarda birbiriyle değiştirilemez [33].

Son analizlerde yüksek kaliteli aşındırıcı seçimi, birim maliyet başına aşındırıcının gerçekleştirdiği işin kalitesine ve miktarına bağlıdır. Yapay bir aşındırıcının başlangıç yatırım maliyeti doğal bir aşındırıcınınkinden çok daha fazla olabilir ancak yapay mineral daha hızlı çalışabilir bu nedenle nihai maliyet daha azdır. Bu sebeple yapay aşındırıcılar büyük ölçüde doğal aşındırıcıların yerini almıştır [33].

### **3.1. Garnet Aşındırıcı**

Garnet benzer genel kimyasal formüle, fiziksel özelliklere ve kristal formlara sahip bir grup demir-alüminyum silikat mineralidir, doğada bulunur ve genellikle su jeti kesiminde aşındırıcı olarak kullanılır. Genel formülü  $A_3B_2(SiO_4)_3$  şeklindedir. Burada iki değerlikli A elementi kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), ferröz demir ( $Fe^{2+}$ ) veya mangan (Mn) olabilir. Üç değerlikli B elementi ise alüminyum (Al), ferrik demir ( $Fe^{3+}$ ) veya krom (Cr) ve nadiren titanyum (Ti) olabilir [33]. Bileşime dayalı garnet sınıflandırma şemasında garnet iki katı çözelti serisi halinde gruplandırılır: pirlalpite ve ugrandit. Pirlalpite serisi almandin (Fe bakımından zengin), pirop (Mg bakımından zengin) ve spessartin (Mn bakımından zengin) içerir. Ugrandit serisi grossular (Ca zengini), andradit (Ca-Fe-Ti zengini) ve uvarovit (Ca-Cr zengini) içerir [34].

Garnet grubunun mineralleri  $3,4 \text{ g/cm}^3$  ile  $4,3 \text{ g/cm}^3$  arasında değişen özgül ağırlıklara sahiptir ve bunlar şeffaf veya opak olabilir. Garnet keskin köşeli bir sarf kumudur, kübik bir kristal sistemine sahiptir ve kristal şekilleri genellikle eşkenar dörtgen, on iki yüzlü, yirmi dört yüzlüdür. Camsı bir yapıya ve genellikle konkoidal kırığa sahiptir.

Kumlama uygulamalarında korozif etki yaratmadığından alüminyum oksit malzemesine alternatif olarak kullanılır [33, 35]. Garnet serbest silika içermemesi avantajına sahiptir ve bu nedenle silikoza neden olmaz. Dolayısıyla silika kumunun çevre ve insan sağlığına olumsuz etkisi nedeniyle bu malzemenin yerini almaya başlamıştır. Kuvarsa göre daha yüksek olan yoğunluğu eşit büyüklükteki kuvars tanelerinden daha sert darbeler vurmasını sağlar. Kumlama ve su jeti kesiminde geniş kullanım alanı bulur. Su jeti kesimi, garnet tanelerinin sağladığı yüksek kesme hızı ve dayanıklılık gerektirir. Garnet kimyasal ayrışmaya karşı olan direnç özelliği, tane şekli ve boyut dağılımı ve yüksek yoğunlukları sebebiyle çeşitli filtrasyon sistemlerinde kullanılır ayrıca yine filtrasyon sistemlerinde kullanılan silis kumu ve antrasite göre daha iyi özelliklere sahiptir. Bu tür kullanımlarda garnetin aşındırıcı kabiliyetinden çok yoğunluk ve tane şekil ve boyutu ön planda tutulur [33].

### **3.2. Alümina Aşındırıcı**

Kimyasal formülü  $Al_2O_3$  olan alüminyum oksit minerali (alümina), alüminyum metalinin oksijene karşı yüksek duyarlılığı sonucu oluşmaktadır. Bu mineraller kübik kristal sistemine sahiptir ve yüksek sertlik ve iyi aşınma direnci nedeniyle yüzey işlem sektöründe tercih edilmektedir. Köşeli yapıdaki aşındırıcıların aşındırma potansiyeli yüksektir. Alümina da köşeli yapısı ve yüksek sertlik değerleriyle aşındırıcılığı yüksek bir malzemedir ve bundan dolayı püskürtüldüğü yüzeyde kolayca pürüzlü yapı oluşturabilir. Bu sayede kaplama öncesi pürüzlendirme işleminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Alümina yüksek basınç etkisinde yüzeye püskürtüldüğünde boyutlarına bağlı olarak aşınan yüzeyde çok küçük yarıklar açmaktadır. Yarıklar açıldıktan sonra kaplama yapılırsa kaplama malzemesi bu yarıklara yerleşir ve ana metale daha iyi tutunur, böylece kaplama kalitesi ve ömrü daha yüksek olur. Alümina yüzey temizleme işlemlerinde de kullanılmaktadır [36].

Alümina saflık derecesine göre beyaz, kahverengi ve pembe renkte bulunur. Sahip olduğu saflık derecelerinden dolayı özellikle paslanmazlık özelliğine sahip malzemelerin kumlanmasında kullanılır. Kahverengi alüminaya göre az miktarda toz oluşturarak daha temiz yüzeyler oluşturan beyaz renkli alümina farklı malzeme gruplarının kumlanmasında öncelikli olarak kullanılabilir. Bunlar paslanmaz çelik alaşımları, alüminyum ve titanyum alaşımları, pirinç ve bakır alaşımları ile

porselen esaslı malzeme gruplarıdır. Kahverengi alümina içeriğindeki serbest demir sebebiyle püskürtüldüğü yüzeylerde paslanmazlık ve renk kalitesi özelliğini olumsuz etkilemektedir. Bu özellikten dolayı kahverengi alümina paslanmazlık özelliğinin önemli olmadığı ve yüzey rengi kalitesinin zorunlu olmadığı durumlarda tercih edilmelidir. Alüminalar silis kumu, garnet gibi diğer malzemelere göre daha yüksek sertlik ve daha az toz çıkışı sağlar. Neme duyarlı olduklarından depolanmalarında neme maruz kalmamalarına dikkat edilmelidir [36].



#### 4. LİTERATÜR TARAMASI

Tez çalışmasında incelenen PTFE malzeme ve kompozitleri ile bazı diğer polimer kompozitlerin ve kırılma veya sünek davranış gösteren bazı diğer malzeme türlerinin aşınma davranışları üzerine yapılan araştırmalar bu bölümde verilmiştir.

Ye Sujuan ve Zeng Xingrong, PTFE ve PTFE kompozitlerinin tribolojik özelliklerinin anlaşılması üzerine yaptıkları çalışmada bronz, cam fiber, karbon fiber gibi dolgu maddelerinin genel olarak PTFE'nin büyük ölçekli parçalanmasını engelleyerek aşınma oranını düşürdüğünü bulmuşlardır. SEM görüntülerinde PTFE kompozitlerinin aşınmış yüzeylerinin pürüzsüz olduğunu, saf PTFE'nin yüzeyinin ise pürüzlü olduğunu ve büyük aşınma kalıntıları oluştuğunu görmüşlerdir [37]. Yusuf Şahin PTFE'nin abrazif aşınma davranışı üzerine yaptığı çalışmada karbon dolgusu (%25) dahil edilmesinin aşınmanın azaltılmasına biraz katkıda bulunduğunu ve bu kompozitlerin cam fiber takviyeli (%15) ve saf PTFE malzemeye göre biraz daha iyi bir aşınma direnci sergilediğini bulmuştur [38]. Yusuf Şahin disk üzerinde aşındırma test cihazını kullanarak yaptığı başka bir çalışmada cam dolgulu (%15) PTFE kompozitlerin karbon (%25) ve bronz dolgulu (%60) PTFE'ye göre daha iyi aşınma direnci sergilediğini bildirmiştir [39]. Li ve Ran, saf PTFE'nin abrazif aşınma özelliklerini PTFE kompozitleri ile karşılaştırmıştır. Sonuçlara göre PTFE'nin spesifik aşınma oranı cam ve karbon fiberlerinin eklenmesiyle azaltılmıştır, karbon fiber eklenmesiyle daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. İyi fiber ve matris yapışmasının, karbon fiber takviyeli PTFE malzemenin en düşük oranı sergilemesinin nedeni olabileceğini vurgulamışlardır. Pek çok çalışma PTFE kompozitlerinin aşınma özelliklerini iyileştirmek için mevcut olan çeşitli katkı türlerini incelemiştir. Bununla birlikte Li ve Ran tarafından yapılan inceleme kısa fiber uygulanmasının matrisin aşınma direncini düşürdüğünü, örgü tipi kompozitin ise aşınma direncini iyileştirdiğini göstermiştir [18]. Caio Valente ve arkadaşları bronz ve grafitle takviye edilmiş PTFE malzemenin paslanmaz çelik diske karşı aşınma davranışını incelemişlerdir. Sonuçlara göre her iki takviye de aşınma direncinin artmasına ve kaybedilen malzeme kaybının azalmasına sebep olmuştur. Her iki kompozit için adhezif (transfer filmleri) ve abrazif (mikro

sürme ve mikro kesme) aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Bronzla takviye edilmiş PTFE daha fazla çizik sunmuştur [40]. Goyal ve Yadav, sırasıyla %5 ve %10 grafit partikül içeren PTFE kompozitler için aşınma oranlarının 22 ve 245 kat daha düşük olduğunu bulmuştur [41]. Bahadur ve Tabor, paslanmaz çelik ve cama karşı kuru kaymada grafit ve bakır sülfür (CuS) içeren PTFE kompozitlerini araştırmıştır ve saf PTFE'den 100 kat daha düşük aşınma oranları elde etmiştir [42]. Jisheng ve Gawne bronz ile takviyelendirilmiş PTFE'nin, saf PTFE'den 11 kat daha düşük aşınma oranı sergilediğini bulmuştur [43]. Rahul Kumar ve arkadaşları PTFE kompozitlerinin kayma, erozif ve abrazif aşınma davranışları üzerinde yaptığı çalışmada çok düşük bazalt fiber içeriğinin bile kompozitlerde yüksek aşınma direnci oluşturduğunu bulmuşlardır [5]. Harsha ve arkadaşları saf PEEK ve kısa cam ve karbon fiber, PTFE ve grafit ile takviyelendirilmiş kompozitlerinin katı partikül erozyonu davranışını karakterize etmek amacıyla çalışmışlardır. Sonuçlara göre saf PEEK ve %20 cam fiber takviyeli PEEK kompoziti, 30°'lik bir çarpma açısında maksimum erozyon oranı sergilemiştir, diğer PEEK malzemeler ve bunların kompozitleri incelenen mevcut deneysel koşullar altında 60° çarpma açısında maksimum erozyon oranı göstermiştir. Fiber takviyeli kompozitlerde erozyon oranını saf matrise göre daha yüksek bulmuşlardır, fiber içeriğinin artması ile kompozitlerin erozyon oranı artmıştır. Karbon fiber takviyeli PEEK kompozitin, cam fiber takviyeli PEEK kompozitlerine kıyasla daha kötü aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür. PTFE ve grafit gibi dolgu maddelerinin erozif aşınma performansına zararlı olduğu görülmüştür. Aşınmış yüzeylerin SEM çalışmalarında plastik deformasyon, mikro çatlama, erime, gömülmüş partikül, fiber çatlama ve çıkarılması görülmüştür [26]. Tsiang cam, grafit ve kevlar fiberlere sahip çok çeşitli termosetler ve termoplastik polimer matris kompozitler üzerinde erozyon testleri gerçekleştirmiştir ve çalışmasında termoset matrisli kompozitlerde erozyonun kırılkan davranış gösterdiğini termoplastik matrisli kompozitlerde ise yarı sünek erozyonun baskın olduğu sonucuna varmıştır. Manish Roy ve arkadaşları da termoset matrisli (epoksi ve fenolik) kompozitlerin kırılkan davrandıklarını, termoplastik matrisli (polyester) kompozitlerin ise sünek tepki verdiğini bildirmişlerdir. Tewari ve arkadaşları, tek yönlü karbon ve cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin erozif aşınma karakterizasyonunu araştırmak üzere yaptıkları çalışmada her iki kompozitin de sünek davranış göstererek 60° çarpma açısında en yüksek erozyon oranına sahip olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca erozyon

oranının, partiküllerin fiber doğrultusuna dik bir şekilde çarpması durumunda paralel yönde çarpmaları durumundan daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. 90/45 (45° fiber oryantasyonu) ve 90/90 (90° fiber oryantasyonu) ile karşılaştırıldığında 90/0 (0° fiber oryantasyonunda) oryantasyonunun özellikle 60° çarpma açısında daha yüksek erozyon gösterdiğini görmüşlerdir. Cam fiber takviyeli epoksi kompozit, karbon fiber takviyeli kompozite göre daha yüksek aşınma göstermiştir [20]. Chen Q. ve Li D.Y. sünek ve kırılğan malzemelerin katı partikül erozyonunun çalışma parametrelerinden nasıl etkilendiğini mikro ölçekli dinamik model (MSDM) ile simüle ederek araştırmışlardır. Çalışmalara göre sünek malzeme olarak seçtiği metal ve kırılğan malzeme olarak seçtiği seramik malzemenin 45° çarpma açısında aşındırılmasında her ikisinde de aşındırıcı hızının artmasıyla malzeme kaybının arttığını, sünek davranışta maksimum malzeme kaybının 30° çarpma açısında, kırılğan malzemedede 90° çarpma açısında gerçekleştiğini bulmuşlardır. 40° çarpma açısında sünek malzeme üzerinden partikül şeklinin etkisini incelediklerinde üçgen partikülün en fazla malzeme kaybına neden olduğunu ve bunu izleyen dairesel partikülün kare şekilliden daha fazla malzeme kaybına neden olduğunu görmüşlerdir. Üçgen bir aşınmış partikül en küçük temas alanına sahip olmuştur bu nedenle en büyük temas gerilimine ve dolayısıyla en büyük erozyon kaybına yol açmıştır, kare partikül maksimum temas alanına sahip olmaktadır ancak dairesel şekilli olandan daha güçlü sürme etkisine sahip olmuştur bu yüzden de bunun sebep olduğu malzeme kaybını dairesel şekilliye yakın değerlerde bulmuşlardır [21]. Suresh Arjula ve arkadaşları yüksek performans termoplastik polimerlerin katı partikül erozyonu davranışını araştırmaya yönelik yaptıkları çalışmada seçilen tüm polimerlerin sünek davranış gösterdiğini ve maksimum 30°, minimum 90°'de aşındığını gözlemlemişlerdir. Düşük çarpma açılarında mikro sürme ve mikro kesme, dik çarpmada ise mikro çatlama ile deformasyon gerçekleşmiştir. PEEK eğik çarpma açılarında diğer polimerlerden daha iyi bir erozyon direnci göstermiştir. Daha yüksek çarpma açılarında ise PPS, matrisin yumuşaması ve aşındırıcı partiküllerin gömülmesi nedeniyle daha iyi bir erozyon direnci göstermiştir. Yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip, sert ve amorf termoplastiklerde (PEI, PSU) partikül gömülmesi gözlenmemiştir, düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip yarı kristalin termoplastikler (PEEK, PPS) erozyon başlangıcında partikül gömülmesi sebebiyle kütle kazanımı göstermiştir [28].



Araştırmacılar partikül Şeklinin erozyon oranı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Salik bunun, erozyon oranını belli bir dereceye kadar etkileyebileceğini göstermiştir. Levy ve Chick de aynı davranışı gözlemlemişlerdir ve partikül keskinliğinin erozyon oranı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Bunlar keskin köşeli ve küresel olmak üzere iki farklı partikül Şekli tanımlamışlardır ve yaptıkları çalışmalarda keskin köşeli olanların sebep olduğu erozyon oranını küresel Şekilli partiküllerin sebep olduğundan 4 kat fazla bulmuşlardır [1015,1016]. Onlar ayrıca partikül bileŐiminin AISI 1020 karbon çeliğinin erozyon davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada belli bir boyut aralığında keskin köşeli beŐ farklı kırılĐan partikül kullanıŐlardır ve sert partiküllerin daha yumuşak olanlara göre daha fazla erozyon oranına sebep olduğunu bulmuşlardır. Ancak belli bir sertlik değerinden sonra sertlikte artıŐın erozyon oranını önemli ölçüde artırmadığını keŐfetmiŐlerdir bunun nedeninin partiküllerin paralanmayacak kadar sert oluşu olabileceğini düŐünmüŐlerdir. Gandhi ve Borse dökme demir üzerinden iki farklı çarpma açısında yaptıkları erozyon testinde iki açıda da partikül boyutu ve erozyon oranı arasında doğrusal ilişki bulmuşlardır. Bu ilişki hedef malzeme özellikleri, deneysel koşullar, partikül çarpma hızı, partikül etkileŐimleri ve partikül boyutu dağılımı gibi çeşitli faktörlerden etkilenmiŐtir. Desale ve arkadaşları sabit bir partikül konsantrasyonunda (ağırlıkça %), partikül boyutunu artırmanın partikül sayısını ve çarpmaları azaltmasına rağmen erozyon oranını artırdığı sonucuna varmıŐlardır [25].

## 5. MALZEME VE YÖNTEM

Erozyonla ilgili yürütülen araştırma çalışmalarına ilişkin mevcut raporlar üç kategori altında sınıflandırılabilir; deneysel araştırmalar, erozyon modeli geliştirmeleri ve sayısal simülasyonlar. Bunlardan çoğu makalenin birinci kategoriye odaklandığı, ikinci ve üçüncü kategorilerin ise çok daha az ilgi gördüğü açıkça görölmektedir. Bunun nedeni büyük olasılıkla erozyon modelleri ve / veya sayısal simülasyonların geliştirilmesindeki artan karmaşıklıktır [2]. Tez çalışmasında da erozif aşınmaya yönelik araştırmalar, deneysel çalışma ile yürütölmüştür.

### 5.1. Malzeme

#### 5.1.1. Hedef malzeme

Deneysel çalışmalarda hedef malzeme olarak Polikim Polimer ve Kimya firmasından temin edilen ve şerit testerede kesilerek 6 cm x 6 cm boyutlarında plakalar halinde hazırlanmış olan saf haldeki PTFE (Teflon) ve PTFE malzemenin %25 oranında cam fiber, %35 oranında karbon partiköl ve %60 oranında bronz partiköl ile takviye edilmiş kompozitleri kullanılmıştır.

Saf PTFE malzeme kimyasal dayanımın önemli olduğu uygulamalar, yalıtım amaçlı elektrik uygulamaları, yüzey kaplamaları, conta gibi sızdırmazlık uygulamaları, korozyon riski altındaki boru, vana ve bağlantı parçaları, konveyör bantları, kayar mesnetler, burç, yatak ve segmanlar gibi kullanım alanlarına sahiptir. Cam fiber takviyeli, bronz partiköl ve karbon partiköl takviyeli PTFE malzemeler de contalar, yataklar, segmanlar, vana parçaları gibi benzer uygulamalarda kullanım alanı bulur [44]. Uygulama alanına bir örnek alüminyum, çelik gibi malzemelerin aşınmaya karşı direncin artırılması, korozyona karşı direnç sağlanması veya hidrofobik yapı kazandırılması gibi amaçlarla PTFE ile hatta genel olarak floropolimerler ile kaplanabilmesi üzerinden verilebilir. Bir diğer örnek peynir ve bisküvi üreticilerinin yapışmayı önleme amaçlı PTFE kullanmasından verilebilir. PTFE malzeme ve kompozitlerinin fiber ve partiköl içeriği ve özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. PTFE malzeme ve kompozitlerinin fiber ve partikül içeriği ve özellikleri [44]

Hedef Malzeme	İçeriği	Özellikler
Saf PTFE	-	En düşük sürtünme katsayısı, üstün elektriksel yalıtım, yanmama, yüksek ısı yalıtımı, yüksek basınç dayanımı, düşük yoğunluk, geniş kullanım sıcaklığı aralığı (-260°C ile +270°C), mükemmel kimyasal dayanım, kesinlikle yapışmama, nem, ortam ve hava şartlarına tam dayanım, su emmeme, yüksek esneklik
Cam Fiber Takviyeli PTFE	%25 cam fiber	Yük altında deformasyona ve aşınmaya yüksek direnç, asitlere ve oksidasyona yüksek dayanım, yüksek elektriksel yalıtım özelliği
Karbon Partikül Takviyeli PTFE	%35 karbon partikül	Yük altında deformasyona yüksek direnç, kuru ve yağlı ortamlarda yüksek aşınma direnci, korozyon ortamlara dayanıklılık, sulu ortamlar için ideallik, yüksek ısı iletkenliği
Bronz Partikül Takviyeli PTFE	%60 bronz partikül	Yük altında deformasyona ve aşınmaya yüksek direnç, yüksek ısı iletkenliği, mekanik olarak kolay işlenme, karbon partikül takviyeli ve cam fiber takviyeli PTFE malzemeye göre daha az kimyasal dayanım

Hedef malzeme polimer kompozit olduğunda matris malzemesi ve takviye oranı erozif aşınma için önemli parametreler haline gelir. Bu iki parametreye bağlı olarak malzemenin erozif aşınma davranışı değişir dolayısıyla erozif aşınma direnci azalabilir veya artabilir. Tez çalışmasında tercih edilen takviye oranları Polikim Polimer ve Kimya firmasının çeşitli özellikleri sağlamak amacıyla belirlemiş, ideale oturtmuş ve halihazırda uygulamakta olduğu oranlardandır. Tez çalışmasında cam fiber takviyesi %25, karbon partikül takviyesi %35 ve bronz partikül takviyesi %60 oranında uygulanmıştır. PTFE malzeme ve kompozitlerinin teknik değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. PTFE malzeme ve kompozitlerinin teknik değerleri [44]

Özellikler	Birim	Test ASTM	Saf	Cam fiberli	Karbon partiküllü	Bronz partiküllü
Özgöl Ağırlık, 23°C	g/cm <sup>3</sup>	D792	2,1- 2,2	2,2- 2,3	2,0-2,1	3,8-4,0
Mekanik Özellikler						
Çekme Dayanımı Kopmada	daN/cm <sup>2</sup>	D638	140- 380	150- 240	110-160	140-220
Kopma Uzaması 23°C	%	D638	200- 400	200- 270	55-90	110-220
Basma Dayanımı (%1 Deformasyon), 23°C	daN/cm <sup>2</sup>	D695	45-50	65-70	95-120	105-110
10 kg/cm <sup>2</sup> yük, 150°C, 24 Saat	%		...	2,6- 2,8	1,3-1,5	1-1,1
50 kg/cm <sup>2</sup> yük, 150°C, 24 Saat	%		...	15-16	5-6	9-10
Darbe Dayanımı (İzod, çentikli)	kJ/m <sup>2</sup>	D256	15,5- 16,5	12-15	8,5-9	10-11
Sertlik	Shore D	D2240	54-60	64-68	66-70	65-70
Fiziksel Özellikler						
Sürtünme Katsayısı, Statik			0,04	0,07	0,13	0,07
Sürtünme Katsayısı, Dinamik			0,06	0,09	0,16	0,13
Termal Özellikler						
Özgöl Isı	kcal/kg°C		0,23- 0,25	...	...	...
Isı İletkenliği (x10 <sup>-4</sup> ) 30°C	cal/cm.sn.°C		5,5-6	10-11	19-21	17-20
Çalışma Sıcaklığı, Minimum	°C		-260	-260	-260	-260
Çalışma Sıcaklığı, Maksimum	°C		+270	+270	+270	+270

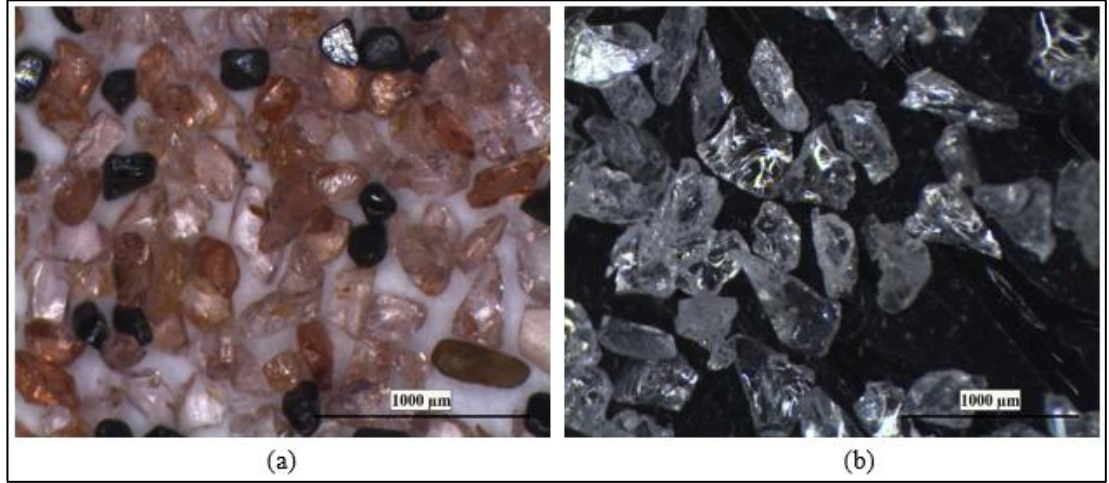
### 5.1.2. Aşındırıcı malzeme

Deneysel çalışmada hedef malzeme yüzeyine püskürtülmek üzere Saykar Kumlama firmasından temin edilen garnet ve alümina olmak üzere iki farklı tip aşındırıcı partikül kullanılmıştır. Farklı tipteki iki aşındırıcı partikül garnet ve alüminanın boyutları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Garnet ve alümina aşındırıcı partiküllerin boyutları

Aşındırıcı Partikül Tipi	Aşındırıcı Partikül Boyutu
Garnet	60 mesh (180-600 $\mu\text{m}$ )
Alümina	60 mesh (212-300 $\mu\text{m}$ )

Aşındırıcı partiküllerin mikroskop görüntüsü Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Aşındırıcı partiküllerin mikroskop görüntüleri (a) garnet ve (b) alümina

Mikroskop görüntülerine göre alümina aşındırıcı partikül nispeten daha keskin köşelere sahiptir, garnet aşındırıcı partikül ise keskin köşelere sahip olmasına rağmen köşelerin daha yumuşak geçişli olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum erozif aşınma davranışını etkileyen önemli bir özelliktir ve tez çalışmasında da Bölüm 6 ve Bölüm 7'de bahsedilecek olan sonuçlar bu duruma göre şekillenmiştir. Tablo 5.4 alümina mineralinin, Tablo 5.5 ise garnet mineralinin fiziksel özelliklerini göstermektedir.

Tablo 5.4. Alümina mineralinin fiziksel özellikleri [36]

Özgül ağırlık	3,92 g/cm <sup>3</sup>
Ortalama dökme yoğunluğu	2,4 g/cm <sup>3</sup>
Sertlik	9 (mohs ölçeği)
Kristal sistemi	Kübik
Kristal şekli	Köşeli
Kırılma	Dökme mineralin preslenmesi suretiyle
Dayanıklılık	Yüksek
Serbest akış özelliği	Minimum %97
Aside duyarlılık	Yoktur
Nem çekme özelliği	Vardır
Manyetiklik özelliği	Çok hafif manyetikdir
Elektrik iletimi	100 metre başına microsiemens
Radyoaktivite özelliği	Tespit edilmemiştir
Patolojik zarar verme özelliği	Yoktur
Serbest silika içeriği	Yoktur

Tablo 5.5. Garnet mineralinin fiziksel özellikleri [35]

Özgül ağırlık	4,1 g/cm <sup>3</sup>
Ortalama dökme yoğunluğu	2,4 g/cm <sup>3</sup>
Sertliği	>8 (mohs ölçeği)
Kristal sistemi	Kübik
Kristal şekli	Dodekahedron ve nadiren de Trapezohedron
Kırılma	Yarı-konkoidal (midye kabuğu şekli)
Dayanıklılık	Yüksek
Serbest akış özelliği	Minimum %97
Aside duyarlılık	Yoktur
Nem çekme özelliği	Nem çekmez
Manyetiklik özelliği	Çok hafif manyetikdir
Elektrik iletimi	10 metre başına microsiemens
Radyoaktivite özelliği	Tespit edilmemiştir
Patolojik zarar verme özelliği	Yoktur
Serbest silika içeriği	Yoktur

Rastgele seçilmiş 20'şer tane garnet ve alümina aşındırıcı malzemenin boyutlarıyla hesaplanan küresellik,  $F_{\text{şekil}}$  ve uzama oranı değerleri garnet aşındırıcı malzeme için Tablo 5.6 ve alümina aşındırıcı malzeme için Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.6. Garnet aşındırıcı partikül için değerler

Partikül No	Küresellik	$F_{\text{şekil}} (d_{\text{min}}/d_{\text{max}})$	Uzama Oranı ( $l_p/b_p$ )
1	0,5	0,34	2,77
2	0,69	0,62	1,62
3	0,75	0,80	1,13
4	0,86	0,94	1,07
5	0,52	0,41	2,05
6	0,73	0,72	1,31
7	0,59	0,44	2,29
8	0,59	0,47	2,07
9	0,64	0,55	1,75
10	0,72	0,66	1,52
11	0,78	0,82	1,14
12	0,59	0,48	2,00
13	0,72	0,70	1,36
14	0,65	0,58	1,57
15	0,63	0,53	1,85
16	0,72	0,73	1,25
17	0,51	0,35	2,71
18	0,73	0,76	1,15
19	0,79	0,83	1,16
20	0,63	0,55	1,67

Rastgele seçilen 20 adet garnet aşındırıcı partikül boyutları doğrultusunda hesaplanan küresellik ortalama değeri 0,67 olarak,  $F_{\text{şekil}}$  ortalama değeri 0,62 ve uzama oranı ortalama değeri ise 1,67 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.7. Alümina aşındırıcı partikül için değerler

Partikül No	Küresellik	$F_{\text{şekil}} (d_{\text{min}}/d_{\text{max}})$	Uzama Oranı ( $l_p/b_p$ )
1	0,61	0,37	2,11
2	0,84	0,60	1,54
3	0,68	0,37	2,58
4	0,72	0,43	2,19
5	0,75	0,74	1,32
6	0,61	0,30	3,29
7	0,73	0,71	1,35
8	0,71	0,66	1,48
9	0,69	0,61	1,65
10	0,74	0,71	1,35
11	0,67	0,58	1,68
12	0,56	0,41	2,35
13	0,68	0,60	1,62
14	0,69	0,65	1,43
15	0,80	0,87	1,08
16	0,77	0,80	1,18
17	0,48	0,29	3,43
18	0,81	0,90	1,03
19	0,66	0,67	1,43
20	0,66	0,58	1,65

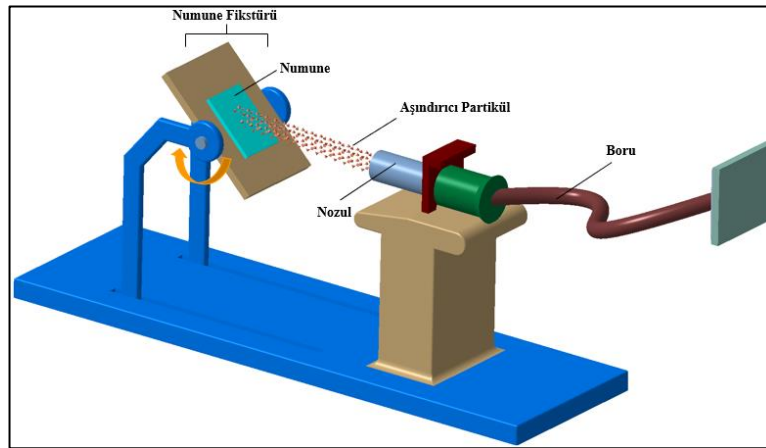
Rastgele seçilen 20 adet alümina aşındırıcı partikül boyutları doğrultusunda hesaplanan küresellik ortalama değeri 0,693 olarak,  $F_{\text{şekil}}$  ortalama değeri 0,59 ve uzama oranı ortalama değeri ise 1,79 olarak hesaplanmıştır.

### 5.1.3. Yöntem

#### 5.1.3.1. Erozyon testleri

Bu çalışmada hedef malzeme olarak seçilen ve kare plakalar şeklinde hazırlanan Teflon (PTFE) malzemesi ve takviye edilmiş kompozitleri kumlama yöntemi ile aşındırılmış ve farklı iki tip partiküle maruz kalmaları halindeki partikül erozyonu davranışları incelenmiştir. Aşınma testleri ASTM G77 standardına göre erozif aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, kumlama kabini, numune fikstürü ve kumlama tabancası elemanlarından oluşan bu test düzeneğinde kumlama işlemi oda sıcaklığında ve sabit basınç altında gerçekleştirilmiştir. Düzenekte açılı yüzeye sahip numune fikstürü, numunenin sabitlenmesini ve 15'er derece dönme hareketiyle istenilen açıda kum püskürtmesini sağlar. Şekil 5.2'de katı partikül erozyonu kumlama kabini düzenegini göstermektedir.

Deneysel çalışmalarda numuneler yüzeyine garnet ve alümina olmak üzere iki farklı tip aşındırıcı 5 mm çapındaki nozuldan ayrı ayrı püskürtülmüştür. Püskürtme 3 bar basınç altında 30 saniye süre ile 20 mm mesafeden yapılmıştır. 30 saniye süre boyunca püskürtülen toplam garnet aşındırıcı partikül kütlesi 703,8 gr, toplam alümina aşındırıcı partikül kütlesi ise 709,8 gr olmuştur, bu durumda püskürtülen toplam aşındırıcı partikül miktarlarının neredeyse aynı olduğu söylenebilir. Dolayısıyla erozif aşınmada belirleyici rolü, numunelerin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık farkı yani aşınma miktarı üstlenir. Aşındırıcı partiküllerin numunelerin yüzeyine çarpma açısı numune fikstürü kullanılarak 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°'ye ayarlanmıştır.



Şekil 5.2. Katı partikül erozyonu kumlama kabini düzenegini



### 5.1.3.2. Erozyon oranı hesapları

Deneysel olarak, bir malzemenin hacim kaybı veya ağırlık kaybı ölçülebilir ve aşınmış yüzey ve erozyon durumu analiz edilerek erozyon mekanizması incelenebilir [21]. Tez çalışmasında ağırlık kaybı ölçülerek erozyon oranları hesaplanmış ve erozyon mekanizmaları incelenmiştir. Numuneler erozif aşınma testinden önce ve sonra hava püskürtülerek temizlenmiş ve ardından 0,1 mg hassasiyette bir terazi ile tartılmıştır. Aşındırıcı partiküllerin yüzeye çarpma açılarının fonksiyonu olarak değişen aşınma miktarları, numunenin aşındırma işleminden önce ölçülen ağırlığı ile aşındırma işleminden sonra ölçülen ağırlığının farkı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan aşınma miktarı, yüzeye çarpan partiküllerin toplam kütlesine oranlanarak erozyon oranının hesaplanmasında kullanılmıştır.

Erozyon oranı hesabı Denklem (5.1)'de tanımlanmıştır [24];

$$\text{Erozyon Oranı} = \Delta m / M \quad (2.1)$$

burada  $\Delta m$  ağırlık farkı (g) ve M toplam kütle (g)'dir.

### 5.1.3.3. SEM analizleri

Malzemelerin erozyon oranlarıyla birlikte aşınmış yüzeylerin morfolojilerinin incelenmesinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları büyük önem taşımaktadır.

Tez çalışmasında farklı parametrelerin PTFE malzeme ve kompozitlerinin erozif aşınma davranışına olan etkilerinin anlaşılabilmesi, aşınma mekanizmalarının belirlenmesi ve aşınan malzemelerin yüzey morfolojilerinin değişiminin incelenmesi amacıyla aşındırılmış malzemelerin bir kısmının aşındırılmış yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Yüzeyde abrazif aşınma ağırlıklı deformasyonlar düşük çarpma açılarında olduğundan ve maksimum erozyon oranı 30° çarpma açısıyla aşındırmada görüldüğünden SEM ile incelenmek üzere malzemelerin 15° ve 30° çarpma açılarındaki aşınmış yüzeyleri seçilmiştir. SEM fotoğrafları ile elde edilen sonuçların nedenleri Bölüm 6'da irdelenecektir. Çalışmada kullanılan SEM cihazı Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. SEM cihazı

#### 5.1.3.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Partiküller kullanılarak doğru çalışma parametreleri altında istenilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edilmesi de mümkündür. Katı partikül erozyonu yüzey pürüzlendirme veya yüzey temizleme gibi amaçlar doğrultusunda iyi yönde de kullanılabilir. Hangi parametreler birleştirildiğinde istenilen yüzey pürüzlülüğünün ayarlanabilir olduğu araştırılabilir ve sonuçları genellikle yüzey profilometresi ile takip edilir. Tez çalışmasında aşınan yüzeylerin yüzey topografyasının incelenmesi ve yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi için optik profilometre (Nanovea PS50, USA) kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, farklı parametreler altında katı partikül erozyonu ile aşındırılan numunelerin yüzeylerinde aşınma hasarının bulunduğu bölgelerden alınmıştır. Çalışmada  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik çarpma açılarında oluşan yüzey topografyası ve pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Optik profilometre sonuçları ve nedenleri Bölüm 6'da irdelenecektir. Şekil 5.4'te deneysel çalışmalarda kullanılan optik profilometrenin fotoğrafı verilmiştir.

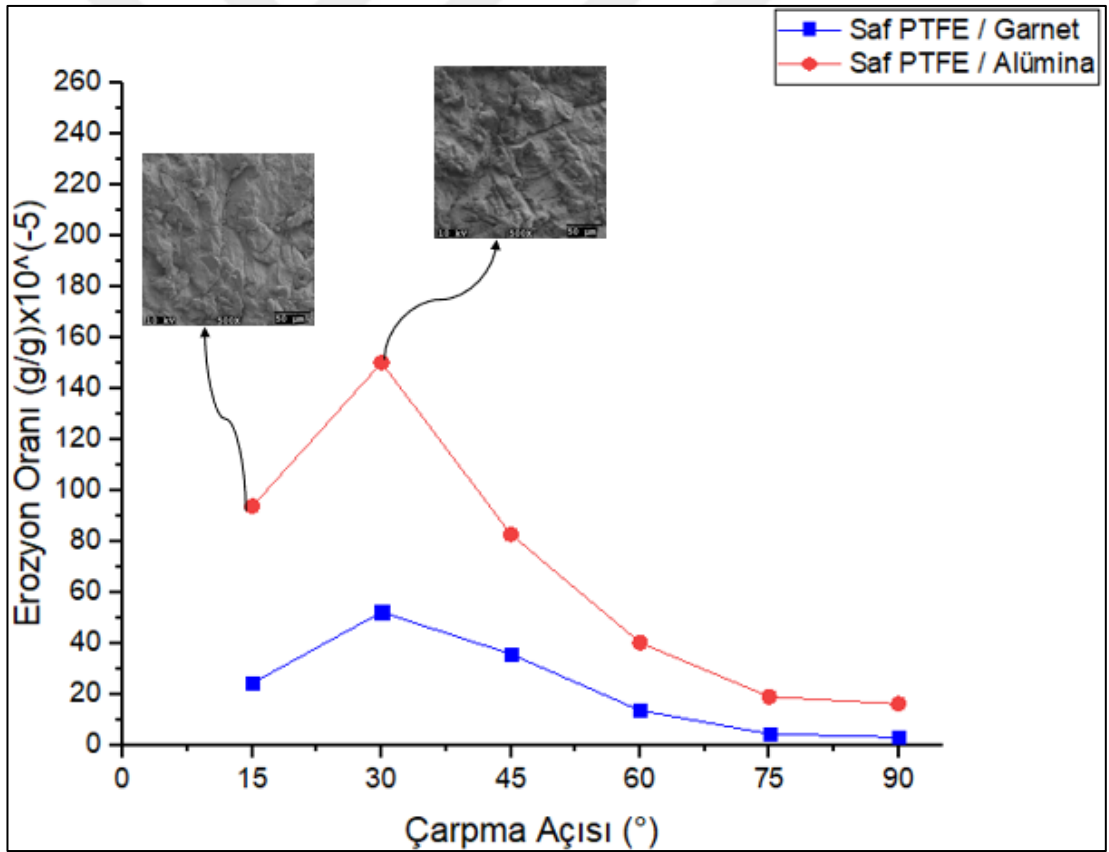


Şekil 5.4. Optik profilometre

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 6.1. Katı Partikül Erozyonu Test Sonuçları

Deneysel çalışmalar öncesinde alümina aşındırıcı partikülün garnet aşındırıcı partikülden daha yüksek erozyon oranlarına sebep olacağı ve maksimum erozyon oranı değerlerinin 30° püskürtme açısında görüleceği varsayılmıştır. Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 yorumlanarak bu varsayımın doğru olduğu sonucuna varılabilir. Şekil 6.1, saf PTFE malzemenin erozyon oranının çarpma açısına göre değişimini göstermektedir.

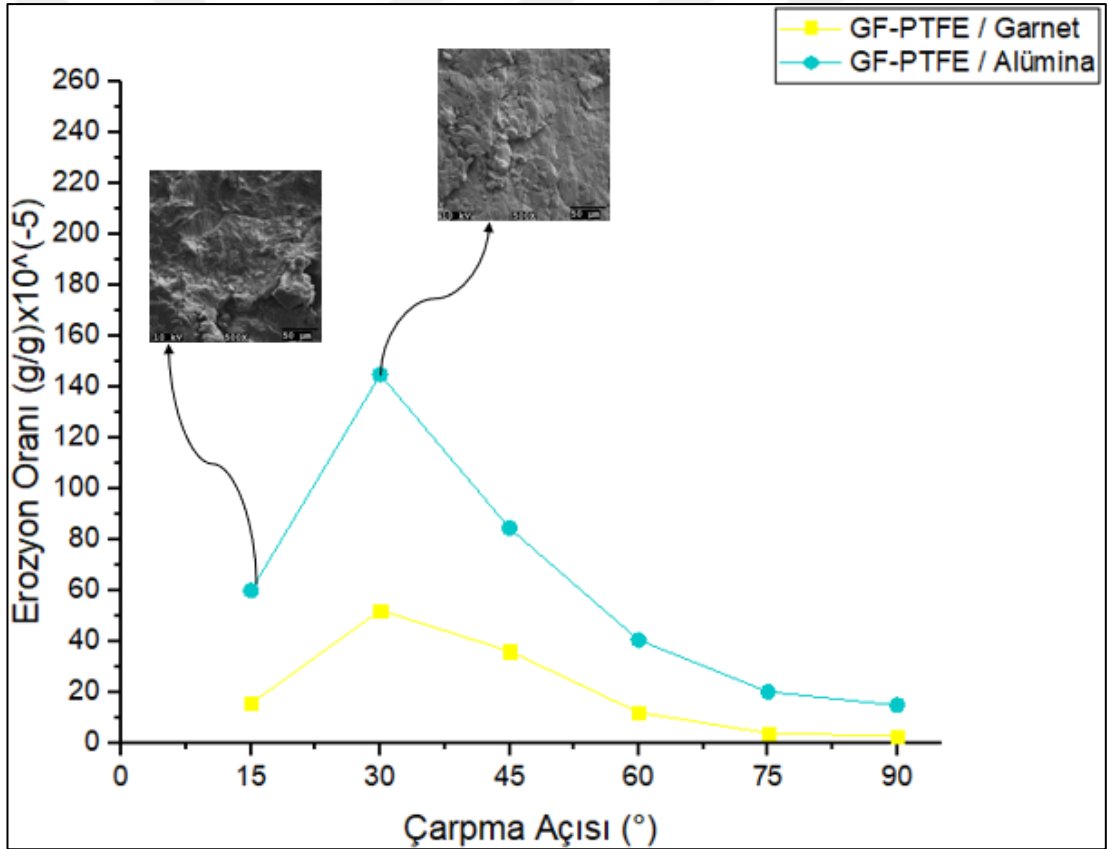


Şekil 6.1. Saf PTFE malzeme yüzeyine garnet ve alümina aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı püskürtülmesi durumunda erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi

Saf PTFE malzemenin alümina ile aşındırılması durumunda tüm çarpma açılarında oluşan erozyon oranı değerlerinin garnet ile aşındırılması ile oluşandan daha yüksek olduğu görülebilir. Ayrıca en yüksek erozyon oranı değerlerinin her iki aşındırıcı

partikül kullanımında da 30° düşük çarpma açısında olduğu görülür. Alümina aşındırıcı partikülün ve 30° çarpma açısının saf PTFE malzemeyi garnete göre yaklaşık 3 kat daha fazla aşındırdığı ve daha fazla hasara sebep olduğu söylenebilir.

Saf PTFE malzeme için en küçük ve en büyük çarpma açısının sebep olduğu erozyon oranı değerleri karşılaştırılırsa 15° çarpma açısında garnet aşındırıcı partikül püskürtülmesi ile 90° çarpma açısında püskürtülmesine göre malzeme yaklaşık 8 kat fazla aşınmıştır. Alümina aşındırıcı partikül kullanımında ise 15° çarpma açısı ile püskürtmeyle 90° çarpma açısıyla püskürtmeye göre yaklaşık 6 kat yüksek erozyon oranı değeri elde edilmiştir. Şekil 6.2, cam fiber takviyeli PTFE malzemenin erozyon oranının çarpma açısına göre değişimini göstermektedir.



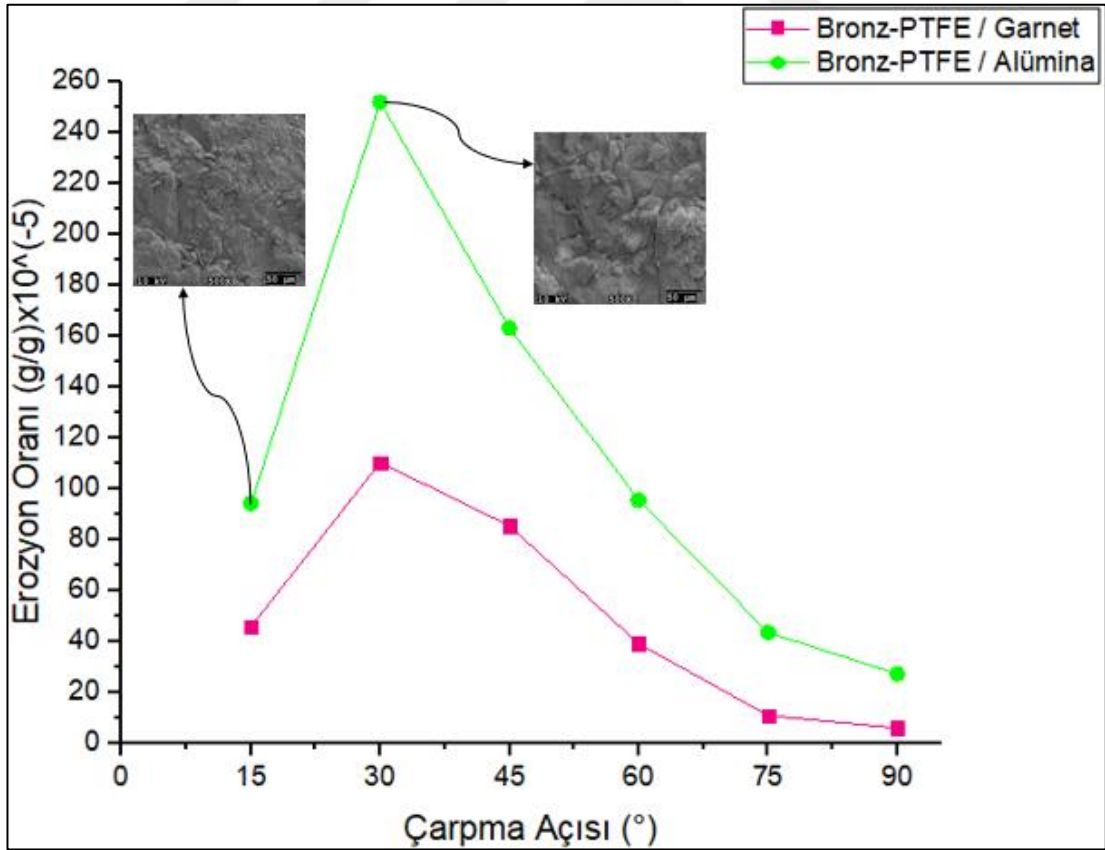
Şekil 6.2. Cam fiber takviyeli PTFE malzeme yüzeyine garnet ve alümina aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı püskürtülmesi durumunda erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi

Alümina aşındırıcı partikülün cam fiber takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda Saf PTFE malzemedeki gibi garnet püskürtülmesi durumuna göre daha yüksek erozyon oranı değerlerine sebep olduğu söylenebilir. Her

iki aşındırıcı partikül için de en yüksek erozyon  $30^\circ$  çarpma açısında meydana gelmiştir. Dolayısıyla saf PTFE malzemede olduğu gibi cam fiber takviyeli PTFE malzemenin de alümina aşındırıcı partikülle ve  $30^\circ$  çarpma açısıyla maksimum aşındığı söylenebilir. Alümina  $30^\circ$  çarpma açısında garnete göre yaklaşık 3 kat fazla aşınmaya sebep olmuştur.

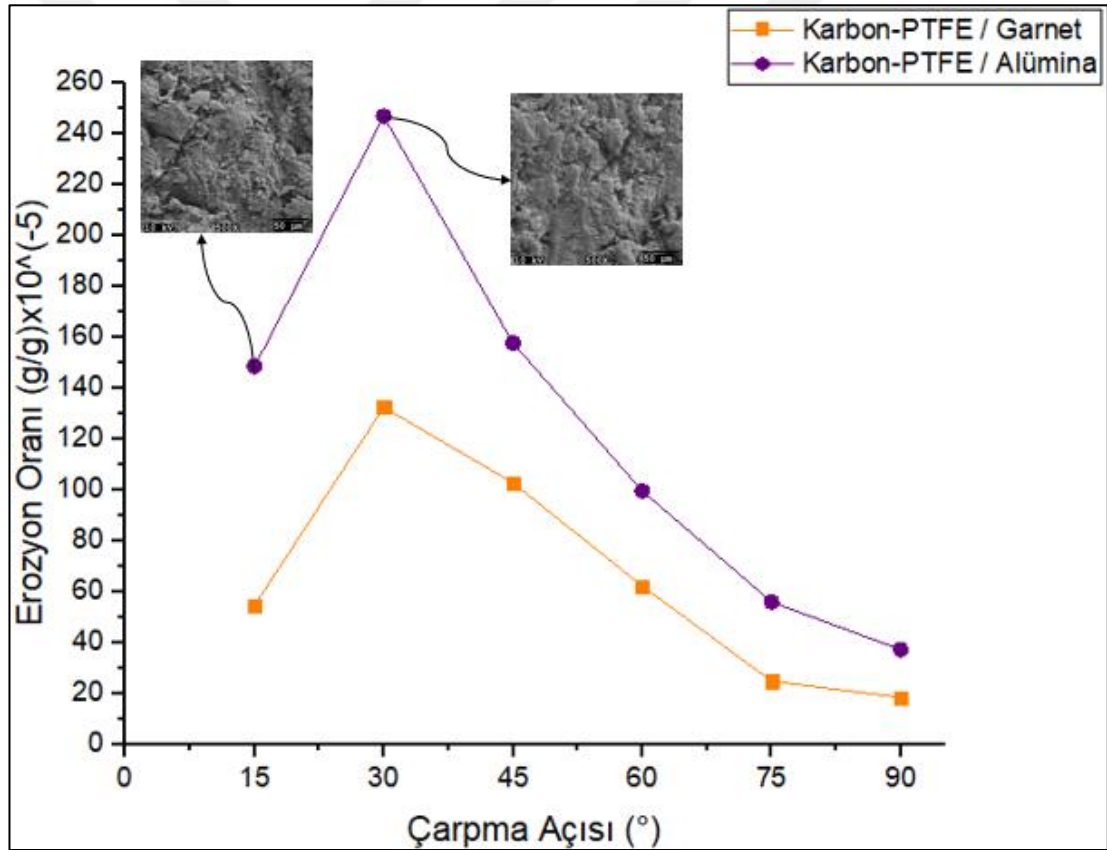
Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin en küçük ve en büyük çarpma açısıyla aşındırılması durumları karşılaştırılırsa garnet aşındırıcı partikül ile aşındırma durumunda  $15^\circ$  çarpma açısı  $90^\circ$  çarpma açısına göre yaklaşık 6 kat fazla aşınmaya sebep olur. Alümina aşındırıcı partikül püskürtülmesi durumunda ise  $15^\circ$  çarpma açısının sebep olduğu erozyon oranı  $90^\circ$  çarpma açısının sebep olduğundan yaklaşık 4 kat fazladır.

Şekil 6.3, bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin erozyon oranının çarpma açısına göre değişimini göstermektedir.



Şekil 6.3. Bronz partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine garnet ve alümina aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı püskürtülmesi durumunda erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi

Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin alümina aşındırıcı partikülle garnet kullanımına göre daha fazla aşındığı görülebilir. Bu malzeme için de yüksek erozyon oranları düşük çarpma açılarında meydana gelmiştir ve maksimum aşınma 30° çarpma açısında oluşmuştur. Alümina 30° çarpma açısında malzemeyi garnete göre yaklaşık 2,5 kat fazla aşındırmıştır. Bronz partikül takviyeli PTFE malzeme için en küçük ve en büyük çarpma açısı karşılaştırılırsa garnet aşındırıcı partikül püskürtülmesi durumunda 15° çarpma açısının sebep olduğu erozyon oranı değeri, 90° çarpma açısının sebep olduğundan yaklaşık 8 kat yüksektir. Alümina aşındırıcı partikül püskürtülmesi durumunda ise 15° çarpma açısı 90°den yaklaşık 4 kat fazla aşınmaya sebep olur. Şekil 6.4, karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin erozyon oranının çarpma açısına göre değişimini göstermektedir.

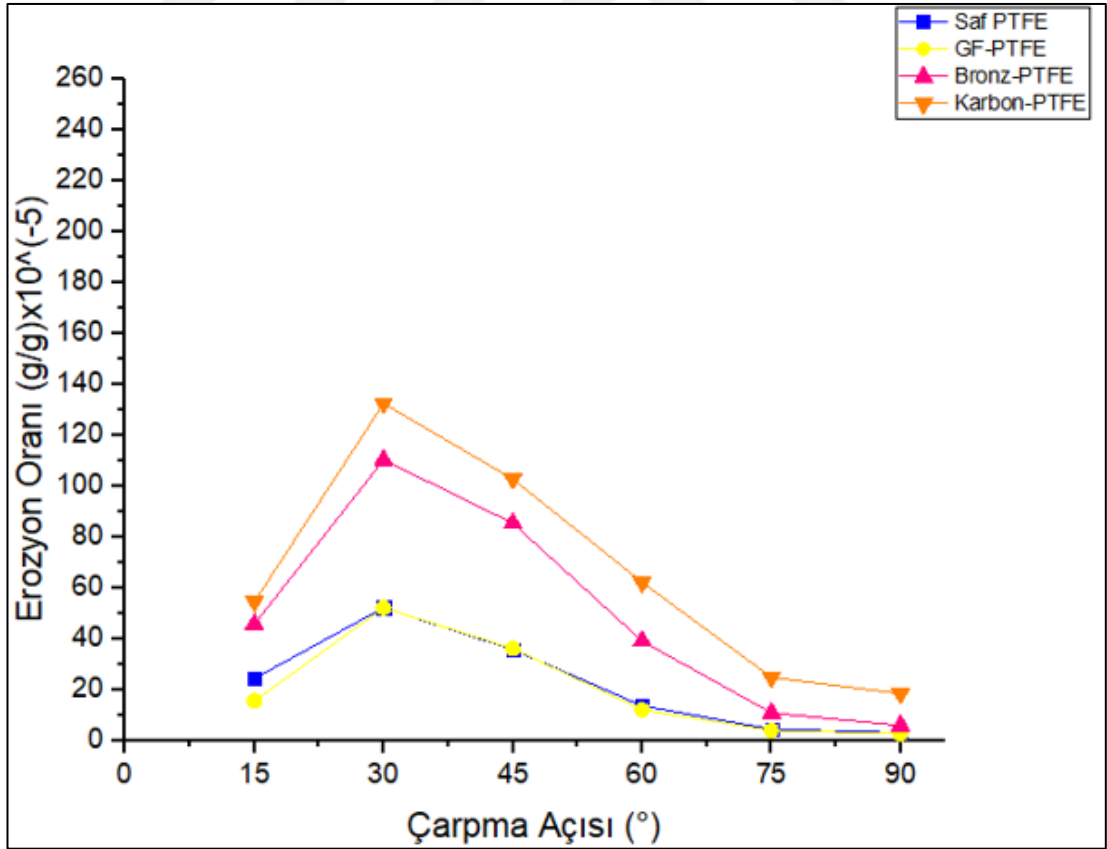


Şekil 6.4. Karbon partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine Garnet ve Alümina aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı püskürtülmesi durumunda erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi

Alümina aşındırıcı partikülün aşındırma üzerindeki üstünlüğünün karbon partikül takviyeli PTFE malzeme için de geçerli olduğu görülebilir. Diğer malzemelerde olduğu gibi düşük çarpma açılarında yükselen erozyon oranı en fazla 30° çarpma

açısında oluşmuştur. Dolayısıyla karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin de alümina aşındırıcı partikülün 30° çarpma açısıyla yüzeye püskürtülmesi durumunda en fazla aşındığı söylenebilir. Alümina 30° çarpma açısında garnete göre yaklaşık 2 kat fazla aşınmaya sebep olur. Karbon partikül takviyeli PTFE malzeme için en küçük ve en büyük çarpma açısı karşılaştırılırsa garnet aşındırıcı partikül püskürtülmesi durumunda 15° çarpma açısının 90° çarpma açısından yaklaşık 3 kat fazla aşınmaya sebep olduğu söylenebilir. Alümina aşındırıcı partikül püskürtülmesi durumunda ise 15° çarpma açısı yaklaşık 4 kat fazla aşınmaya sebep olur.

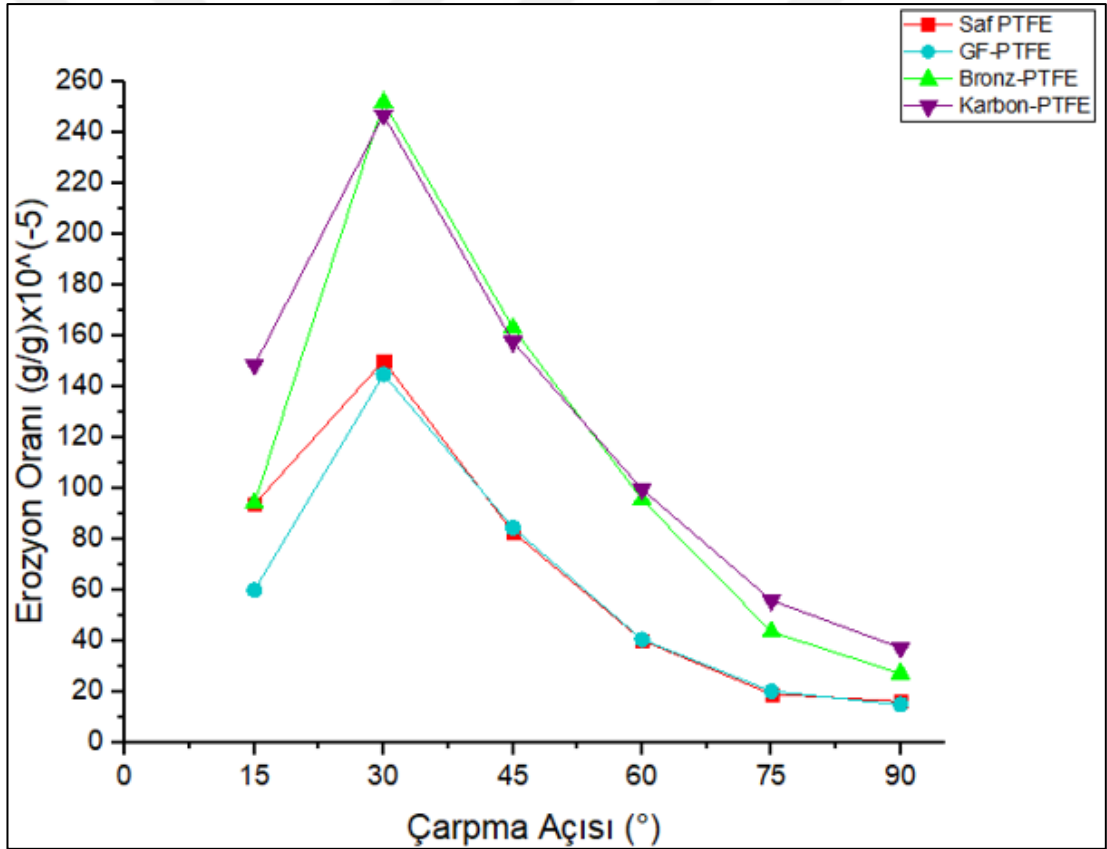
Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelere garnet ve alümina partikülün ayrı ayrı püskürtülmesi durumunda bunların malzemelerin erozif aşınması üzerine etkisiyle birlikte malzemelerin göstermiş olduğu erozyon oranlarının karşılaştırması da incelenmiştir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 sırasıyla garnet ve alümina aşındırıcı partikülün hedef yüzeye püskürtülmesi durumunda her bir malzeme için hesaplanan erozyon oranı değerlerinin karşılaştırmasını vermektedir.



Şekil 6.5. Garnet aşındırıcı püskürtülmesi durumunda malzemelerde çarpma açısına bağlı olarak değişen erozyon oranı değerleri

Garnet aşındırıcı partikülün malzeme yüzeylerine püskürtülmesi durumunda maksimum erozyon oranının bronz partikül takviyeli PTFE malzemeye çok yakın olmakla birlikte karbon partikül takviyeli PTFE malzemede görüldüğü söylenebilir. Maksimum aşınmanın oluştuğu 30° çarpma açısında karbon partikül takviyeli PTFE malzeme, bronz partikül takviyeli PTFE malzemeden yaklaşık %20 daha fazla aşınmıştır.

Garnet aşındırıcı partikülün 30° çarpma açısıyla püskürtülmesi durumunda en az aşınma oranı saf PTFE malzemede görülen değerle neredeyse aynı olmak üzere cam fiber takviyeli PTFE malzemede görülmüştür. Cam fiber takviyeli PTFE malzeme saf PTFE'den yaklaşık %0,08 daha az aşınmıştır.



Şekil 6.6. Alümina aşındırıcı püskürtülmesi durumunda malzemelerde çarpma açısına bağlı olarak değişen erozyon oranı değerleri

Malzeme yüzeylerine alümina aşındırıcı partikülün püskürtülmesi durumunda maksimum erozyon oranının karbon partikül takviyeli PTFE malzeme ile neredeyse aynı değerde olmak üzere bronz partikül takviyeli PTFE malzemede görüldüğü



söylenbilir. Bronz partikül takviyeli PTFE malzeme karbon partikül takviyeli PTFE malzemededen yaklaşık %2 daha fazla aşınmıştır.

Alümina aşındırıcı partikülün 30° çarpma açısıyla yüzeylere püskürtülmesi durumunda garnet aşındırıcı partikülün püskürtülmesinde olduğu gibi en az erozyon oranı değeri cam fiber takviyeli PTFE malzemede elde edilmiştir. Cam fiber takviyeli PTFE malzeme saf PTFE malzemededen yaklaşık %3,5 daha az aşınmıştır.

Şekil 6.1'den Şekil 6.6'ya kadar olan tüm grafiklerdeki sonuçlara göre, aşındırıcı partikül türünün erozyon oranı üzerine etkisi incelendiğinde alümina aşındırıcı partikülün püskürtülmesiyle PTFE malzeme ve takviye edilmiş kompozitlerinden oluşan her hedef malzemede meydana gelen erozyonun garnet aşındırıcı partikül püskürtülmesiyle meydana gelen erozyondan daha fazla olduğu görülür. Her iki aşındırıcı partikül tipi ve her hedef malzeme için maksimum erozyon oranı değerleri 30° çarpma açısında elde edilmiştir. Aynı şekilde minimum erozyon oranı ise 90° çarpma açısıyla partikül püskürtme işleminde elde edilmiştir. Bu durum Teflon (PTFE) malzemenin sünek karakteri ile açıklanabilir. Bunun nedeni sert bir malzeme olan garnet ve alümina aşındırıcı partiküllerin düşük çarpma açılarında yüzeyde abrazyon aşınma ağırlıklı deformasyonları oluşturmasıdır. Böylece tüm deneylerde maksimum aşınmanın düşük çarpma açılarında meydana geldiği ve çarpma açısının artırılmasıyla birlikte aşınma miktarının düştüğü görülmektedir. Aşındırıcı partiküllerin yatay hız bileşenlerinin, çarpma açısının büyümesi ile küçüldüğü ve buna bağlı olarak bu durumun ortaya çıktığı söylenebilir. Çarpma açısı normale yakın arttıkça krater veya mekanik olarak karışık katman (MML) oluşumuyla sonuçlanan daha fazla kinetik enerji (aşındırıcı tarafından) hedef malzemeye aktarılır. 90° daha yüksek çarpma açılarında kesme daha az mümkündür ve aşındırıcı veya matris parçacıkları hedef malzemeye gömülme eğilimindedir ve bu durum aşınmaya karşı ek koruma sağladığına inanılan mekanik olarak karışık bir tabaka oluşturur [4].

Erozyon oranı esas olarak aşınan partiküllerin hızına ve hedef yüzey ile partikül yörüngesi arasındaki açıya (çarpma açısı) bağlıdır. Bunlarla birlikte partikül boyutu, partikül şekli, aşındırıcı ve hedef yüzey sertlik oranı gibi diğer parametrelere de bağlıdır. Erozyon hızının çarpma açısına bağımlılığı büyük ölçüde hedef malzemenin doğası tarafından belirlenir. Erozyon aşınma davranışı ve bunun sonucunda ortaya çıkan

aşınma oranları sünek ve gevrek malzemeler için farklılık gösterir. Sünek malzemeler (bu tür polimerler) genellikle 15-30°'lik daha düşük çarpma açılarında daha fazla aşınırken gevrek malzemeler için (seramik gibi) maksimum erozyon 90°'lik daha yüksek çarpma açılarında görülmektedir. 30°'lik daha düşük çarpma açılarında aşınan sünek malzemeler için ana aşınma mekanizmaları yırtılma, kesme, sürme ve malzeme ayrılmasıdır. Gevrek malzemelerde 90°'lik daha yüksek çarpma açılarında yüzeyden malzeme ayrılması çoğunlukla çatlak oluşumu veya gevrek kırılma nedeniyle görülür [35].

Birçok endüstriyel uygulamada tozlu ortamlarla karşılaşıldığında hedef yüzeyden kademeli olarak malzeme kaybı oluşur. Literatürden, çeşitli polimer matris kompozitlerinin erozyon aşınma oranının bir yandan takviyenin miktarına, türüne, yönüne ve özelliklerine ve matrisin türüne ve özelliklerine, diğer yandan fiberlere/dolgu maddelerine yapışmasına bağlı olduğu bilinmektedir. Katı partikül erozyonu kesme, darbe ve yorulma işlemlerini içerir. Hedef yüzeydeki aşındırıcının yerel enerji konsantrasyonu erozif aşınma için çok önemlidir. Çarpma sırasında ilk önce hem matristen hem de takviyeden oluşan üst tabaka kesme hareketi ile aşınır ve yeni tabaka açığa çıkar. Böylece malzeme hedef yüzeyden kademeli olarak çıkarılmış olur. Ayrıca kırılma, katkı maddesi ve matris arasındaki en zayıf ara yüzün kırılmasıyla başlar [19].

Karbon, cam, aramid elyaf gibi katkı maddeleriyle takviye edilmiş polimerler kullanılarak kompozitlerin geliştirilmesi geçmişten beri büyük önem taşımaktadır. Lifler, kıllar, partiküller veya katı yağlayıcılar (MoS<sub>2</sub> gibi) formundaki bu katkı maddelerinin genellikle tribolojik davranışı iyileştirdiği ve aynı zamanda polimerik kompozitlerin nihai maliyetini düşürdüğü düşünülmektedir [4]. Dolgu maddeleri genel olarak PTFE'nin büyük ölçekli parçalanmasını engellemede etkilidir böylece aşınma oranını düşürmek amacıyla kullanılabilir. Literatür araştırması, kısa fiber takviyesinin genel olarak matrisin aşınma direncinde bozulmaya yol açtığını göstermiştir. Örgü tipi kompozitin ise aşınma direncini geliştirdiği görülmüştür. Matrisin ve fiberlerin aşınma davranışına katkısı dolgu türüne göre değişir [18].

Bu çalışmada rastgele dağılımlı kısa cam fiberin saf PTFE malzemenin aşınma direncini artırdığı görülmüştür. Deneysel çalışmalarda numune yüzeyine garnet

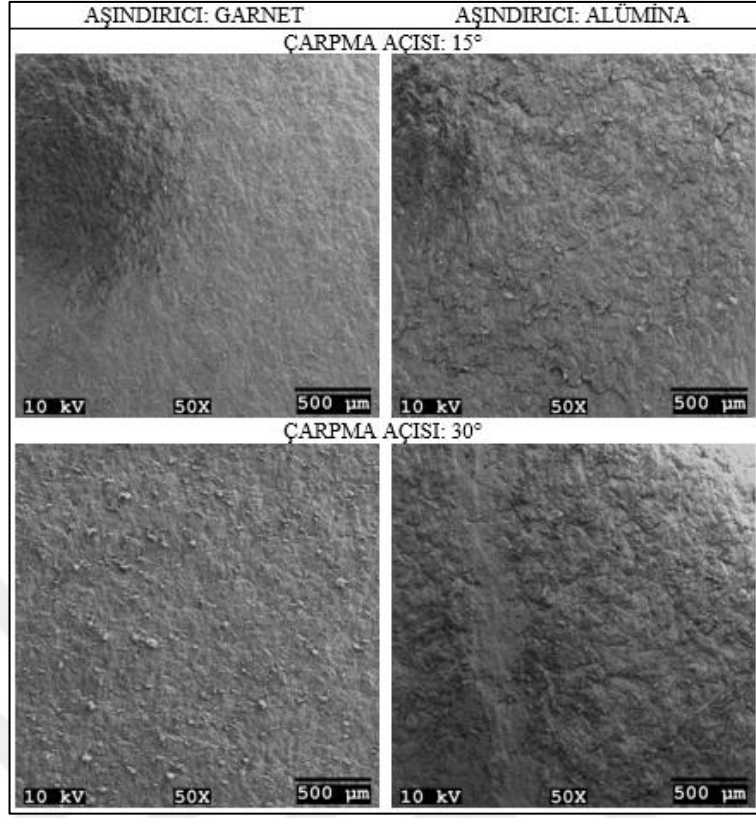
aşındırıcı partiküllerin püskürtülmesi halinde en fazla erozyon oranı karbon partikül takviyeli PTFE malzemede elde edilmiştir. En az erozyon oranı ise cam fiber takviyeli PTFE malzemede elde edilmiştir. Numune yüzeyine alümina aşındırıcı partiküllerin püskürtülmesi halinde en fazla erozyon oranı bronz partikül takviyeli PTFE malzemede elde edilmiştir. En az erozyon oranı ise cam fiber takviyeli PTFE malzemede elde edilmiştir.

Sonuç olarak PTFE matris için karbon ve bronz partiküllerin aşınma direncini geliştirmediği ve hatta tek başına matrise kıyasla aşınmayı artırma eğiliminde olduğu söylenebilir. Bununla birlikte cam fiber takviyesi ile aşınma direncinde artış elde edildiği not edilebilir. Göstermiş olduğu olağanüstü mekanik mukavemet ve aşınma direnci ile cam fiber, PTFE matrisini şiddetli aşınmaya karşı korur. Aynı durum partikül takviyeleri için söylenemez. Partiküllerin saf PTFE malzemenin penetrasyon direncini artırdığı ve aşındırıcı partikülün malzemede takviye olarak bulunan bronz ve karbon partiküle çarpması durumunda gömülmenin aksine bu takviye partiküllerin beraberinde matrisi de alıp götürdüğü söylenebilir. Saf PTFE malzemenin enerji yutma ve plastik deformasyona uğrama kapasitesi daha yüksektir.

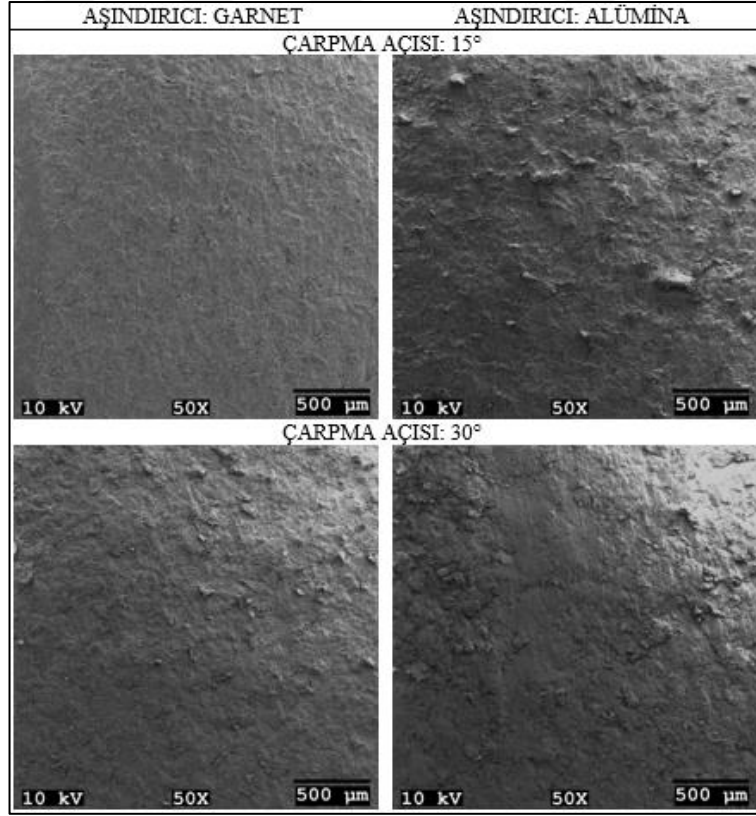
## **6.2. SEM Çalışmaları**

Tez çalışmasında, katı partikül erozyonu testlerinde PTFE malzeme ve %25 oranında cam fiber, %35 oranında karbon partikül, %60 oranında bronz partikül ile takviyeli kompozitleri garnet ve alümina aşındırıcı partiküller kullanılarak 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarındaki aşındırılmıştır. Sonuçlar tüm çarpma açılarındaki ve partikül tipinde, en yüksek aşınmanın düşük çarpma açılarındaki (15° ve 30°), en düşük aşınmanın ise yüksek çarpma açılarındaki (75° ve 90°) görüldüğünü göstermiştir. Bu doğrultuda katı partikül erozyonuyla aşındırılmış malzemede meydana gelen aşınma mekanizmalarının belirlenmesi ve aşınan yüzeylerin yüzey morfolojilerinin değişiminin incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.7 saf PTFE malzemenin, Şekil 6.8 cam fiber takviyeli PTFE malzemenin, Şekil 6.9 karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin ve Şekil 6.10 bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin 50x büyütme ile SEM görüntülerini vermektedir.



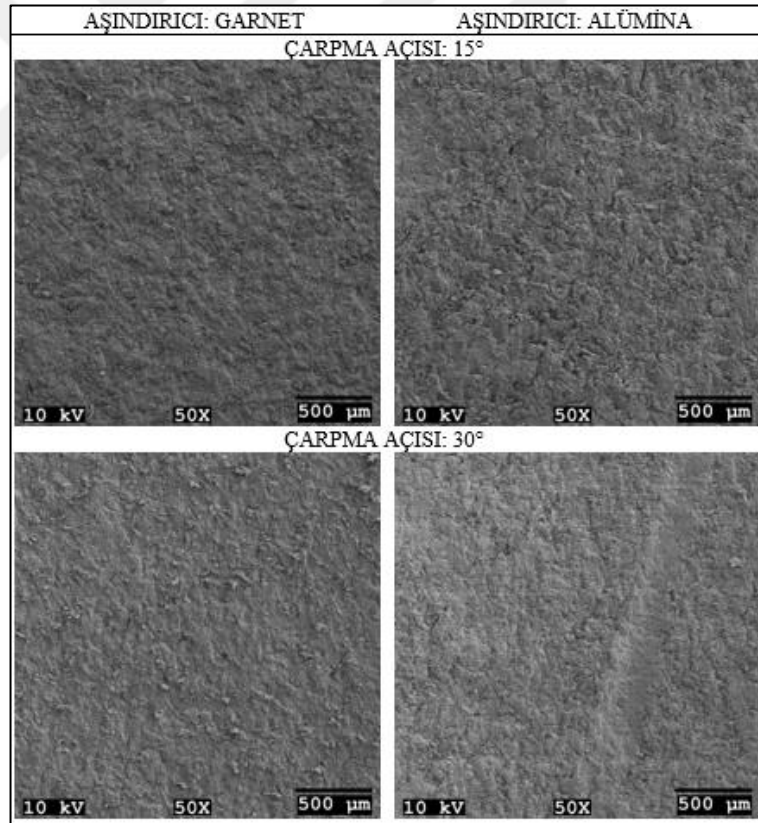
Şekil 6.7. Saf PTFE malzemenin SEM görüntüleri



Şekil 6.8. Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri

15° ve 30° çarpma açısında garnet ve alümina aşındırıcı partiküllerin ayrı ayrı püskürtülmesi sonucu saf PTFE malzemede oluşan hasarın SEM görüntüsüne göre 15° çarpma açısının 30° çarpma açısına göre ve garnet aşındırıcı partikülün alümina aşındırıcı partiküle göre daha yüzeysel bir hasara sebep olduğu görülmektedir. Özellikle alümina aşındırıcı partikülün 30° çarpma açısıyla yüzeye püskürtülmesi durumunda yüzeyi kazıyarak hasar meydana getirdiği görülmektedir.

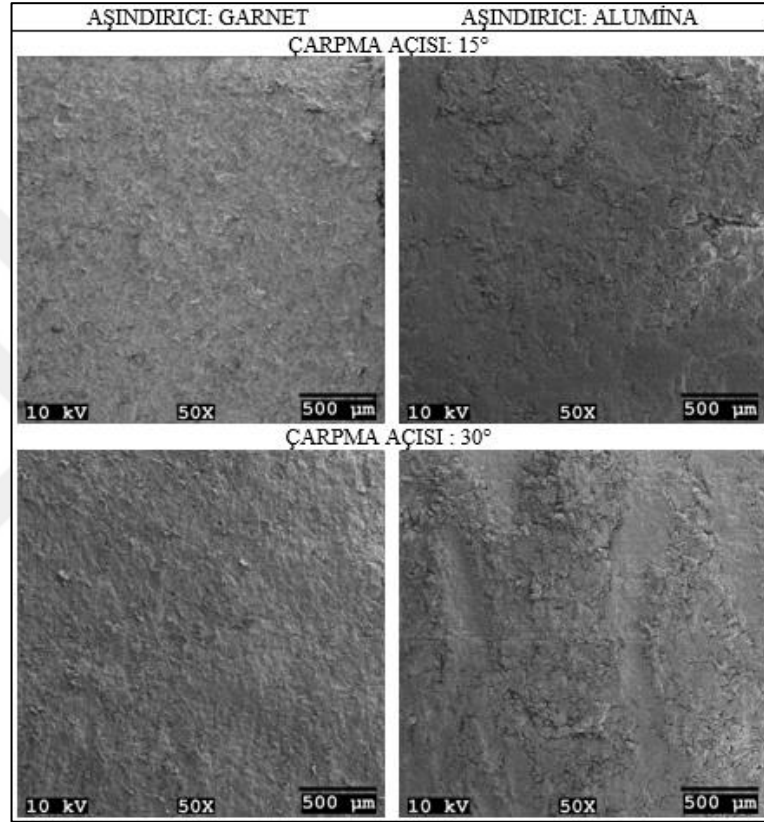
Garnet aşındırıcı partikülün 15° çarpma açısıyla cam fiber takviyeli PTFE malzemenin yüzeyine püskürtülmesi durumunda elde edilen SEM görüntüsüne göre diğer parametrelerden daha pürüzsüz bir yüzeyden bahsedilebilir, oluşan hasar yüzeyseldir. Alümina partikülün 30° çarpma açısında malzeme yüzeyine püskürtülmesiyle oluşan kazıma etkisindeki belirginlik saf PTFE malzemenin SEM görüntülerinde olduğu gibi burada da görülmektedir.



Şekil 6.9. Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri

Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin 15° ve 30° çarpma açısında garnet ve alümina aşındırıcı partikülün ayrı ayrı püskürtülerek aşındırılması durumunda elde

edilen SEM görüntülerine göre bu malzemede oluşan hasarın diğer malzemelerde olduğu kadar yüzeysel olmadığı görülmektedir. Buna aşındırıcı partiküllerin takviye edici partikülleri delamine ederek malzemeden matrisi de beraberinde alıp götürmesinin sebep olduğu düşünülmektedir. Bütün aşındırıcı partikül tipi ve çarpma açısı parametrelerinde oluşan yoğun hasarın yanında alümina aşındırıcı partikülün 30° çarpma açısıyla püskürtülmesiyle yarattığı kazıma etkisi yine görülebilmektedir.



Şekil 6.10. Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri

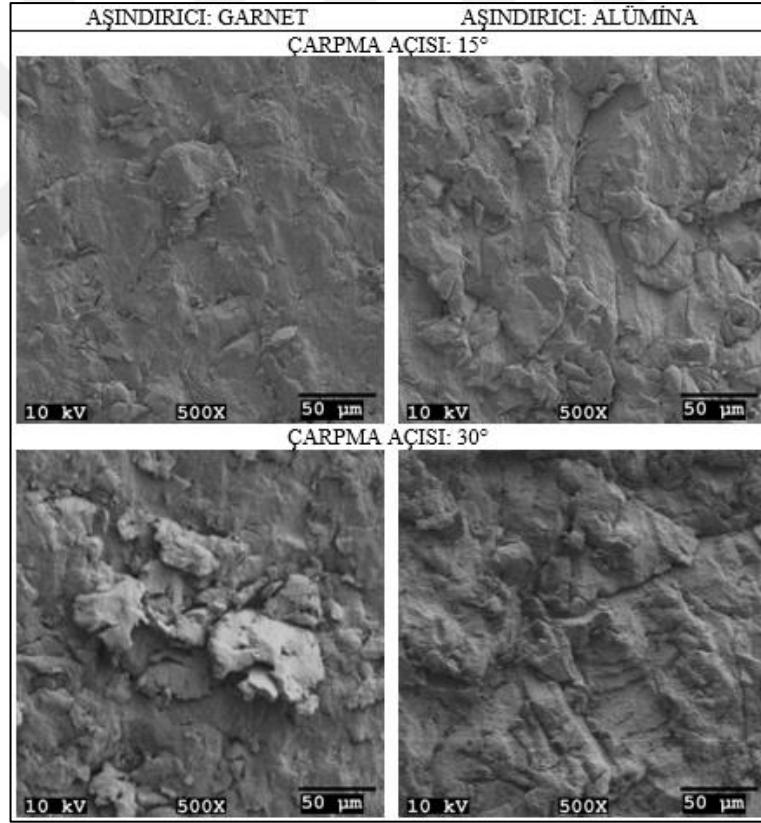
30° çarpma açısında alümina aşındırıcı partikül püskürtülmesiyle oluşan kazıma etkisinin diğer malzemelere kıyasla en fazla bronz partikül takviyeli PTFE malzemede etkin olduğu görülmektedir.

Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'daki SEM görüntülerine göre 15° ve 30° çarpma açılarında malzemelerin mikro sürme ve mikro kesme aşınma mekanizmaları ile aşındığı görülmektedir. Ayrıca garnet ve alümina partiküllerin malzeme yüzeyini sürdükleri görülmekte ve sonrasında bu partiküllerin yüzeye saplandıkları ve numune

yüzeyine ve birbirlerine çarparak kırılıp küçük parçacıklara ayrıldıkları düşünülmektedir.

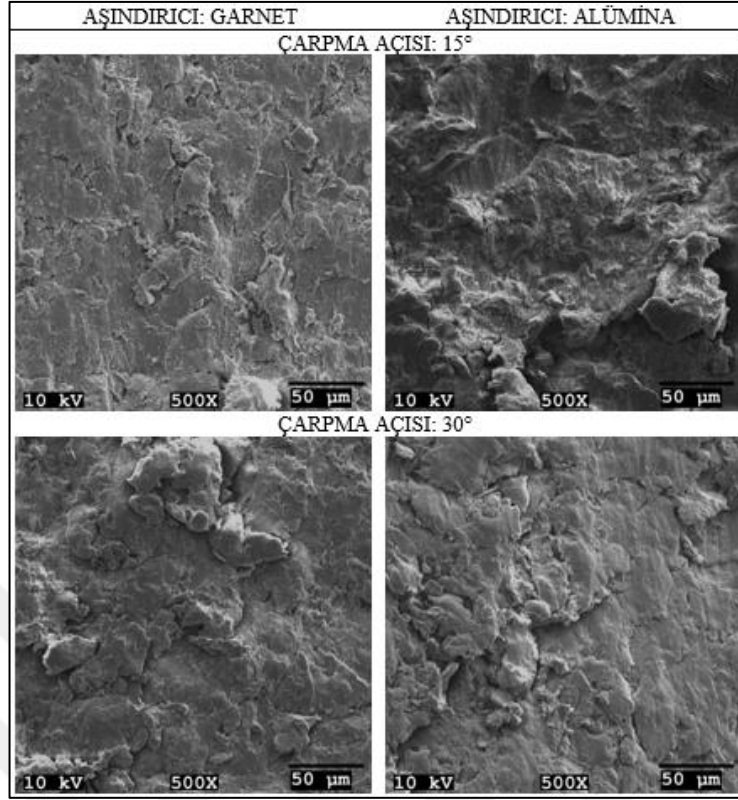
Malzemenin 15° çarpma açısında aşındırılmasıyla daha yüzeysel aşındığı, 30° çarpma açısıyla aşındırılmasında ise belirgin aşınma izlerinin olduğu ve abrazif aşınma ağırlıklı deformasyonların belirgin şekilde olduğu görülmektedir. Özellikle alümina aşındırıcı partikülün 30° çarpma açısında partikül püskürtme doğrultusunda oluşturduğu aşınma izi 50x büyütmede dikkat çekmektedir.

Şekil 6.11 saf PTFE malzemenin, Şekil 6.12 cam fiber takviyeli PTFE malzemenin, Şekil 6.13 karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin ve Şekil 6.14 bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin 500x büyütme ile SEM görüntülerini vermektedir.

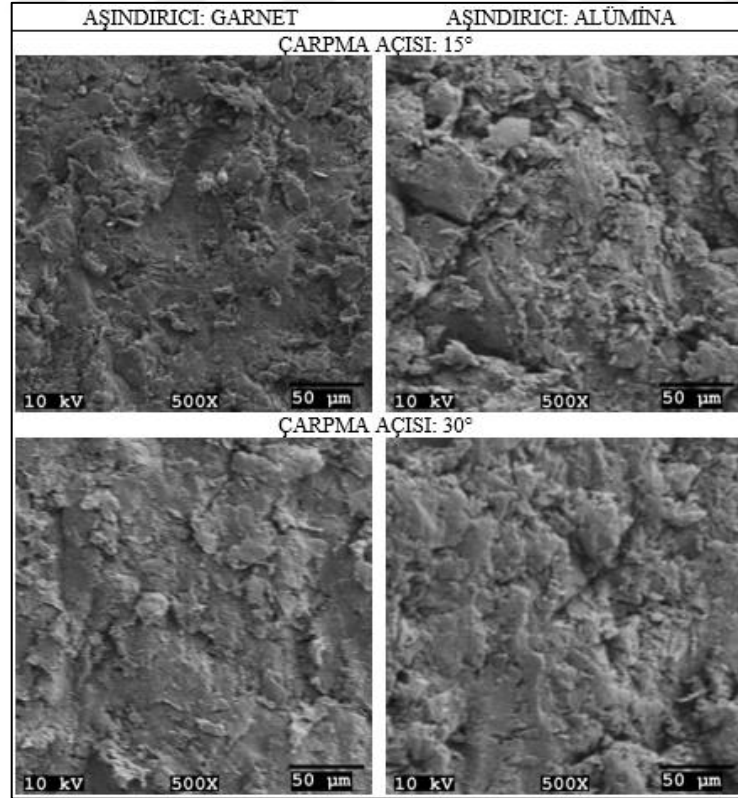


Şekil 6.11. Saf PTFE malzemenin SEM görüntüleri

Saf PTFE malzeme için alümina aşındırıcı partiküllerin keskin köşeleriyle oluşturduğu yarık ve buralardaki aşınma izleri 15° ve 30° çarpma açılarının her ikisinde de görülmektedir. Garnet aşındırıcı partikülün 15° çarpma açısında püskürtülmesiyle yarattığı hasarın yüzeysel olduğu 500x büyütmeyle de görülebilmektedir.

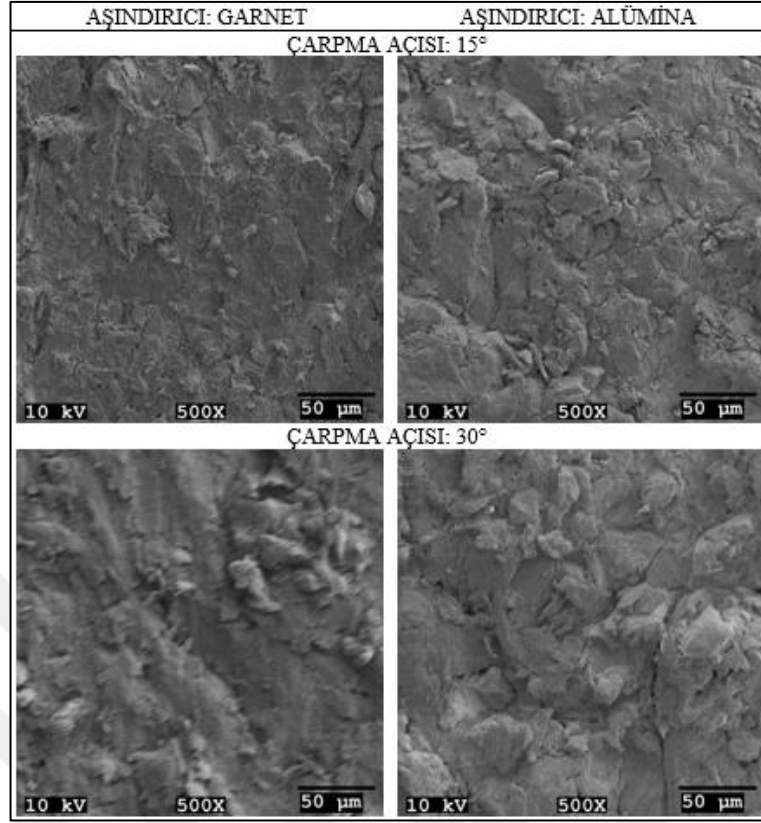


Şekil 6.12. Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri



Şekil 6.13. Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri





Şekil 6.14. Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin SEM görüntüleri

Cam fiber takviyeli PTFE malzeme saf PTFE malzemeye benzer olarak düşük oranlarda aşınma sergilemiştir. Özellikle 15° çarpma açısında garnet aşındırıcı partikül püskürtülmesi durumunda çok yüzeysel bir hasar olduğu görülmektedir. Aşındırıcı partiküllerin sebep olduğu yarıklar, alüminanın 30° çarpma açısıyla püskürtülmesinde belirgin şekilde görülmektedir.

Karbon partikül takviyeli malzeme için her iki çarpma açısı ve her iki aşındırıcı tipi ile aşındırmada da büyük hasarlar oluştuğu görülebilmektedir. Bu malzemenin alümina aşındırıcı partikül ile hem 15° hem de 30° çarpma açısında aşındırılması durumunda elde edilen SEM görüntülerinde keskin köşelerin sağladığı yarıklar ve buradaki aşınma izleri görülmektedir.

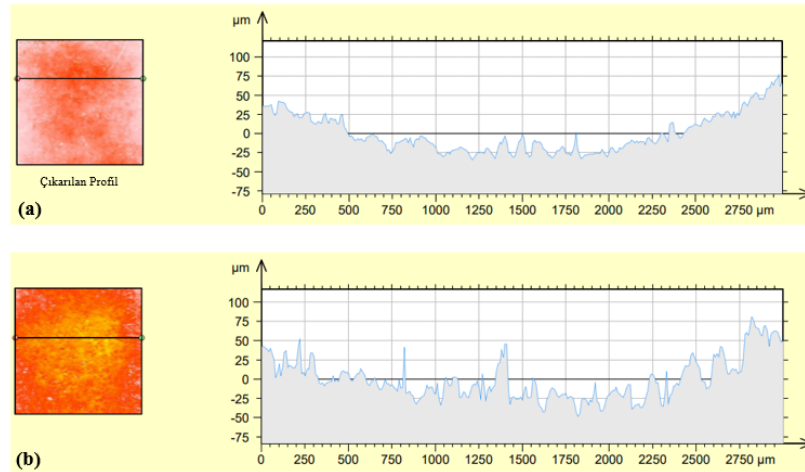
Bronz partikül takviyeli PTFE malzeme için de karbon partikül takviyeli PTFE malzemede olduğu gibi her iki çarpma açısı ve her iki aşındırıcı tipi ile aşındırmada da yüksek oranda aşınma gerçekleştiği söylenebilir. Keskin aşındırıcı partiküllerin sürme etkisine bağlı olarak matrisin ayrıldığına ve aşınma yönünde derin oluklar oluştuğuna

dair kanıtlar vardır [18]. Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'teki SEM görüntülerine göre aşınma izlerinin, malzemelerin garnet aşındırıcı partikül ile aşındırılması durumunda alümina ile olana göre daha yüzeysel olduğu ve alümina ile aşındırma durumunda malzeme yüzeyinde aşındırıcı partikülün meydana getirdiği daha derin yarık ve vadilerin meydana geldiği ve bu yarık ve vadiler içerisinde aşındırıcı partikülün keskin köşeleri ile oluşmuş aşınma izlerinin olduğu görülmektedir. Bu bulgu sayesinde malzemelerin, garnet ile aşındırılması durumunda alümina ile aşındırılmasına göre daha az aşındığı söylenebilir. Buna alümina aşındırıcı partiküllerin garnet aşındırıcı partiküllerden daha sert ve daha köşeli bir yapıya sahip oluşu sebebiyet verir.

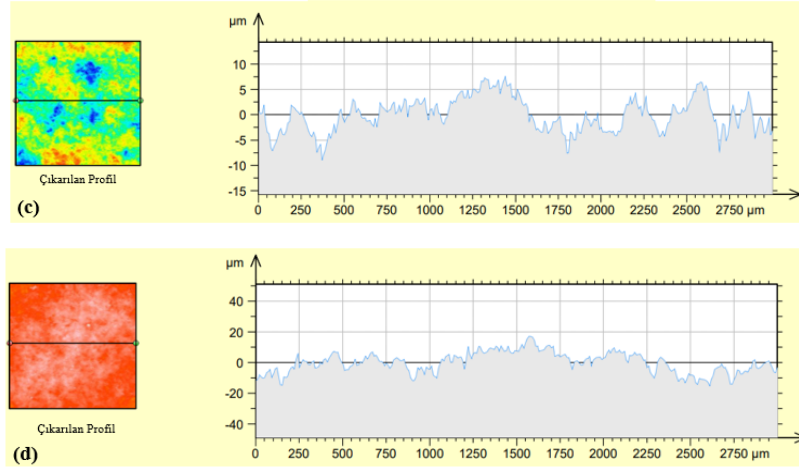
### 6.3. Yüzey Profilometresi Çalışmaları

Tez çalışmasında  $45^\circ$  ve  $90^\circ$  çarpma açılarında oluşan yüzey topografyası ve Ra ve Rt pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Ra, pürüzlülük değerlerinin ortalamasıyla bulunan bir pürüzlülük değeridir. Rt ise minimum vadi ve maksimum tepe arasındaki mesafeyi ifade eden pürüzlülük değeridir.

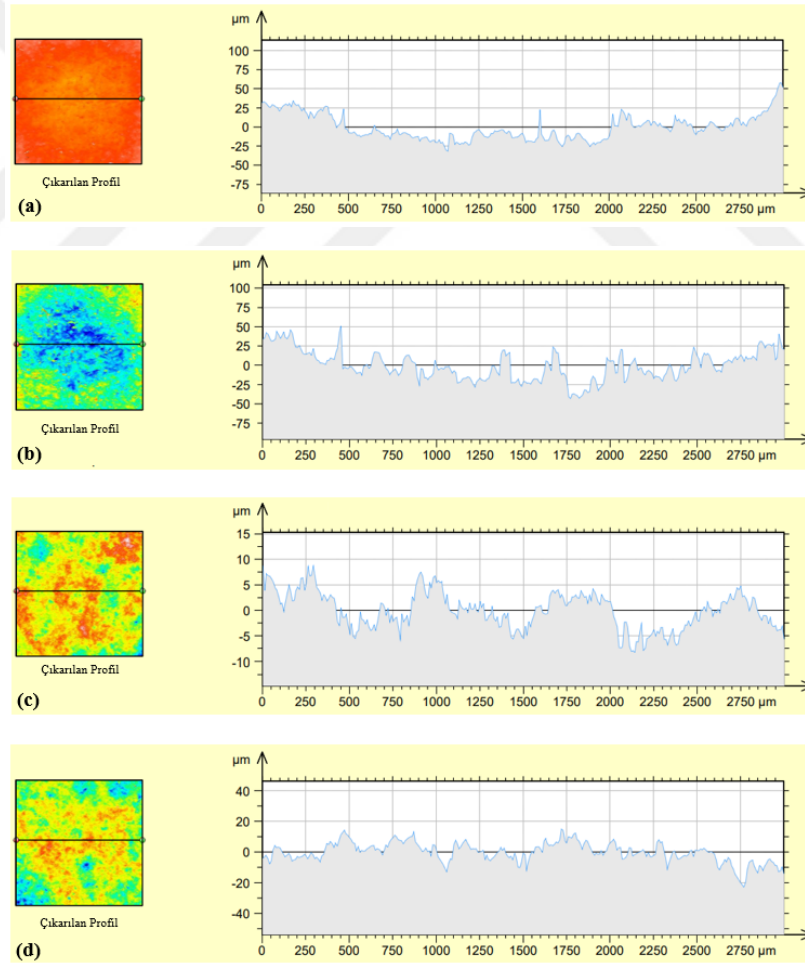
Saf PTFE ve cam fiber takviyeli PTFE malzemenin  $45^\circ$  ve  $90^\circ$  çarpma açılarında aşındırılması durumunda oluşan yüzey topografyası ve pürüzlülük değerleri sırasıyla Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.15. Saf PTFE malzemenin aşındırılması durumundaki yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet /  $45^\circ$ , (b) Alümina /  $45^\circ$ , (c) Garnet /  $90^\circ$ , (d) Alümina /  $90^\circ$

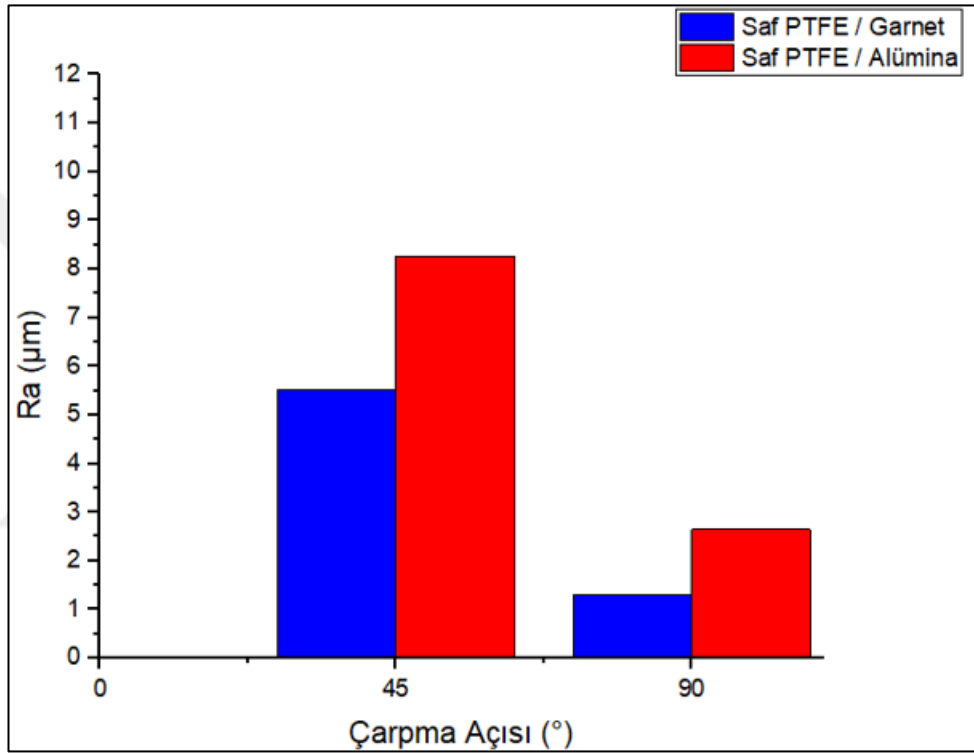


Şekil 6.15. (Devam) Saf PTFE malzemenin aşındırılması durumunda yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet / 45°, (b) Alümina / 45°, (c) Garnet / 90°, (d) Alümina / 90°



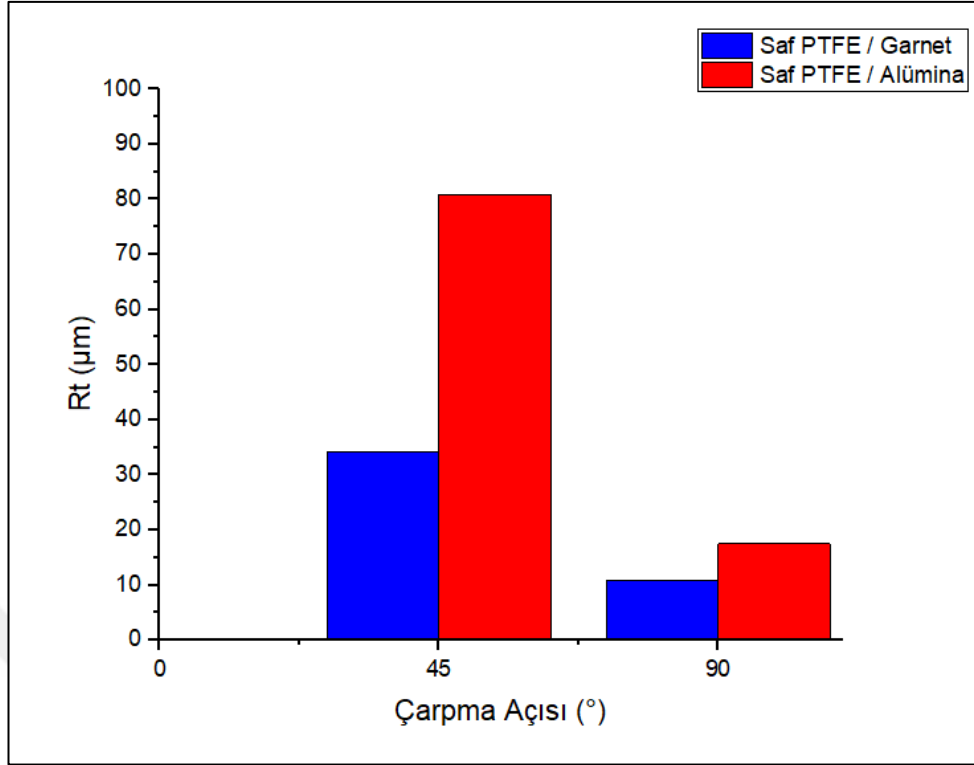
Şekil 6.16. Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin aşındırılması durumunda yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet / 45°, (b) Alümina / 45°, (c) Garnet / 90°, (d) Alümina / 90°

Ra, pürüzlülük değerlerinin ortalamasıyla bulunan bir değerdir. Saf PTFE malzemenin garnet ve alümina aşındırıcı partikül kullanımı ile 45° ve 90° çarpma açılarında aşındırılmasıyla elde edilen Ra değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 6.17'de verilmiştir. Rt, minimum vadi ve maksimum tepe arasındaki mesafedir. Saf PTFE malzemenin garnet ve alümina aşındırıcı partikül kullanımı ile 45° ve 90° çarpma açılarında aşındırılmasıyla elde edilen Rt değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 6.18'de verilmiştir.



Şekil 6.17. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla saf PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri

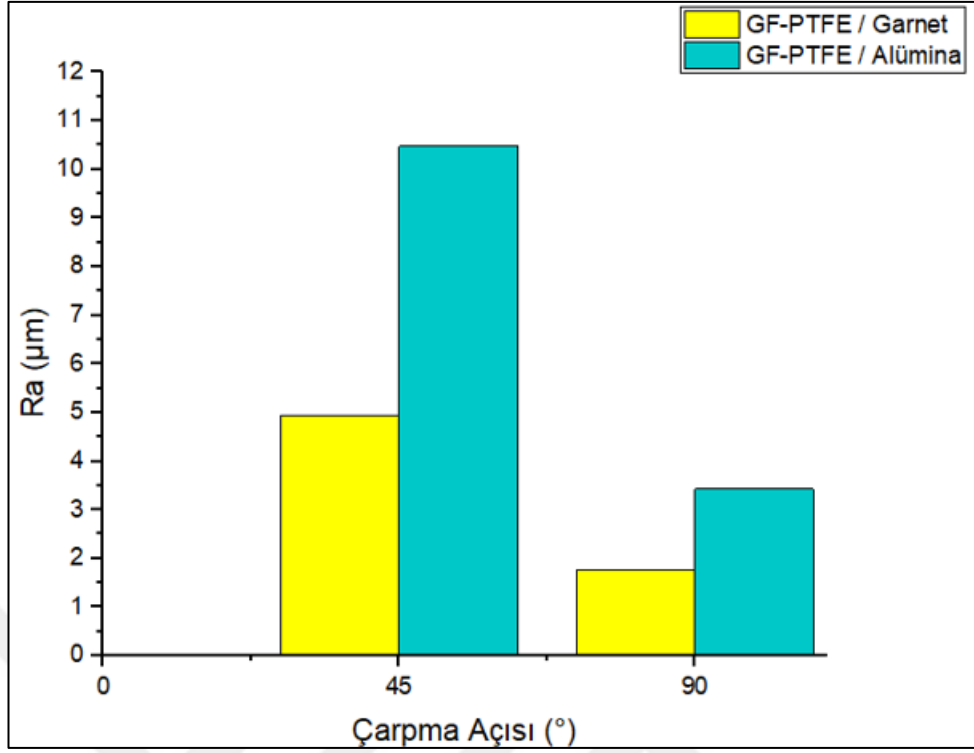
Saf PTFE malzemenin 45° çarpma açısında alümina aşındırıcı partikül kullanımı ile aşındırılmasıyla garnet ile aşındırılması durumuna göre yaklaşık %50 daha fazla ortalama pürüzlülük değeri elde edilmiştir. 90° çarpma açısında ise alümina aşındırıcı partikül kullanımıyla garnet kullanımına göre yaklaşık %104 daha fazla ortalama pürüzlülük değeri elde edilmiştir. 90° çarpma açısında elde edilen pürüzlülük değerlerinin her iki aşındırıcı partikül kullanımı için de 45° çarpma açısında aşındırma ile elde edilen pürüzlülük değerlerinden daha küçük olduğu ancak garnet aşındırıcı partiküle kıyasla alümina partikül kullanımının 90° çarpma açısında daha etkili sonuç verdiği söylenebilir.



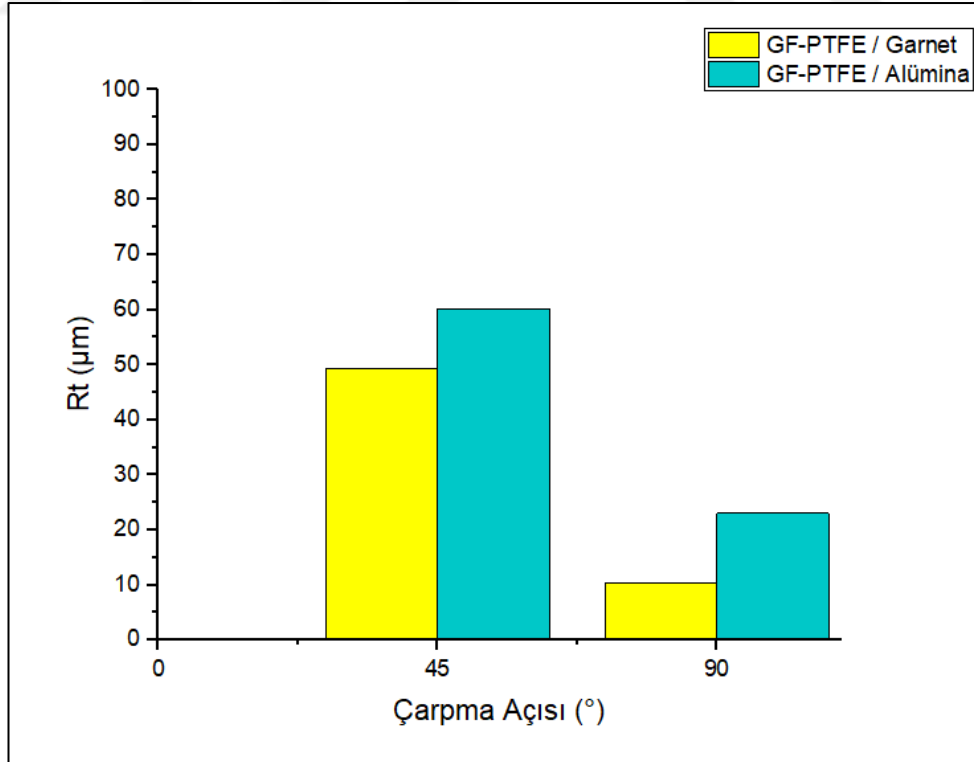
Şekil 6.18. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla saf PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri

Ra değerinde görülmüş olduğu gibi Rt değerinin de 45° çarpma açısında ve alümina aşındırıcı partikülün kullanımında daha yüksek değerlerde olduğu görülebilir. 90° çarpma açısı ve garnet aşındırıcı partikül kullanımı yüksek oranlarda Ra ve Rt değeri yaratmada nispeten etkisiz kalmıştır. Alümina partikülün 45° çarpma açısında püskürtülmesiyle garnetin aynı açıda püskürtülmesine göre yaklaşık %137 daha fazla Rt değeri elde edilmiştir. Alüminanın 90° çarpma açısında püskürtülmesiyle ise garnetin 90° çarpma açısında püskürtülmesine göre yaklaşık %64 daha fazla Rt değeri elde edilmiştir. Alümina aşındırıcı partikülün yarattığı pürüzlülük bakımından garnet aşındırıcı partikül üzerindeki üstünlüğünün 45° çarpma açısında daha etkili olduğu söylenebilir.

Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin garnet ve alümina aşındırıcı partikül kullanımı ile 45° ve 90° çarpma açılarında aşındırılmasıyla elde edilen Ra değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 6.19'da ve Rt değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.19. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla cam fiber takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri

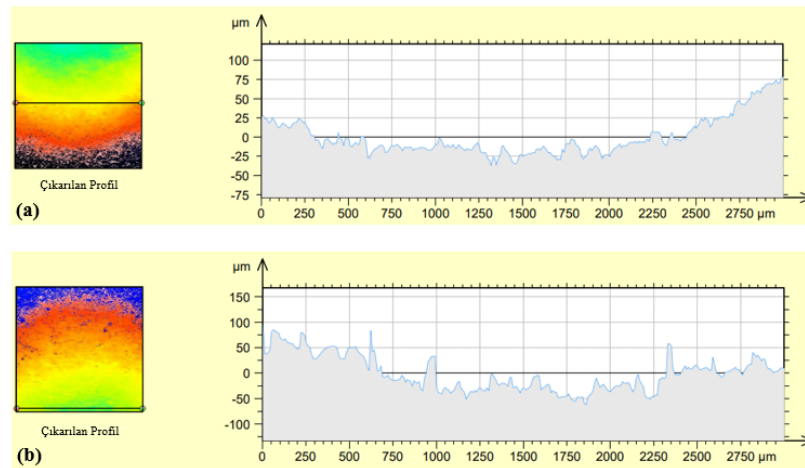


Şekil 6.20. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla cam fiber takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Rt değerleri

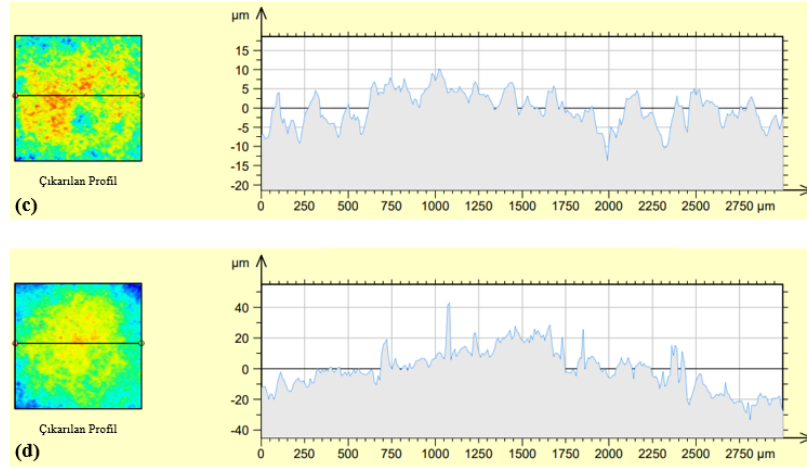
Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin 45° çarpma açısında aşındırılmasıyla malzemede oluşan ortalama pürüzlülük değeri Ra, alümina aşındırıcı partikül kullanımında garnete göre yaklaşık %113 daha yüksektir. 90° çarpma açısında ise alümina aşındırıcı partikül kullanımıyla elde edilen ortalama pürüzlülük değeri garnet aşındırıcı partikül kullanımında elde edilene göre yaklaşık %96 daha fazladır. 45° çarpma açısıyla aşındırmada elde edilen pürüzlülük değerleri 90° çarpma açısıyla aşındırmaya göre daha yüksektir ve alümina aşındırıcı partikülün garnet aşındırıcı partiküle kıyasla etkisinin 45° çarpma açısında daha fazla olduğu söylenebilir.

Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin 45° çarpma açısında alümina aşındırıcı partikül ile aşındırılması durumunda garnet aşındırıcı partikül ile aşındırılmasına göre yaklaşık %22 ve 90° çarpma açısında alümina ile aşındırılması durumunda ise garnet aşındırıcı partiküle göre yaklaşık %122 daha fazla Rt değeri elde edilmiştir. Alümina aşındırıcı partikülün ve 45° çarpma açısının daha fazla pürüzlülük yarattığı ve garnet aşındırıcı partiküle üstünlüğünün 90° çarpma açısında daha etkili olduğu söylenebilir.

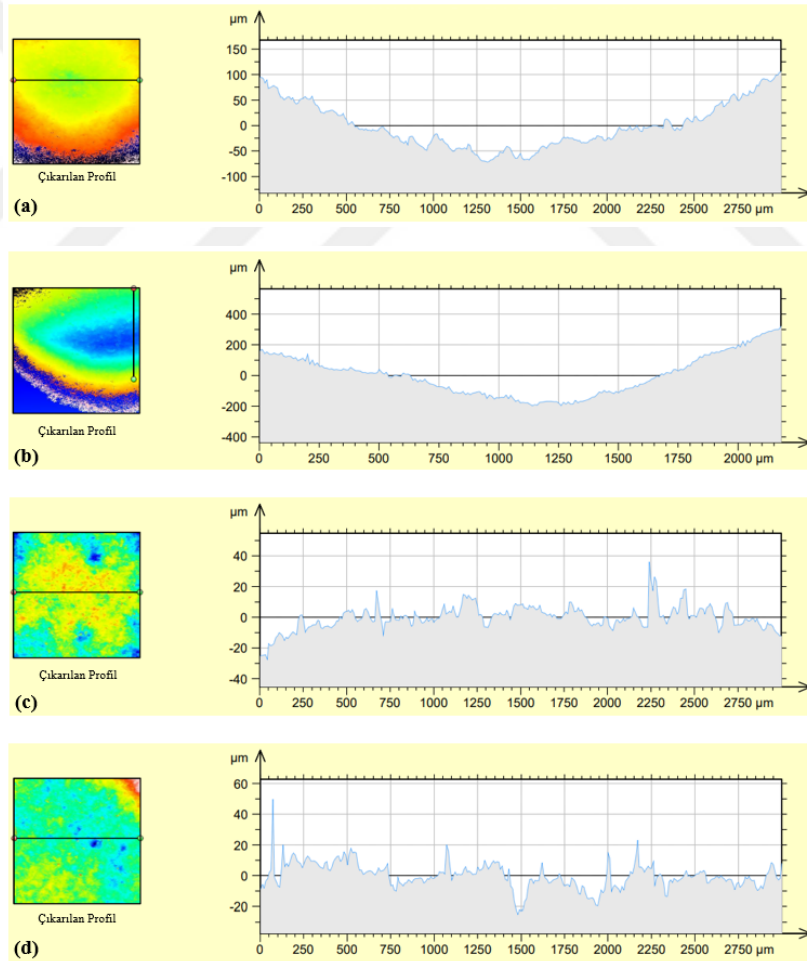
Bronz partikül ve karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin 45° ve 90° çarpma açılarında aşındırılması durumunda oluşan yüzey topografyası ve pürüzlülük değerleri sırasıyla Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de verilmiştir.



Şekil 6.21. Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin aşındırılması durumundaki yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet / 45°, (b) Alümina / 45°, (c) Garnet / 90°, (d) Alümina / 90°



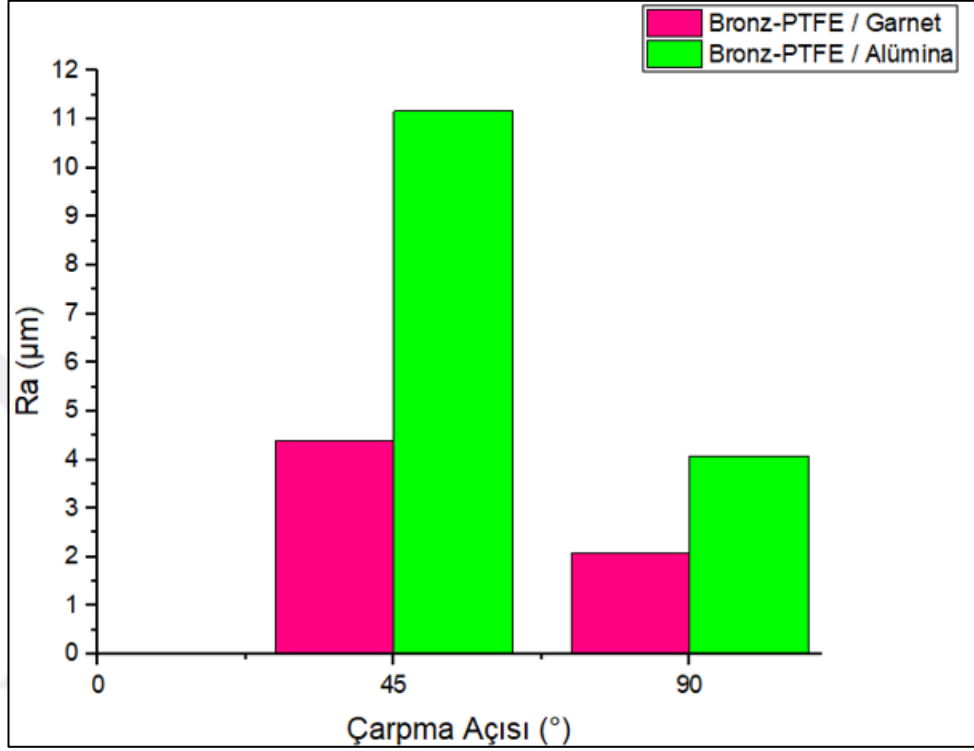
Şekil 6.21. (Devam) Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin aşındırılması durumundaki yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet / 45°, (b) Alümina / 45°, (c) Garnet / 90°, (d) Alümina / 90°



Şekil 6.22. Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin aşındırılması durumundaki yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülük değerleri (a) Garnet / 45°, (b) Alümina / 45°, (c) Garnet / 90°, (d) Alümina / 90°



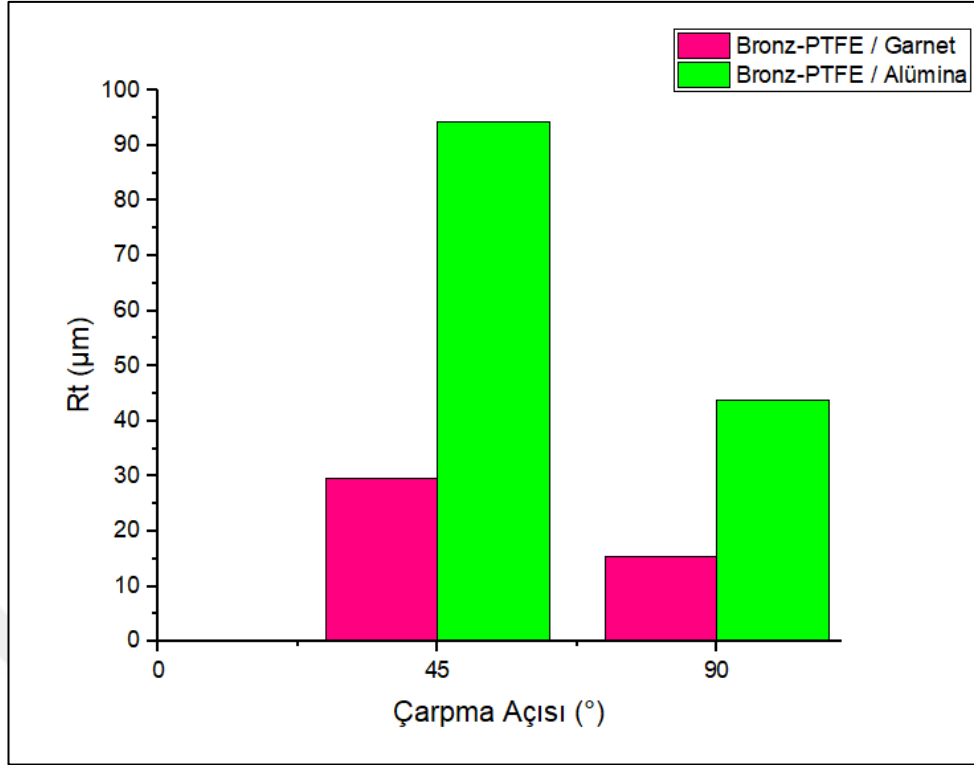
Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin garnet ve alümina aşındırıcı partikül kullanımı ile 45° ve 90° çarpma açılarında aşındırılmasıyla elde edilen Ra değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 6.23'te ve Rt değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 6.24'te verilmiştir.



Şekil 6.23. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla bronz partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri

Bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin 45° çarpma açısında alümina aşındırıcı partikül ile aşındırılması durumunda garnet aşındırıcı partikül kullanımına göre yaklaşık %155 daha fazla ortalama pürüzlülük değeri elde edilmiştir. Aynı karşılaştırma 90° çarpma açısında aşındırma durumu için yapılırsa alümina aşındırıcı partikülün yaklaşık %97 daha fazla pürüzlülük yarattığı görülür.

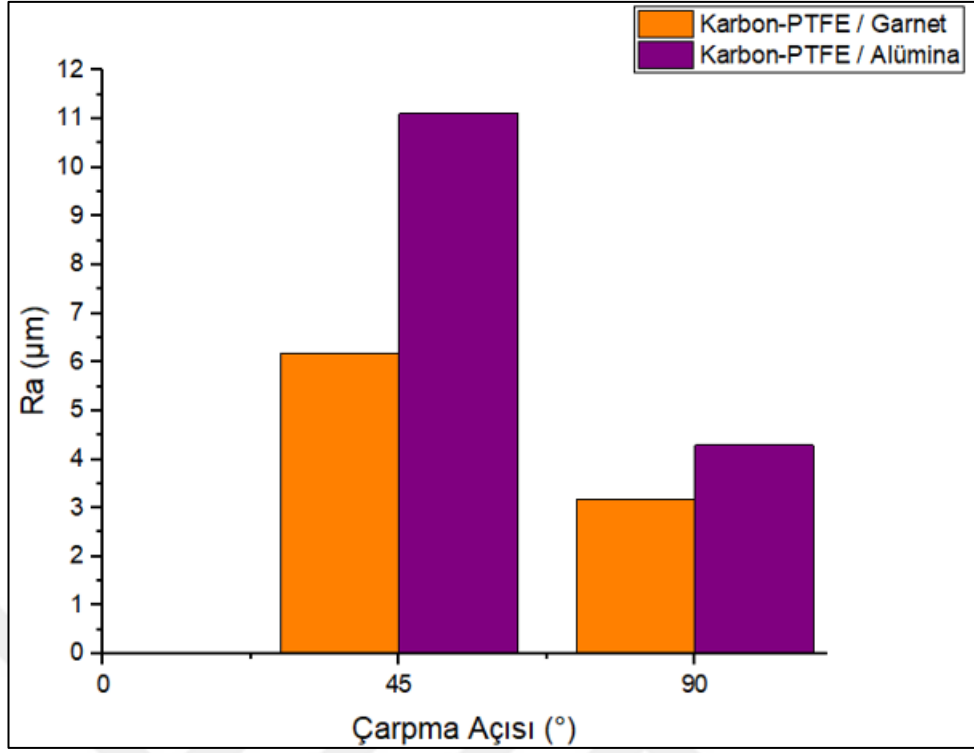
45° çarpma açısında yapılan partikül erozyonu ile aşındırmayla 90° çarpma açısında yapılan partikül erozyonu ile aşındırmaya göre malzemedede daha fazla pürüzlülük elde edilir. Oranlar incelendiğinde 45° çarpma açısında alümina aşındırıcı partikülün garnet aşındırıcı partiküle göre etkisinin 90° çarpma açısına göre daha baskın olduğu söylenebilir.



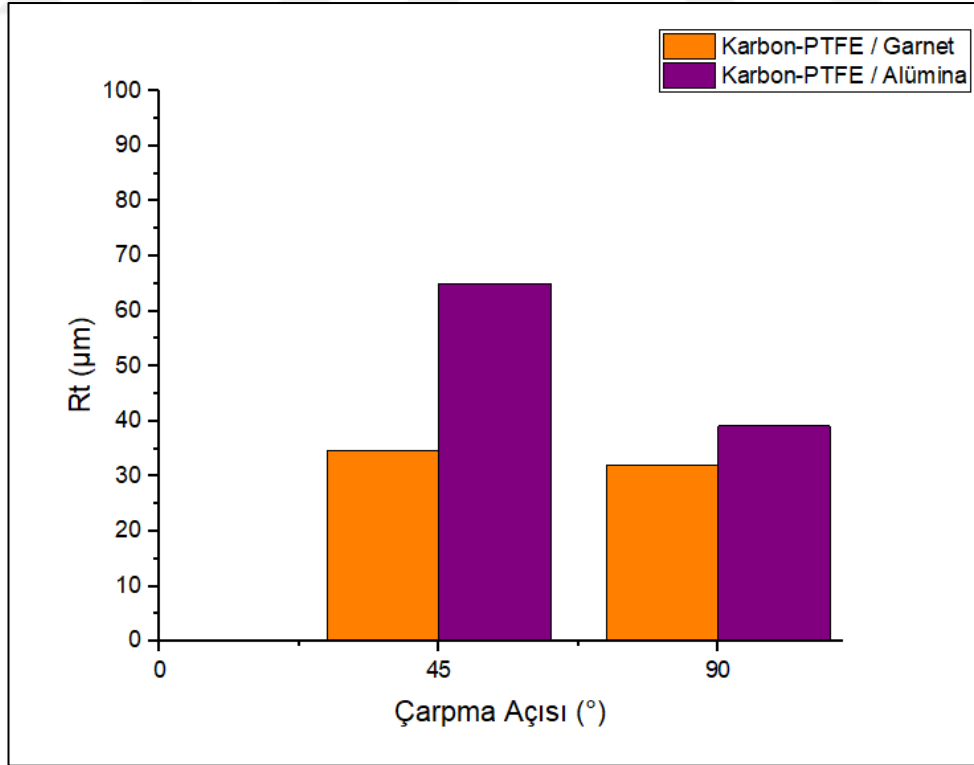
Şekil 6.24. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla bronz partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Rt değerleri

Bronz partikül takviyeli PTFE malzeme için sonuçlar incelendiğinde saf PTFE ve cam fiber takviyeli PTFE malzemelerde ve bronz partikül takviyeli PTFE malzemenin Ra değerlerinin çarpma açısına bağlı değişiminde olduğu gibi bu malzemede de 45° çarpma açısının ve alümina aşındırıcı partikülün daha fazla pürüzlülük yarattığı görülebilir. Alümina aşındırıcı partikül 45° çarpma açısında garnet aşındırıcı partikülden yaklaşık %165 ve 90° çarpma açısında yaklaşık %183 daha fazla Rt değerine sebep olmuştur. 90° çarpma açısında 45° çarpma açısına göre alümina aşındırıcı partikül garnet aşındırıcı partikülden daha yüksek oranda Rt değerine sebep olmuştur. Dolayısıyla oranlar incelendiğinde alümina aşındırıcı partikülün garnet aşındırıcı partikül üzerindeki üstünlüğünün 90° çarpma açısında daha etkin olduğu söylenebilir.

Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin garnet ve alümina aşındırıcı partikül kullanımı ile 45° ve 90° çarpma açılarında katı partikül erozyonuna maruz bırakılması durumunda elde edilen Ra değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 6.25'te ve Rt değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 6.26'da verilmiştir.



Şekil 6.25. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla karbon partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Ra değerleri

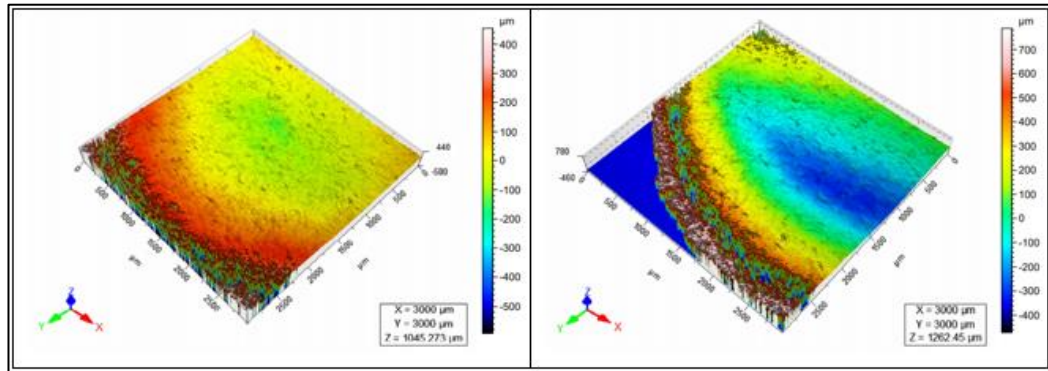


Şekil 6.26. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün 45° ve 90° çarpma açısıyla karbon partikül takviyeli PTFE malzeme yüzeyine püskürtülmesi durumunda hesaplanan Rt değerleri

Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin 45° çarpma açısında alümina aşındırıcı partikül kullanımı ile garnet aşındırıcı partikülün sağladığı pürüzlülüğe göre yaklaşık %80 daha fazla ortalama pürüzlülük değeri elde edilmiştir. 90° çarpma açısında ise alümina aşındırıcı partikülün garnete kıyasla yaklaşık %35 daha fazla pürüzlülük değerleri sağladığı görülebilir. 45° çarpma açısının her iki partikül kullanımı ile 90° çarpma açısına göre daha fazla pürüzlülük yarattığı ve alümina partikülün garnet kullanımına göre etkisinin 45° çarpma açısında daha fazla olduğu söylenebilir. Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin 45° çarpma açısında ve alümina ile aşındırılması durumunda diğerlerinde olduğu gibi daha fazla pürüzlülük oluştuğu söylenebilir. Alümina 45° çarpma açısında garnete göre yaklaşık %87 ve 90° çarpma açısında ise garnete göre yaklaşık %23 daha fazla Rt değerine sebep olmuştur. Alümina aşındırıcı partikülün garnete üstünlüğünün 45° çarpma açısında daha etkili olduğu söylenebilir.

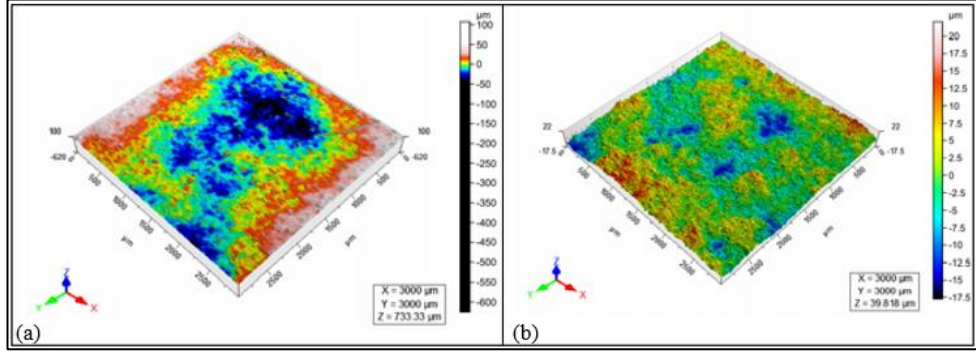
Elde edilen sonuçların tümüne göre Ra'nın ve Rt'nin, 45° çarpma açısıyla aşındırmada 90° çarpma açısına göre ve alümina ile aşındırılması durumunda garnet ile aşındırılmasına göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Garnet ve alümina aşındırıcı partikülün oluşturduğu ortalama pürüzlülük değerleri arasındaki fark 45° çarpma açısında daha etkin olarak görülür.

Aşındırma sonrası optik profilometre incelemelerinde elde edilen yüzey topografya görüntülerine örnek olarak Şekil 6.27'ye bakıldığında karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin 45° çarpma açısında alümina ile aşındırılması durumunda daha derin bir aşınmanın meydana geldiği, garnet ile aşındırılması durumunda ise daha yüzeysel bir aşınmanın meydana geldiği görülebilir.



Şekil 6.27. Karbon partikül takviyeli PTFE malzemenin 45° çarpma açısıyla aşındırılması durumunda yüzeylerin optik profilometre görüntüleri; (a) Garnet ve (b) Alümina

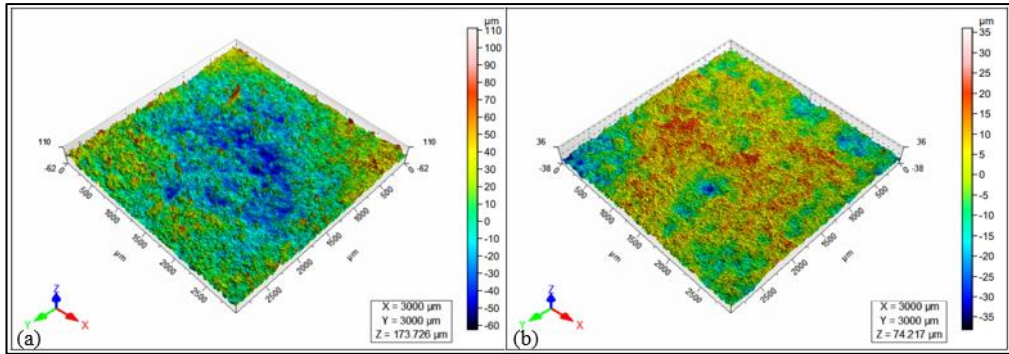
Bir diğerk örnek Şekil 6.28’de görüldüğü gibi saf PTFE malzemenin 45° ve 90° çarpma açısı kullanılarak garnet ile aşındırılması durumunda oluşan yüzey topografyası üzerinden verilebilir.



Şekil 6.28. Saf PTFE malzemenin garnet ile aşındırılması durumunda yüzeylerin optik profilometre görünümüleri; (a) 45° ve (b) 90° çarpma açısında

Saf PTFE malzemenin 90° çarpma açısıyla aşındırılmasında deformasyon azalır ve daha homojen hale gelir. 45° ile gelen aşındırıcı partiküller ise yüzeyde nispeten derin vadi ve yüksek tepelere sebep olur.

Şekil 6.29’da cam fiber takviyeli PTFE malzemenin 45° ve 90° çarpma açısında alümina aşındırıcı partikül püskürtülmesiyle aşındırılması durumunda oluşan yüzey topografya görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.29. Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin alümina ile aşındırılması durumunda yüzeylerin optik profilometre görünümüleri; (a) 45° ve (b) 90° çarpma açısında

Cam fiber takviyeli PTFE malzemenin 45° çarpma açısında alümina aşındırıcı partikül püskürtülerek aşındırılmasında derin aşınma izlerinin olduğu, 90° çarpma açısında aşındırıcı partikülün püskürtülmesi durumunda ise daha yüzeysel bir aşınmanın gerçekleştiği görülmektedir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında PTFE (Teflon) malzeme ve rastgele dağılımlı kısa cam fiber, karbon partikül ve bronz partikül ile takviyelendirilmiş kompozitleri garnet ve alümina aşındırıcı partikülün ayrı ayrı ve 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarında püskürtülmesiyle katı partikül erozyonuna maruz bırakılmıştır.

Erozyon sonrası en yüksek aşınma oranları düşük çarpma açılarında görülmüştür. PTFE sünek bir malzemedir ancak içerisine rijit partikül veya fiber takviye edilmesiyle oluşan kompozitleri literatürde yarı sünek olarak tanımlanır. Bu davranışa göre saf PTFE malzemede maksimum erozyon oranı 30° çarpma açısında görülürken PTFE kompozitlerinde bu oranın 30° çarpma açısından 45°-60° aralığına doğru uzaklaşması beklenebilir. Fakat tez çalışması sonuçlarına göre maksimum erozyon oranı PTFE kompozitlerinde de 30° civarında görülmüştür. Elde edilen maksimum açı değişmemesine rağmen bu açıda elde edilen aşınma miktarında ise kayda değer bir farklılık vardır. Takviye edilmiş malzemelerde erozyon oranı çok belirgin şekilde artış göstermiştir. Bu durum (rijit takviye elemanının eklenmesi ile maksimum aşınmanın meydana geldiği açının artmaması) fiberlerin veya partiküllerin PTFE malzeme yapısını fazla kırılğanlaştırmadığını gösterir, PTFE kompozitleri de bu bağlamda sünek olarak tanımlanabilir. Katı partikül erozyonu bir katmanı temizlemek veya oksit tabakası gidermek gibi iyi amaçlar doğrultusunda kullanılacaksa ve ana malzemenin zarar görmemesi isteniliyorsa tez çalışması kapsamındaki bu malzemelerde işlem 30° çarpma açısında değil 90° çarpma açısına yakın daha yüksek çarpma açılarında gerçekleştirilmelidir.

Rastgele dağılımlı kısa fiberler aşınma direncini geliştirirken karbon ve bronz partikül takviyelerinin aşınma direncini geliştirmeye katkısı olmamıştır hatta tek başına matrise kıyasla aşınmayı artırmıştır. Hedef malzeme sertliğinin artması genel anlamda aşınma direncini artırır ancak sertliğin belli bir değeri geçip aşırı kırılğanlık yaratması aşınma direncini düşürür. Hem mekanik özellikleri hem de erozif aşınma direnci yüksek bir yapı için kısa cam fiber takviyesinin uygun olduğu söylenebilir. Kısa fiberler, partikül

takviyesine göre daha yüksek elastisite modülü sağlar ve mukavemet özelliklerini iyileştirir, aynı zamanda erozif aşınmaya karşı direnci partikül takviyesine göre daha yüksektir.

Test edilen tüm malzemelerde ve tüm çarpma açılarında alümina aşındırıcı partikül garnet aşındırıcı partiküle kıyasla daha yüksek aşınma oranlarına sebep olmuştur. Garnetten daha sert aşındırıcı olan alümina hedef yüzeye çarptığında daha az parçalanır ve aşındırma etkisi daha yüksek olur. Ayrıca daha keskin kenarlara sahiptir böylece daha büyük temas gerilimine dolayısıyla daha büyük malzeme kaybına sebep olur. SEM analizi sonucu elde edilen görüntülerde garnetin daha yüzeysel deformasyonlar oluşturduğu ve alümina partiküllerin keskin köşeleriyle yarıklara sebep olduğu görülmüştür. Küresele yakın şekillerde erozyon plastik deformasyon şeklinde, keskin köşelerde ise kesme, kırılma ve parçalanma şeklinde gerçekleşir.

Profilometre sonuçlarındaki yüzey topografyası üzerinden okunan Ra ve Rt değerlerinin 45° çarpma açısında ve alümina aşındırıcı partikül püskürtülmesi durumunda daha yüksek olduğu görülmüştür. Katı partikül erozyonu, malzeme yüzeyinde istenilen homojenlikte, istenilen Rt değerlerinin elde edilmesine olanak sağlar. Ancak istenilen yüzey pürüzlülüğü hangi parametreler birleştirildiğinde elde edilir araştırılarak belirlenmelidir. Aksi halde uygun olmayan parametreler sonucu partiküllerin yüzeye saplanması gibi durumlar oluşabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Rao K.S., Varadarajan Y.S., Rajendra N., Erosive Wear Behaviour of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composite, *Science Direct*, 2015, **2**, 2975 – 2983.
- [2] Patnaik A., Satapathy A., Chand N., Barkoula N.M., Biswas S., Solid Particle Erosion Wear Characteristics of Fiber and Particulate Filled Polymer Composites: A Review”, *Wear*, 2010, **268**, 249–263.
- [3] Zhao G., Hussainova I., Antonov M., Wang Q., Wang T., Yung D., Effect of Temperature on Sliding and Erosive Wear of Fiber Reinforced Polyimide Hybrids, *Tribology International*, 2015, **82**, 525–533.
- [4] Kumar R., Malaval B., Antonov M., Zhao G., Performance of Polyimide and PTFE Based Composites Under Sliding, Erosive and High Stress Abrasive Conditions, *Tribology International*, 2020, **147**, 106282.
- [5] McGrath L.M., Effect of Fillers and Filler Interface on Fracture Toughness of Epoxy-Alumina Composites, Doctoral Dissertation, University of Connecticut, Institute of Materials Science, Connecticut, 2009, 3351340.
- [6] Barkoula N.M., Kocsis J.K., Processes and Influencing Parameters of the Solid Particle Erosion of Polymers and Their Composites, *Journal Of Materials Science*, 2002, **37**, 3807 – 3820.
- [7] Getu H., Spelt J.K., Papini M., Reduction of Particle Embedding in Solid Particle Erosion of Polymers, *Wear*, 2011, **270**, 922-928.
- [8] Lubin G., *Handbook of Composites*, 3rd ed., Chapman & Hall, Newyork, 1982.
- [9] Egbo M. K., A Fundamental Review on Composite Materials and Some of Their Applications in Biomedical Engineering, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2020.
- [10] Beşergil, B., *Kompozitler: Doğadan Teknolojiye Temel İlkeler*, 1. basım, Gazi Kitabevi, Ankara, 2016.
- [11] Kaya, A. İ., Kompozit Malzemeler ve Özellikleri, *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 2016, **29**, 38-45.
- [12] Özdemir E., Poly (lactic acid) Blends, Composites and Fibers and Direct Pyrolysis Mass Spectrometry for Nanoclay Composites, Doctoral Dissertation, Middle East Technical University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Ankara, 2017, 489413.



- [13] Ebnesajjad, S., *Fluoroplastics*, 2nd ed., Elsevier, Philadelphia, 2016.
- [14] Shi Y.J., Feng X., Wang H.Y., Liu C., Lu X.H., Effects of Filler Crystal Structure and Shape on the Tribological Properties of PTFE Composites, *Tribology International*, 2007, **40**, 1195–1203.
- [15] Bandaru A.K., Kadiyala A.K., Weaver P.M., O’Higgins R.M., Mechanical and Abrasive Wear Response of PTFE Coated Glass Fabric Composites, *Wear*, 2020, **450-451**, 203267.
- [16] Bozan U., Nano Partikül Takviyeli Teflon Kaplamaların Üretilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2013, 193452.
- [17] Ebnesajjad, S., *Expanded PTFE Applications Handbook*, 1st ed., Elsevier, Philadelphia, 2016.
- [18] Li J., Ran Y., Evaluation of the Friction and Wear Properties of PTFE Composites Filled with Glass and Carbon Fibre, *Mater. Sci. Eng. Tech.*, 2010, **41**, 115–118.
- [19] Suresh G., Vasu V., Raghavendra G., Optimization of Input Parameters on Erosion Wear Rate of PTFE/HNT Filled Nanocomposites, *Science Direct*, 2018, **5**, 1462–1469.
- [20] Tewaria U.S., A.P. Harsha, A.M. Hager, K. Friedrich, Solid Particle Erosion of Carbon Fibre and Glass Fibre Epoxy Composites, *Composites Science and Technology*, 2003, **63**, 549–557.
- [21] Chen Q., Li D.Y., Computer Simulation of Solid Particle Erosion, *Wear*, 2003, **254**, 203–210.
- [22] Rajesh J.J. Bijwe J., Tewari U.S., Venkataraman B., Erosive Wear Behavior of Various Polyamides, *Wear*, 2001, **249**, 702–714.
- [23] Mazdak P., Najmi K., Najafifard F., Hassani S., A Comprehensive Review of Solid Particle Erosion Modeling for Oil and Gas Wells and Pipelines Applications, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, **21**, 850-873.
- [24] Fidan S., Sınmazçelik T., Polimerler ve Polimer Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonunun Mekanizmaları ve Malzeme Performansını Etkileyen Faktörler, Kocaeli Üniversitesi, 2016.
- [25] Desale G.R., Gandhi B.K., Jain S.C., Particle Size Effects on the Slurry erosion of Aluminum Alloy (AA 6063), *Wear*, 2009, **266** (11-12), 1066-1071.
- [26] Harsha A.P., Tewari U.S., Venkataraman B., Solid Particle Erosion Behaviour of Various Polyaryletherketone Composites, *Wear*, 2003, **254**, 693–712.

- [27] Chauhan A.K., Goel D.B., Prakash S., Solid Particle Erosion Behaviour of 13Cr–4Ni and 21Cr–4Ni–N Steels, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, **467**, 459–464.
- [28] Arjula S., Harsha A. P., Ghosh M. K., Solid Particle Erosion Behavior of High-Performance Thermoplastic Polymers, *J Mater Sci*, 2008, **43**, 1757–1768.
- [29] Barkoula N.M., Karger J., Effects of Fibre Content and Relative Fibre Orientation on the Solid Particle Erosion of GF/PP Composites, *Wear*, 2002, **252**, 80–87.
- [30] Patnaik A., Satapathy A., Mahapatra S. S., Dash R. R., Tribo-performance of Polyester Hybrid Composites: Damage Assessment and Parameter Optimization Using Taguchi Design, *Materials and Design*, 2009, **30**, 57–67.
- [31] Patnaik A., Satapathy A., Mahapatra S. S., Dash R. R., Implementation of Taguchi Design For Erosion Of Fiber-reinforced Polyester Composite Systems With Sic Filler, *Journal Of Reinforced Plastics and Composites*, DOI: 10.1177/0731684407087688.
- [32] Momber A., *Blast Cleaning Technology*, 1st ed., Springer, Hamburg, 2008.
- [33] Kogel J. E., Trivedi N. C., Barker J. M. Krukowski S. T., *Industrial Minerals and Rocks*, 7th ed., Elsevier, Colorado, 2006.
- [34] Oh T. M., Joo G. W., Cha Y., Cho G. C., Effect of Garnet Characteristics on Abrasive Waterjet Cutting of Hard Granite Rock, *Advances in Civil Engineering*, DOI: 10.1155/2019/5732649.
- [35] <http://garnetkumu.com/> (Ziyaret Tarihi: 23 Şubat 2021).
- [36] [https://www.saykar.net/aluminyum\\_oksit](https://www.saykar.net/aluminyum_oksit) (Ziyaret Tarihi: 3 Mart 2021).
- [37] Sujuan Y., Xingrong Z., Tribological Properties of PTFE and PTFE Composites at Different Temperatures, *Tribology Transactions*, 2014, **57** (3), 382-386.
- [38] Şahin Y., Analysis of Abrasive Wear Behavior of PTFE Composite Using Taguchi's Technique”, *Cogent Engineering*, DOI:10.1080/23311916.2014.1000510.
- [39] Sahin Y., Dry Wear and Metallographic Study of PTFE Polymer Composites, *Mech. Compos. Mater.*, 2018, **54** (3), 403–414.
- [40] Valente C., Boutin F.F, Rocha L.P.C. Vale J.L., Silva C.H., Effect of Graphite and Bronze Fillers on PTFE Tribological Behavior: A Commercial Materials Evaluation, *Tribology Transactions*, DOI: 10.1080/10402004.2019.1695032.
- [41] Goyal R. K., Yadav M., Study on Wear and Friction Behavior of Graphite Flake-Filled PTFE Composites, *Inc. J. Appl. Polym. Sci.*, 2013, **127**, 3186–3191.

- [42] Bahadur S., Tabor D., The Wear of Filled Polytetrafluoroethylene, *Wear*, 1984, **98**, 1- 13.
- [43] Jisheng E., Gawne D.T., Tribological Performance of Bronze-filled PTFE Facings for Machine Tool Slideways, *Wear*, 1994, **176**, 195-205.
- [44] <https://www.polikim.com.tr/> (Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2021).



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Özzaim P.**, Sımmazçelik T., Fidan S., PTFE ve Kompozitlerinin Partikül Erozyonu Davranışı, *Ankara IV. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, Ankara, Türkiye, 10-11 Nisan 2021.
- [2] Edis R., Yalçın C., **Özzaim P.**, Yılmaz Y., Yurdakul Y., Sımmazçelik T., Sac Şekillendirme İşletmesinde Fire Yönetimi Çalışmasına Bir Örnek, *Icontech Uluslararası Pozitif Bilimlerde Yenilikçi Araştırmalar Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 1 Mayıs 2020.
- [3] Yalçın C., Edis R., **Özzaim P.**, Durali H., Yurdakul Y., Sımmazçelik T., Sac Şekillendirme İşletmesinde SMED Çalışmasına Bir Örnek, *Icontech Uluslararası Pozitif Bilimlerde Yenilikçi Araştırmalar Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 1 Mayıs 2020.

## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2015 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2019 yılı bahar dönemi sonunda mezun oldu. 2019 yılı güz döneminde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2021 yılı Şubat ayından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Malzemeleri ve İmalat Teknolojileri Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

