

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TEFLON (PTFE) MATRİSLİ POLİMER KOMPOZİTLERDE
TAKVİYE EDİCİ MALZEMELERİN PARTİKÜL EROZYONUNA
ETKİLERİ**

KIYMET EŞİYOK

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEFLON (PTFE) MATRİSLİ POLİMER KOMPOZİTLERDE
TAKVİYE EDİCİ MALZEMELERİN PARTİKÜL EROZYONUNA
ETKİLERİ

KIYMET EŞİYOK

Prof. Dr. Muzaffer ZEREN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr. Öğretim Üyesi Levent KARA
Jüri Üyesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 20/06/2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

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

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

beyan ederim.

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

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

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

Kıymet EŞİYOK

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

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

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

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

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Kıymet EŞİYOK

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Mühendislik malzemeleri ilk çağlardan günümüze kadar insanoğlunun ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir konumda bulunmaktadır. Bu kapsamda son yüzyıllara kadar özellikle demir ve demir alaşımları pek çok uygulamada yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Ancak günümüzde artan insan nüfusu ve bunun sonucunda ortaya çıkan enerji ihtiyacı geleneksel malzemelerin yerine daha hafif ve üretimi daha kolay malzemelerin yer almasına yol açmıştır. Bu kapsamda kompozit malzemeler, sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle havacılık, otomotiv ve uzay sanayisi gibi alanlarda geleneksel malzemelerin yerlerine kullanılabilmeleri için üzerinde yoğun bir şekilde araştırmalar yapılmaktadır.

Bu tez kapsamında kompozit malzemelerde matris elemanı olarak yaygın bir şekilde kullanılan PTFE polimer malzemesine çeşitli takviye elemanları eklenerek katı partikül erozyonuna maruz bırakılmıştır. İşlem sonrasında numunelerin mekanik ve erozif aşınma davranışları karakterize edilmiştir.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında beni teşvik eden, yönlendiren ve her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Muzaffer ZEREN'e teşekkürü bir borç bilirim. Yine çalışmanın bu hale gelmesinde bütün bilgi, birikim ve tavsiyelerinden faydalandığım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarda verdikleri desteklerden dolayı Doç. Dr. Sinan FİDAN ve Ar. Gör. Dr. Fulya Kahrıman hocalarıma ayrıca teşekkür ederim.

Haziran - 2022

Kıymet EŞİYOK

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER TABLOSU.....	vi
ŞİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	2
2.1. Kompozit Malzemeler.....	2
2.2. Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemeler	4
2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler.....	4
2.2.2. Seramikli Matris Kompozitler.....	5
2.2.3. Polimer Matrisli Kompozitler	5
2.2.3.1. Termoset Matris Malzemeleri.....	6
2.2.3.1.1. Polyester Matrisli Kompozitler	7
2.2.3.1.2. Epoksi Matrisli Kompozitler	7
2.2.3.2. Termoplastik Matris Malzemeleri	8
2.2.3.2.1. Polipropilen (PP) Bazlı Kompozitler.....	10
2.2.3.2.2. Polietilen (PE).....	10
2.2.3.2.3. Polikarbonatlar (PC) Bazlı Kompozitler	11
2.2.3.2.4. Polietereterketon (PEEK)	11
2.2.3.2.5. Poliamidler.....	12
2.3. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler.....	12
2.3.1. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler	12
2.3.2. Partikül Takviyeli Polimer Kompozitler	14
2.3.3. Tabakalı Kompozitler.....	14
2.3.4. Hibrit Kompozitler	15
3. POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	16
3.1. Islak Yatırma Yöntemi	16
3.2. Filament Sarma.....	17
3.3. Reçine Transfer Kalıplama.....	18
3.4. Ekstrüzyon Yöntemi.....	19
3.5. Termoplastiklerin Enjeksiyon Kalıplanması	20
3.6. Pultrüzyon Yöntemi	20
4. TRİBOLOJİ, SÜRTÜNME VE AŞINMA.....	23
4.1. Sürtünme	23
4.2. Aşınma.....	25
4.2.1. Abrazif Aşınma	25
4.2.2. Adhesif Aşınma.....	27
4.2.3. Korozyon Aşınma	27
4.2.4. Yorulma Aşınması.....	27
4.2.5. Erozyon Aşınması	27
4.3. Erozyona Etki Eden Faktörler	29
4.3.1. Parçacık Boyutu	29

4.3.2. Parçacık Şekli.....	30
4.3.3. Parçacık ve Hedef Yüzeyin Sertliği	30
4.3.4. Çarpma Açısının Etkisi	31
4.3.5. Parçacık Çarpma Hızı.....	31
4.3.6. Sıcaklık.....	31
5. PTFE VE PTFE MATRİSLİ KOMPOZİTLER İLE İLGİLİ YAPILAN LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	33
6. TEZİN AMACI	37
7. MALZEME VE YÖNTEM.....	38
7.1. Morfolojik Analizler.....	39
7.2. Topografik Analizler	41
8. BULGULAR	42
8.1. Katı Parçacık Erozyon Oranları	42
8.2. Yüzey Morfolojileri.....	47
8.3. Optik Profilometre Analizleri.....	56
9. TARTIŞMA.....	63
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	68
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	79
ÖZGEÇMİŞ	80

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 2.1.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	4
Şekil 3.1.	Genel olarak polimer kompozit malzemelerin üretim şeması	16
Şekil 3.2.	Filament sarma tekniğinin şematik gösterimi	18
Şekil 3.3.	Reçine transfer kalıplama işlem adımlarının şematik gösterimi	19
Şekil 3.4.	Pultrüzyon işleminin şematik gösterimi	21
Şekil 4.1.	İki cisim ve üç cisim abrazyon aşınmanın şematik resmi	26
Şekil 4.2.	Sünek ve gevrek malzemelerin katı partikül erozyon davranışları	29
Şekil 7.1	Numunelerin fotoğrafları	38
Şekil 7.2.	Katı partikül erozyonu deney düzeneği	39
Şekil 7.3.	Kaplama cihazının fotoğrafı	40
Şekil 7.4.	Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) fotoğrafı	40
Şekil 7.5.	Optik Profilometre cihazının fotoğrafı	41
Şekil 8.1.	Saf PTFE malzemesinin 1 ve 2 bar basınç altında ve farklı çarpma açılarındaki erozyon oranları	42
Şekil 8.2.	PTFE+%25 Cam Fiber takviyeli kompozit malzemenin 1 ve 2 bar basınç altında ve farklı çarpma açılarındaki erozyon oranları	43
Şekil 8.3.	PTFE+%35 Karbon takviyeli kompozit malzemesinin 1 ve 2 bar basınç altında ve farklı çarpma açılarındaki erozyon oranları	44
Şekil 8.4.	PTFE+%60 Bronz takviyeli kompozit malzemenin 1 ve 2 bar basınç altında ve farklı çarpma açılarındaki erozyon oranları	45
Şekil 8.5.	1 bar basınç altında PTFE, PTFE %25 Cam, PTFE %35 Karbon ve PTFE %60 Bronz kompozit malzemelerinin 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarındaki göstermiş oldukları erozyon aşınma oranları	46
Şekil 8.6.	2 bar basınç altında PTFE, PTFE %25 Cam, PTFE %35 Karbon ve PTFE %60 Bronz kompozit malzemelerinin 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarındaki göstermiş oldukları erozyon aşınma oranları	47
Şekil 8.7.	Saf PTFE numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey SEM fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 1 bar basınç ve 45° çarpma açısı, c) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 45° çarpma açısı	48
Şekil 8.8.	PTFE+%25 cam fiber kompozit malzemesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey SEM fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 1 bar basınç ve 45° çarpma açısı, c) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 45° çarpma açısı	49
Şekil 8.9.	PTFE+%35 karbon partikül kompozit malzemesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey SEM fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 1 bar basınç ve 45° çarpma açısı, c) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 45° çarpma açısı	50
Şekil 8.10.	PTFE+%60 bronz kompozit malzemesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey SEM fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 1 bar basınç ve 45° çarpma açısı, c) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 45° çarpma açısı	51
Şekil 8.11.	Sabit 1 bar basınç altında 15° çarpma açısında yapılan erozyon deneylerinden elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları, a)	

	Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli ve d) %60 bronz takviyeli.....	52
Şekil 8.12.	Sabit 1 bar basınç altında 45° çarpma açısında yapılan erozyon deneylerinden elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli ve d) %60 bronz takviyeli.....	53
Şekil 8.13.	Sabit 2 bar basınç altında 15° çarpma açısında yapılan erozyon deneylerinden elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli ve d) %60 bronz takviyeli.....	54
Şekil 8.14.	Sabit 2 bar basınç altında 45° çarpma açısında yapılan erozyon deneylerinden elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli ve d) %60 bronz takviyeli.....	55
Şekil 8.15.	Saf PTFE numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey optik profilometre fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı, c) 1 bar basınç ve 90° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 90° çarpma açısı	56
Şekil 8.16.	PTFE+%25 Cam Fiber kompozit numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey optik profilometre fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı, c) 1 bar basınç ve 90° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 90° çarpma açısı	57
Şekil 8.17.	PTFE+%35 Karbon kompozit numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey optik profilometre fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı, c) 1 bar basınç ve 90° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 90° çarpma açısı	58
Şekil 8.18.	PTFE+%60 Bronz kompozit numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey optik profilometre fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı, c) 1 bar basınç ve 90° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 90° çarpma açısı	59
Şekil 8.19.	Sabit 1 bar basınçta ve 15° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonucunda elde edilen optik Profilometre görüntüleri, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli, d) %60 bronz takviyeli	60
Şekil 8.20.	Sabit 1 bar basınçta ve 90° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonucunda elde edilen optik Profilometre görüntüleri, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli, d) %60 bronz takviyeli	60
Şekil 8.21.	Sabit 2 bar basınçta ve 15° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonucunda elde edilen optik Profilometre görüntüleri, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli, d) %60 bronz takviyeli	61
Şekil 8.22.	Sabit 2 bar basınçta ve 90° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonucunda elde edilen optik Profilometre görüntüleri, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli, d) %60 bronz takviyeli	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

s	: Saniye
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
ZnO	: Çinko oksit
SiC	: Silisyum Karbür
m	: Metre
%	: Yüzde

Kısaltmalar

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
FRP	: Fiber Takviyeli Plastik
PC	: Polikarbonatlar
PE	: Polietilen
PEEK	: Polietereterketon
PMK	: Polimer Matris Kompozit
PP	: Polipropilen
PTFE	: Politetrafloroetilen
PTW	: Potassium Titanate Whisker (Potasyum Titanat Visker)
RTK	: Reçine Transfer Kalıplama
SEM	: Scanning Elctron Mikroskopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TEM	: Transmission Electron Mikroskopy (Geçirimli Elektron Mikroskobu)
XRD	: X-Ray Diffraction (X Işını Difraksiyonu)

TEFLON MATRİSLİ POLİMER KOMPOZİTLERDE TAKVİYE EDİCİ MALZEMELERİN PARTİKÜL EROZYONUNA ETKİLERİ

ÖZET

Teflon malzemesi mutfakta kullanılan tavalardan uçakların gövde malzemelerine kadar pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılan bir polimer malzemedir. Polimer malzemeler hafif olmaları, üretimlerinin ve şekillendirilebilirliklerinin kolay olmalarına rağmen katı parçacıklara karşı aşınma dirençlerinin düşük olduğu bilinmektedir. Bu nedenle teflon malzemelerinin erozyon aşınma dirençlerinin artırılabilmesi için Bu özelliklerinin iyileştirilebilmeleri için çeşitli takviye elemanları ile kompozit bir yapı oluşturmak yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak elde edilen erozyon aşınma karakteristikleri üzerinde genel geçer bir kural bulunmaktadır.

Bu nedenle gerçekleştirilen bu çalışmada, %25 cam fiber, %35 karbon ve %60 bronz eklenerek oluşturulmuş kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışları analiz edilmiştir. Erozyon deneyleri farklı parçacık püskürtme açılarında ve garnet parçacıkları ile gerçekleştirilmiştir. Erozyona uğramış numune yüzeyleri temassız optik profilometre ile ölçülmüştür. Meydana gelen aşınma mekanizmaları SEM ile karakterize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eroziyon Aşınma, Garnet, Kompozit Malzeme, Teflon.

EFFECTS OF REINFORCING MATERIALS ON PARTICLE EROSION OF TEFLON MATRIX POLYMER COMPOSITES

ABSTRACT

Teflon material is a polymer material that is widely used in many areas from kitchen pans to aircraft body materials. Although polymer materials are light, easy to manufacture and formable, they are known to have low wear resistance against solid particles. For this reason, it is widely used method to create a composite structure with various reinforcement elements in order to increase the erosion wear resistance of Teflon materials. However, there is not a general rule on the erosion wear characteristics of materials.

For this reason, in this study, the erosion wear behavior of composite materials formed by adding 25% glass fiber, 35% carbon and 60% bronze was analyzed. Erosion experiments were performed with garnet particles at different particle spray angles. The eroded sample surfaces were measured with a non-contact optical profilometer. The resulting wear mechanisms were characterized using SEM.

Keywords: Erosive Wear, Garnet, Composite Material, Teflon.

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler başlıca malzeme alanındaki ilerlemelere bağlıdır. Endüstriyel alandan bağımsız olarak, herhangi bir tasarımda belirlenmesi gereken en önemli faktörlerden biri malzeme seçimidir. Mühendislik malzemeleri genel olarak metaller, seramikler, polimerler ve kompozit malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu malzeme gruplarından kompozit malzemeler; farklı özelliklere sahip malzemelerin herhangi bir kimyasal tepkime olmaksızın bir araya getirilerek arzu edilen özelliklere sahip bir malzeme oluşturmasına olanak sağladığından dolayı son yıllarda üzerinde pek çok araştırma yapılan bir alan olmuştur(Godara ve diğ. 2021; Matabola ve diğ. 2009; Shi ve diğ. 2008; Bhushan ve Sharma 2020).

Kompozit malzemeler genel olarak matris malzemesine göre; metal matris kompozit, seramik matris kompozit ve polimer matris kompozit, takviye elemanına göre ise; fiber takviyeli, partikül takviyeli, tabakalı ve dolgu kompozit malzemeleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Malzemeler servis şartlarında meydana gelen mekanik, kimyasal ve fiziksel etkileşimlerden dolayı hasara ve hasarların neticesinde bozulmalara maruz kalmaktadır. Bu hasar mekanizmalarından en önemli olanları aşınma, yorulma, korozyon ve katı parçacık erozyonudur. Malzemelerin erozyon dayanımı son yıllarda makine elemanlarının tasarımında malzeme seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli bir parametre haline gelmiştir. Katı parçacık erozyonu özellikle gaz türbinlerinde ve termik santral gibi alanlarda makine ömürleri için ciddi problem doğurmaktadır. Araştırmacılar özellikle erozyona uğramış yüzeyin yapısını çeşitli mikroskobik teknikler ile inceleyerek, oluşan malzeme kayıplarının mekanizmaları ve erozyon sonucunda malzemelerde meydana gelen fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimlerin açığa çıkartılmasında önemli öneriler ortaya koymuşlardır (Holliday ve Robinson 1973; Wakelin 1974; Tanaka ve Kawakami 1982; Shida ve Fujikawa 1985; Rigney 1988; Zhou ve Bahadur 1989).

Bu çalışma kapsamında, sonraki bölümlerde kompozit malzemeler, kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, maruz kaldıkları hasar mekanizmaları ve en nihayetinde tez kapsamında incelenen PTFE ve PTFE esaslı kompozit malzemelerde son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar irdelenecektir.

2. GENEL BİLGİLER

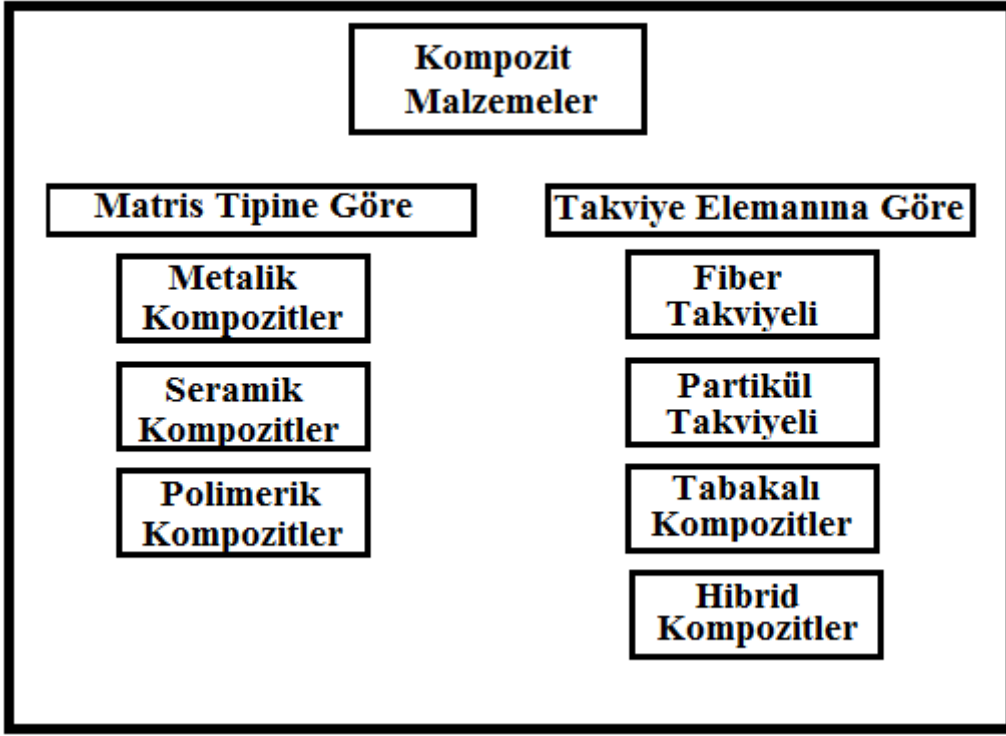
2.1. Kompozit Malzemeler

İmalat endüstrilerindeki hızlı büyüme; malzemelerin mukavemet, sertlik, yoğunluk gibi pek çok özelliklerinin iyileştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Geleneksel olarak kullanılan demir ve demir dışı alaşımlar bu kapsamda pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak özellikle mukavemetin yanında hafifliğinde istendiği pek çok farklı uygulama şartlarında geleneksel malzemelerin kullanılması istenen verimi verememektedir. Bu açıdan farklı özelliklere sahip malzemelerin kimyasal tepkimeye girmeksizin fiziksel yöntemler ile bir araya getirilmesi sonucu oluşturulan kompozit malzemeler bu alandaki ihtiyaca cevap vermeye aday malzeme grubudur (Rajak ve diğ. 2019b).

Kompozit malzemeler daha öncede ifade edildiği gibi, iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturmuş oldukları yapıya denir(Karger-Kocsis, Mahmood, ve Pegoretti 2015). Burada malzemelerden biri ana yapıyı oluşturur ve matris olarak isimlendirilir. Diğer malzemelere ise dolgu malzemesi ya da takviye elemanı olarak adlandırılır (Alabtah, Mahdi, ve Eliyan 2021). Kompozit malzeme doğada pek çok örneği olan önemli bir malzeme alanıdır. Örneğin, günlük hayatta pek çok uygulamada kullanılmış olduğumuz odun, bir kompozit malzemedir. Odunda, lignin matrisi oluştururken, selülöz lifleri dolgu maddesini oluşturur. Selülöz lifleri yüksek çekme mukavemetine sahipken, toklukları düşüktür. Lignin ise fiberleri birleştirerek tokluğu artırır. Kemik başka bir doğal kompozit olup, vücuttaki pek çok parçanın ağırlığını taşır. Kemik kısa ve yumuşak kolejen fiberlerden oluşup, bu fiberler apatite olarak isimlendirilen mineral matrisin içine gömülüdür. İfade edilen doğal kompozitlerin haricinde günlük hayatta kullanılan pek çok başka kompozit malzemelerde vardır. Örneğin kauçuk içerisindeki karbon siyahı, portland çimentosu veya kum ile karıştırılmış asfalt ve reçine içerisinde bulunan cam elyaf günlük uygulamalarda karşımıza çıkan mühendislik kompozit malzemeleridir. Günümüzde özellikle havacılık uygulamalarında, savunma sanayisinde ve uzay sanayilerinden gelen talepler doğrultusunda kompozit malzemelerdeki araştırmalar her geçen gün artmaktadır (Fidan 2011; Panda ve diğ. 2017).

Genel itibariyle kompozit malzemeler bir matris ve bir ya da birkaç tane takviye elemanından oluşurlar. Takviye elemanları parçacık halde, kısa fiber, sürekli fiber ya da tabakalar şeklinde olabilirler. Ancak bununla beraber, kompozitlerde en fazla kullanılan takviye elemanları fiber şeklindedir. Çünkü bu formda kompozit malzemeler daha mukavemetli ve toklukları da yüksektir. Kompozit malzemelerdeki fiberler, ana (matris) malzemelerden daha mukavemetlidir. Malzeme içerisindeki boşlukların olasılığı fiberlerin boyutlarının küçülmesi ile birlikte azalır. Cam, karbon, aramid gibi en fazla kullanılan takviye fiberlerinin sertlik ve mukavemetleri, matris olarak kullanılan polimerik malzemelerden belirgin şekilde daha yüksektir. Bilimsel çevrelerce, takviye edici fiberler pek çok çalışmada inorganik ve organik olanlar olarak iki grupta kategorize edilirler. Yüksek mukavemetli inorganik fiberler arasında cam, karbon ve seramik fiberler örnek olarak verilebilir. Kompozit malzemelerde matris bileşeninin ana görevi, yapıyı bir arada tutarak, mekanik yükleri fiberlere aktararak gerilmeleri dağıtmaktır. Matris ayrıca fiberli takviyenin çevreden korunmasından sorumludur ve fiberlerin gerekli konumlandırılmasını sağlar (Karger-Kocsis, Mahmood, ve Pegoretti 2015). Fiber/matris ara fazı, "zayıf" matristen "güçlü" fibere ve matris boyunca fiberden fibere gerilme transferine de yardımcı olur. Fiber ve matris arasında farklı fiziko-kimyasal özelliklere sahip sonlu bir ara katman anlamına gelen ara faz terimi 1970'lerde literatüre girmiştir(Holliday ve Robinson 1973). Ara faz, fiber ve matris arasındaki etkileşimleri ve dolayısıyla yapısal kompozitlerin mekanik özellik profilini kontrol eder. Kompozit malzemelerdeki çekme mukavemeti ve elastik modülü gibi mekanik özellikler, esas olarak fiberin çekme özellikleri, hacim oranı, yönelimi (yüklemeye göre) ve uzunluk tarafından kontrol edilir. Kompozit malzeme üretirken mühendislerin dikkate aldıkları bazı genel tasarım kavramları vardır. Örneğin, yüksek sertlik ve mukavemet elde etmek için fiber ve matris arasında güçlü bir bağ tavsiye edilirken, nispeten zayıf bir ara yüzey bağı genellikle darbe koşulları altında enerji soğurma performanslarını yani tokluğu artırmak için istenir (Karger-Kocsis, Mahmood, ve Pegoretti 2015; Das, Ghosh, ve Das 2019).

Kompozit malzemeler matris malzemesinde göre Şekil 2.1'de gösterildiği gibi metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler ve polimer matris kompozitler olarak üç kategoride takviye elemanına göre ise fiber takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve dolgu kompozitleri olarak dört kategoride sınıflandırılırlar (Miyazaki 2016).



Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

2.2. Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemeler

2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Metal matris kompozit malzemeler, matris kısmın metal ya da alaşımın olduğu takviye elemanının ise parçacık, kısa lif ya da visker olduğu sistemlerdir. Pek çok metal ya da alaşımları matris malzeme olarak kullanılabilir. Bunlardan en yaygın olanları alüminyum alaşımlarının olduğu matrislerdir. Alüminyum alaşımlarının özgül mukavemetlerinin yüksek olması, korozyon dayanımlarının iyi olması gibi özellikleri sebebiyle pek çok alanda kullanılmaktadır (Zeren ve Yamaoğlu, 2018). Özellikle hafifliğin ön planda olduğu havacılık endüstrisinde alüminyum alaşımlarının kullanılma oranlarının artırılması arzu edilmektedir. Yine bu kapsamda titanyum ve titanyum alaşımları matris malzemesi olarak kullanılarak çeşitli kompozit malzemelerin geliştirilmesine devam edilmektedir. Aynı perspektifte, magnezyum ve alaşımları bu kapsamda için en fazla araştırılan matris malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır (Rahman ve diğ. 2017; Fu ve diğ. 2020; Morita 1995; Vijaya Ramnath ve diğ. 2021).

2.2.2. Seramikli Matris Kompozitler

Seramik malzemeler yüksek mukavemet ve yüksek sıcaklıklarda yüksek katılık, kimyasal olarak soy olmaları ve düşük yoğunluğa sahip olmaları gibi özelliklerinden dolayı araştırmacıların dikkatini çekmektedirler. Ancak bununla beraber seramik malzemelerin en zayıf özelliği darbe dayanımlarının çok düşük olmasıdır (Konopka 2015). Bu nedenle seramikler yüzey ve hacimsel kusurlar karşısında çok dayanıksızdırlar. Buna ek olarak seramiklerin termal şok dayanımları da çok düşüktür. Bu nedenle fabrikasyon aşamasında ya da servis şartlarında kolaylıkla kırılabilirler. Bu nedenle seramik malzemelere çeşitli takviye elemanları eklenerek kompozit bir yapı oluşturup bahsedilen eksiklikleri giderilmeye çalışılmaktadır (Wolf 2000; Samal ve Lanka 2012; Butler ve Fuller Jr. 2000; Bauer, Stewart, ve Stenzenberger 2000). Elde edilmesi istenen yüksek tokluk ve mukavemet özellikleri kullanılan takviye elemanlarının boyutlarına ve dağılımına bağlıdır. Özellikle nano boyutlu metal parçacıkların seramik bir matrise eklenmesi tokluğu önemli ölçüde artırabilir. Burada diğer önemli husus metal partiküller ve seramik matris arasındaki bağın gücüdür (Konopka 2015). Seramik matris kompozitler otomotiv uygulamalarında, gaz türbinlerinde, nükleer santrallerde ve uçak fren sistemleri gibi pek çok alanda tercih edilmektedirler (Chawla 1993; Abraham 1992).

2.2.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Son yıllarda, çeşitli uygulama alanları için polimerik malzemelerin geleneksel malzemelerin yerini devraldığını görülmektedir. Bu, polimerlerin geleneksel malzemelere göre daha avantajlı özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Polimerlerden elde edilen başlıca faydalar, kolay işleme, yüksek verimlilik ve düşük üretim maliyetidir. Yapısal uygulamalar için takviye malzemelerinin ticari örnekleri arasında cam fiber veya epoksi, fenolik ve polyeşter reçine gibi karbon fiber ile güçlendirilmiş ısıyla sertleşen polimer matrisi yer alır. Bu sentetik fiberler arasında karbon fiber, yapısal uygulamalar için dolgu maddesi olarak en yaygın kullanılan ikinci fiberdir (Das, Ghosh, ve Das 2019).

Polimer malzemeler diğer malzeme grupları ile karşılaştırıldığında daha düşük mukavemet değerlerine sahip olmak ile birlikte, göreceli olarak ucuz olmaları, hafif olmaları ve üretim ve işlenebilme kabiliyetlerinin nispeten kolay olmaları gibi dikkate değer özelliklere sahiplerdir (Matabola ve diğ. 2009; Boggarapu, Gujjala, ve Ojha 2020;

Mouritz ve diğ. 2001). Bunun sonucunda sanayi uygulamalarında pek çok metalik makine elemanlarının yerini polimer matrisli kompozit malzemeler almaktadır(Sajan ve Philip Selvaraj 2021). Özellikle hafifliğin istendiği uygulamalar olan otomotiv sanayisi ve havacılık gibi alanlarda pek çok polimer matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Devaraju ve Alagar 2021). Polimer matrisli kompozitler genel olarak üçe ayrılırlar. Bunlar termoset, termoplastik ve elastomerlerdir (Wolf 2000; Bauer, Stewart, ve Stenzenberger 2000).

2.2.3.1. Termoset Matris Malzemeleri

Termoset reçineler, geri dönüşümsüz olarak kürlenene ve genellikle sıvı halde bulunan polimer malzemelerdir. Sertleştirme, ısı uygulanarak veya kimyasal reaksiyon veya kızılötesi ışık, ultraviyole ışık veya bir elektron ışını ile ışınlama yoluyla gerçekleştirilebilir. Sertleştikten sonra reçineler tekrar ısıtılamaz ve sıvı formlarına geri eritilemez. Termoset reçinelerin işlenmesi ve laminatlanması kolaydır ve oluşumları için basınç veya ısıya ihtiyaç duyulmaz. Ayrıca, genellikle ucuzdurlar, termoplastiklerden daha güçlüdürler ve termoplastiklerden daha yüksek sıcaklıklara daha uygundurlar. Bununla birlikte, termoplastiklerden daha kırılındırlar (Lee ve Park 2013). Termoset polimerler birbirlerine çapraz bağlar ile bağlı olan polimerlerdir. Yaygın kullanılan termoset matris malzemeleri polyester ve epoksi reçineleridir. Epoksi reçineleri yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine sahiptir. Bu özellikleri yüksek çapraz bağlara sahip olmaları ile ilişkilidir. Epoksi reçineleri ayrıca kürlenme esnasında düşük seviyede çökme sağladığından dolayı düşük kalıntı gerilmeler meydana getirir (Dong ve diğ. 2021). Termoset kompozit malzemeler yüksek elastik modül değerleri ve mukavemet değeri gösterdiğinden ve aynı zamanda düşük viskoz olmaları ile birlikte oda sıcaklığında kolay imal edilebilmeleri nedenleriyle ileri mühendislik uygulama alanlarında tercih edilmektedir (Dong ve diğ. 2021). Bununla birlikte, ısıyla sertleşen reçineler, kürlenme işleminden geçtikten sonra geri dönüştürülemez veya onarılamazlar ve bu nedenle, geri dönüştürülebilir değildirler. Bu kompozitler aşırı ısıya maruz kaldıklarında bozunmadan önce kimyasal bozunmaya uğrarlar ve bir miktar termal stabiliteye sahip olsalar da reçineler 170-180°C civarında bozdukları için çok yüksek sıcaklıklara dayanamazlar (Jogur ve diğ. 2018).

Termoset reçineler gevrek ve kırılgandır. Pek çok termoset reçineler proses esnasında uçucu bileşikler salar. Bu sebepten dolayı ekstra güvenlik tedbirlerin alınması gerekir. Ayrıca malzemelerin bozulmalarını önleyebilmek için özel saklama koşullarına ihtiyaç vardır (Safonov, Carlone, ve Akhatov 2018).

2.2.3.1.1. Polyester Matrisli Kompozitler

Polyester reçineler, iyi mekanik özellikleri, korozyon direnci, düşük ağırlığı ve düşük maliyeti nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Çekme mukavemetleri 34,5 ila 103,5 MPa arasında değişir. Polyester reçinelerin camsı geçiş sıcaklığı 70 °C ile 120 °C arasında değişir, bu da epoksi reçineden daha düşüktür. Vinil monomerinde (genellikle stiren) çözünmüş doğrusal uzun zincirli polimerlerden oluşurlar. Doymamış polyesterler, doymuş ve doymamış dikarboksilik asitlerin (örneğin sırasıyla ftalik anhidrit ve maleik anhidrit) susuz formlarının kombinasyonlarıdır. Bu asitler, polimer omurgasında ester grubunu üretmek için diollerle reaksiyona girer. Polimer zincirlerindeki doymamışlık bölgeleri reaktiftir ve serbest radikal reaksiyonu yoluyla stiren monomeri ile çapraz bağlanır. Başlatıcı olarak metil etil keton peroksit (MEKP) gibi bir peroksit katalizörü kullanılır. Reaksiyon hızı, reçinede kobalt oktoat gibi bir hızlandırıcı kullanılarak belirli bir sıcaklıkta artırılabilir. Reçinenin sıvı halden katı hale geçmesi için makul bir çalışma süresi olmalıdır. Bu, reçinede kininler veya katekoller gibi inhibitörlerin mevcudiyeti ile elde edilebilir. Sisteme ısı eklenmesi bu çapraz bağlanma reaksiyonunu önemli ölçüde hızlandırır (Eterigho-Ikelegbe, Yoro, ve Bada 2021).

2.2.3.1.2. Epoksi Matrisli Kompozitler

Epoksi reçineler mükemmel mekanik ve kimyasal özelliklere ve korozyon direncine, iyi termal ve boyutsal stabiliteye sahiptir ve laminasyon, yapıştırıcılar, kaplamalar ve gelişmiş kompozit yüzeylerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Uflyand ve Irzhak 2021b; Neto ve diğ. 2022; Uflyand ve Irzhak 2021a).

Epoksi reçineler, kürlenme sırasında düşük büzülme (%1–5) ile nispeten düşük moleküler ağırlığa sahiptir. Kısmen iyileştirilebilirler ve bu durumda saklanabilirler. Kürlenmiş epoksi reçineler, iyi mekanik ve termal özellikler, kimyasallara ve korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Cam geçiş sıcaklıkları 100 °C ila 270 °C arasında değişir. Ancak

polyester reçineye göre daha pahalıdır. Bu reçineler, düşük viskoziteli sıvılardan yüksek moleküler ağırlıklı katılara kadar değişir. Sertleştirici veya sertleştirici, epoksi için temel bileşenlerden biridir. Bu bileşikler reaksiyon hızını kontrol eder ve bitmiş parçanın performans özelliklerini belirler. 4,4'-metilen-dianilin (MDA) ve 4,4'-sülfonildianilin (DDS) gibi aromatik aminler, gelişmiş kompozit endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan sertleştirici maddelerdir (Neto ve diğ. 2022; Uflyand ve Irzhak 2021a).

2.2.3.2. Termoplastik Matris Malzemeleri

Termoplastik reçineler, organik reçine esaslı kompozitlerde matris malzemesi olarak son birkaç yılda büyük ilgi görmüştür. Mısırlıların tuğla oluşturmak için bir kil matrisinde saman takviye maddesi kullandıklarında, ısıyla sertleşen malzemeler 5000 yıl öncesine kadar uzanırken, termoplastik kompozitler nispeten yenidir. Gelişmiş kompozitlerde kullanımları yaygın olmasa da termoplastik kompozitler otomobillerden dayanıklı mallara kadar uzanan ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Wolf 2000).

Termoplastik polimerler genellikle moleküller arasında kimyasal bağ bulunmayan lineer moleküllerdir. Moleküller, Van Der Waals veya hidrojen bağı gibi zayıf ikincil kuvvetler tarafından bir arada tutulur ve bunlar ısı veya basınç uygulanarak kolayca deforme olurlar. Termoplastik reçineler amorf olabilir, bu bazı moleküllerin sıralı bir dizi oluşturduğu yapısız veya yarı kristaldir. Bir malzeme genellikle polimerin %5 kadar azı kristal formdaysa yarı kristal olarak kabul edilir. Yarı kristal reçineler daha yüksek bir modül sergiler, ancak amorf malzemeler daha toktur; amorf malzemeler genellikle daha çözücüdür hassastır ancak daha düşük sıcaklıklarda işlenebilir. Termoplastiğin en önemli avantajlarından biri reçineler, tokluklarıdır, yani, ne yazık ki olmayan yüksek darbe mukavemeti ve kırılma direncidir. Kompozitin özelliklerine lineer olarak çevrilir. Termoplastik polimerlerin diğer avantajları arasında uzun oda sıcaklığında raf ömrü; sonradan şekillendirilebilirlik, yani termal reform; termal kaynak ile onarım kolaylığı veya çözücüler ve kullanım kolaylığı, yani yapışkan değildirler.

Termoplastik reçineler, genellikle çapraz bağı olmayan uzun polimer moleküllerinden oluşur. Reçine tekrar tekrar eritilebilir ve yeniden kullanılabilir. Genellikle, termoplastik kürlendiğinde hiçbir kimyasal (Wolf 2000)l değişiklik meydana gelmez. Termoplastik reçineler genellikle granüller halinde sunulur ve enjeksiyonlu kalıplama, döner kalıplama,

ekstrüzyon, vakumlu kalıplama ve sıkıştırma kalıplama gibi geleneksel kalıplama yöntemleriyle imalata izin vermek için ısıtılır. Termoplastik reçineler yüksek darbe dayanımına sahiptir ve geri dönüştürülebilir. Ayrıca hiçbir emisyon salmazlar ve diğer termoplastiklere bağlanabilirler ve yeniden ısıtma ile kalıplanabilir veya şekillendirilebilirler (Lee ve Park 2013).

Termoplastik kompozitler, termoset kompozitlere kıyasla daha yüksek işlenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlar vardır. Ayrıca mükemmel kimyasal dirence ve darbe dayanımına sahiptirler. Genel olarak termoplastik matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kısa lifler ve sürekli lifler olmak üzere iki tip lif kullanılmaktadır. Son yıllarda enjeksiyon kalıplama ile büyük miktarlarda kısa elyaf takviyeli termoplastik kompozitler üretilmiştir. Bununla birlikte, takviye malzemesi olarak kısa lifler kullanılırsa, mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde belirli bir sınırlama vardır. Bu, esas olarak liflerin oryantasyonu ve hacim oranı dağılımlarının kontrolündeki zorluklardan kaynaklanmaktadır. Öte yandan, anizotropik mekanik özelliklerin kontrolü, genellikle filament sarma yöntemiyle veya prepreglerin laminasyonu ile üretilen sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde daha doğru bir şekilde gerçekleştirilebilir (Furuta ve diğ. 1998).

Termoplastik kompozitler, termoset kompozitler ile karşılaştırıldıklarında dikkate değer avantajlara sahiptirler. Matris elemanı olarak toklukları yüksek olduğundan dolayı daha yüksek darbe dirençleri vardır. Üretim döngüleri termosetlere göre daha kısadır. Özellikle termosetler kütleme adımına ihtiyaç duyarlar. Bu adım zaman alan bir süreçtir. Bunun yanında termoplastik kompozitler kaynak edilebilir (Stavrov ve Bersee 2005) ve geri dönüşüm işlemine sokulabilir (Steenkamer ve Sullivan 1998) bir malzeme grubudur (van Rijswijk ve Bersee 2007). Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda yumuşamaya başlarlar. En fazla kullanılan termoplastik polimerler poliamid, polietilen, polipropilen, poli vinil klorid ve polikarbonatlardır. Termosetlerden farklı olarak, termoplastik polimerler kütleme çevrimine göre anizotropik karakter gösterebilir.

Termoplastik matris kompozitlerin en önemli dezavantajları yüksek işlem sıcaklığına ihtiyaçları olmaları ve ek olarak işlem sonrasında malzeme içerisindeki muhtemel istenmeyen boşluklardır. Diğer dezavantaj, termoplastik reçinenin yüksek erime viskozitesi nedeniyle, elyaf üzerine empenye etmek zordur, bu nedenle, termoplastik

kompozitlerin uygulamasını genişletmenin en büyük sorunu reçine matrisinin elyafa tam empenyesinin nasıl çözüleceğidir (Liu, Wang, ve Li 2021).

2.2.3.2.1. Polipropilen (PP) Bazlı Kompozitler

Pek çok termoplastik polimer arasında, orta ila iyi mekanik özellikleri nedeniyle polipropilen en yaygın kullanılan malzemelerin başında gelmektedir. Bu nedenle, doğal elyaf takviyeli kompozitlerin hazırlanmasında matris malzemesi olarak en fazla tercih edilen matris malzemesidir. Bu malzemeler orta boyutsal stabiliteye, yüksek termal deformasyon sıcaklığına ve alev direncine sahiptir. Bu malzemelerin geri dönüştürülebilir olması, tek kullanımlık atıkları azaltmaya olanak sağlamasında dolayısıyla ekonomiye ve çevreye önemli avantaj sağlamaktadır. Geri kazanılan polipropilen, kompozitlere ve doğal polipropilene göre yüksek boyutsal stabilite ile daha yüksek yoğunluk, daha düşük gözeneklilik ve su emme özelliği göstermektedir. Bunun sonucu olarak elde edilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri dikkate değer oranda artmaktadır. Polipropilen bazlı kompozit malzemeler, polipropilen ile karşılaştırıldığında daha yüksek eğilme mukavemeti göstermektedir. Polipropilen takviyeli hindistan cevizi liflerine dayalı tek yönlü kompozitlerin çekme mukavemeti, gerilme modülü ve darbe mukavemeti gibi mekanik özellikleri, lif oranının artmasıyla arttığını bildirmiştir. Ağırılıkça %30'a kadar takviye edilen kompozit, ideal bir dizi mekanik özelliklere sahiptir (Dutra ve diğ. 2000; Chuai ve diğ. 2001; Arencon ve Velasco 2009; Dike ve Mindivan 2013; Yeh, Kim, ve Gupta 2013).

2.2.3.2.2. Polietilen (PE)

Polietilen (PE), tokluk, sıfıra yakın nem emme, mükemmel kimyasal inertlik, düşük sürtünme katsayısı, işleme kolaylığı ve düşük elektrik iletkenliği gibi kullanılabilecek iyi özelliklerinden dolayı dünyada en yaygın kullanılan termoplastiklerden biridir. Polietilen, borular, levhalar, kaplar ve diğer ürünler gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Polietilen, çok düşük elektrik iletkenliği nedeniyle tel ve kablo uygulamaları için elektrik yalıtım malzemesi olarak kullanılır. PE'nin mekanik ve fiziksel özellikleri, dallanmanın kapsamı ve türü, kristal yapısı ve moleküler ağırlığa bağlıdır (Huang ve diğ. 2007).

Matris olarak PE içeren yeni kompozitler, tek başına polimere kıyasla daha iyi mekanik ve fiziksel özelliklere sahip birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Polietilen kompozitler paketleme, elektrik, termal enerji depolama, otomotiv uygulamaları, biyomedikal ve uzay uygulamalarında kullanılabilir (Huang ve diğ. 2007).

2.2.3.2.3. Polikarbonatlar (PC) Bazlı Kompozitler

Polikarbonat (PC), kimyasal yapılarında karbonat grupları içeren bir termoplastik polimer grubudur. Polikarbonat, mukavemet gerektiren mühendislik uygulamalarında ve ayrıca şeffaflık gerektiren uygulamalarda kullanılır. Polikarbonatların kalıplanması ve ısıyla şekillendirilmesi kolaydır. Polikarbonat kaplı liflerin nem içeriği, kaplanmamış liflerden daha düşüktür. Bu malzemelerin diğere önemli özellikleri; mükemmel tokluk, yüksek termal direnç, cam benzeri berraklık ve polimer kompozitin iyi işlenebilirliği şeklinde sıralanabilir (Antonioli ve diğ. 2015; Jang 2018; Dios ve diğ. 2020; Liu ve diğ. 2021).

PVC, doğal liflerle sıkıştırılabilirliği, daha az maliyeti, dayanıklılığı, kimyasallara ve alev dayanıklılığı nedeniyle yapı inşa etmek ve diğere inşaat işlerinde tercih edilen bir polimer malzemedir (Huang ve diğ. 2007). Hindistan cevizi lifi dolgulu polivinil klorür/akrilonitril stiren akrilat karışımları, lif içeriği değişmediğinde ahşap-PVC kompozitlerinden daha yüksek darbe mukavemetine ve termal özelliklere sahiptir (Islam ve diğ. 2011; Cheng 2013; Ahmad, Kausar, ve Muhammad 2016; Bendjaouahdou ve Aidaoui 2021).

2.2.3.2.4. Polietereterketon (PEEK)

Polietereterketon (PEEK), en popüler yüksek performanslı mühendislik termoplastik polimerlerinden biridir. PEEK, ısı direnci, biyoyumluluğu, kimyasal direnci ve aşınma direnci nedeniyle uçak, otomotiv ve biyomedikal uygulamalarda kullanılabilir. Ek olarak, PEEK radyolüsenttir ve tıbbi görüntüleme teknikleri için uygundur. Biyomedikal uygulamalarda karbon fiber takviyeli PEEK pekçok çalışmada kullanılmıştır (Yenilmez ve Mutlu 2021).

2.2.3.2.5. Poliamidler

Poliamidler, kompozit endüstrisinde yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılan nispeten yeni malzeme sınıfıdır. Poliamidlerin cam geçiş sıcaklığı 320 °C ile 330 °C arasında değişmektedir. Bu reçinelerin termal stabilitesi ve aleve karşı direnci epoksi reçinelerinden daha iyidir. Poliamid esaslı kompozitler, olumsuz çevre koşullarında mükemmel mukavemet muhafazasına sahiptir, ancak kopma uzaması çok düşük ve kırılğındırlar (Bhattacharyya, Maitrot, ve Fakirov 2009; Krause ve diğ. 2019; Kracalik, Laske, ve Holzer 2010).

2.3. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

2.3.1. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Bu tip kompozit malzemelerde matris malzeme fiberler ile takviye edilmiştir. Takviye elemanı olarak kullanılan fiberler uzunluklarına göre; uzun fiber takviyeli kompozitler (sürekli), kısa fiber takviyeli kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca kullanılan fiberler naylon fiberler gibi polimer lifler veya çelik tel ve bakır tel gibi metal fiberler veya cam fiberler gibi seramik fiberler şeklinde olabilir. Matris içerisindeki fiberlerin yönü tek yönlü veya rastgele dağılım şeklinde de olabilir. Fiberler matris malzemesinden daha yüksek mekanik dirence ve elastikiyet katsayısına sahiptir. Polimer matrisin, kompozit malzemelerdeki işlevi, takviyeleri bir arada tutmak, yükü aktarmak, yükleri eşit olarak dağıtmak, tabakalar arası kaymayı taşımak ve fiberlerin farklı çevresel koşullarla doğrudan temasını önlemektir(Huang ve diğ. 2021).

Kompozit malzemeler için kullanılan fiberler kaynağına göre doğal ve sentetik fiberler olarak sınıflandırılır (Jin, Lee, ve Park 2013; Liang ve Hota 2013; Agrawal, Singh, ve Sarkar 2014; Sathishkumar, Naveen, ve Satheeshkumar 2014; Rajak ve diğ. 2019a; Morampudi ve diğ. 2020). Kimyasal sentez yoluyla üretilen insan yapımı fiberlere sentetik fiberler denir ve içeriklerine göre organik veya inorganik olarak sınıflandırılır.

En fazla kullanılan sentetik fiberlerden biri cam fiberler, mükemmel mukavemet ve dayanıklılık, termal kararlılık, darbeye direnç, kimyasal, sürtünme ve aşınma özellikleri sundukları için tüm sentetik elyaflar arasında en yaygın şekilde kullanılır. Bununla birlikte, cam fiber takviyeli polimerlerin işlenmesi nispeten yavaştır, zordur ve geleneksel

işleme sistemlerinde çalışırken daha kısa takım ömrü gösterir (Da Silva ve diğ. 2008; Jawaid ve Khalil 2011; Begum, Fawzia, ve Hashmi 2020; Gupta, Ramesh, ve Thomas 2021).

Doğal fiberler ise doğal yollar ile elde edilen malzemeler olup, elde edilmesi daha kolay, doğada yaygın olarak bulunan fiber malzemelerdir. Biyobozunurluk, birim hacim başına düşük maliyet, yüksek mukavemet ve spesifik sertlik gibi bazı olağanüstü malzeme özelliklerine sahiplerdir. Doğal fiber takviyelerinden yapılan kompozitler, sentetik fiberlere göre azaltılmış ağırlık, maliyet, toksisite, çevre kirliliği ve geri dönüştürülebilirlik gibi bazı çeşitli avantajlara sahiplerdir. Doğal fiber kompozitlerin bu ekonomik ve çevresel faydaları, onları modern uygulamalar için sentetik fiber takviyeli kompozitlere göre daha tercih edilebilirlik yapmaktadır (Da Silva ve diğ. 2008; Begum, Fawzia, ve Hashmi 2020).

Fiberler ayrıca kısa fiber ve uzun fiber olarak ta sınıflandırılmaktadırlar. Kısa fiberler bilim çevrelerince boyu birkaç milimetreden daha kısa olan takviye malzemeleri olarak tanımlanırlar. Bu tarz fiber malzemelere çoğunlukla polimer matrisli kompozit malzeme üretilirken kullanılırlar. Bu şekilde üretilmiş malzemeye kısa fiber takviyeli kompozit malzeme denmektedir. Sanayine özellikle otomotiv sektöründe, dayanıklı tüketici aletleri, elektrik ekipmanları gibi pek çok sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu kadar yaygın bir şekilde kullanılmalarının başlıca sebepleri maliyetlerinin düşük olması, işlenebilirliğinin kolay olması ve mekanik özelliklerinin -özellikle polimer malzemelerin matris elemanı olarak kullanıldığı durumlarda yüksek- olmasıdır. Kısa fiber takviyeli kompozit malzemeler bilim çevrelerince oldukça yoğun ilgi çekmektedir. Bu şekilde hazırlanmış kompozit malzemelerin özellikleri özellikle takviye elemanı olan kısa fiberlerin cinsi, miktarı, boyut-çap oranı gibi pek çok parametreden etkilenmektedir. Araştırmalar kısa fiberlerin termoplastik polimer malzemelere eklenmesi sonucunda mekanik özelliklerinin önemli oranda iyileştiğini ortaya çıkarmıştır. Ancak bazı çalışmalarda kısa fiber malzemelerin, polimerik malzemelerin tokluğunu düşürdüğü ifade edilmiştir. Örneğin bir çalışmada polikarbonat matris içerisine kısa cam fiberlerin eklenmesi ile kompozitin mukavemetin artmasına rağmen kırılma tokluğunun düşürdüğü ifade edilmiştir (Ho, Hwang, ve Doong 1996).

Uzun fiberler boyu kritik bir uzunluktan büyük olan takviye elemanlarıdır. Uzun fiberler ile takviye edilmiş polimer matrisler yüksek darbe dayanımı, korozyon direnci ve özgül mukavemet değerleri nedeniyle pek çok alanda kullanılmaktadır. Kısa fiberler ile karşılaştırıldıklarında, uzun fiberler pek çok önemli daha iyi mekanik özellikler sunarlar. Bu alandaki araştırmalar artan bir ivme ile devam etmektedir.

2.3.2. Partikül Takviyeli Polimer Kompozitler

Partikül takviyeli polimer matrisli kompozitler, polimer matris fazına gömülü partikül dolgu fazından oluşan malzeme sınıfıdır. Bu, organik ve inorganik partikül dolgu maddeleri ile birlikte çok çeşitli termosetleri ve termoplastik polimerleri kapsar. Partikül-polimer kompozitlerin mekanik özellikleri, partikül boyutuna, partikül-matris arayüzü yapışmasına ve partikül yüklemesine güçlü bir şekilde bağlıdır. Parçacık boyutunun bu mekanik özellikler üzerinde bariz bir etkisi vardır. Örneğin, daha küçük kalsiyum karbonat parçacıkları, belirli bir parçacık yüklemesinde daha yüksek dolgulu polipropilen kompozitler mukavemeti sağlar (Lau, Gu, ve Hui 2006).

Partikül dolgu malzemeleri genel olarak fonksiyonuna göre takviye elemanı ve yağlayıcı eleman olarak iki kategoride sınıflandırılabilir. Takviye elemanları matristen daha yüksek mukavemet ve elastik modül değerlerine sahiplerdir. Bu şekilde polimer kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmiş olurlar. Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO , SiC gibi pek çok nano parçacık bilimsel araştırmalarda dolgu elemanı olarak kullanılmaktadır (Fu ve diğ. 2008; Unlu, Uzkut, ve Atik 2010; Li ve diğ. 2015; Lebar ve diğ. 2021).

2.3.3. Tabakalı Kompozitler

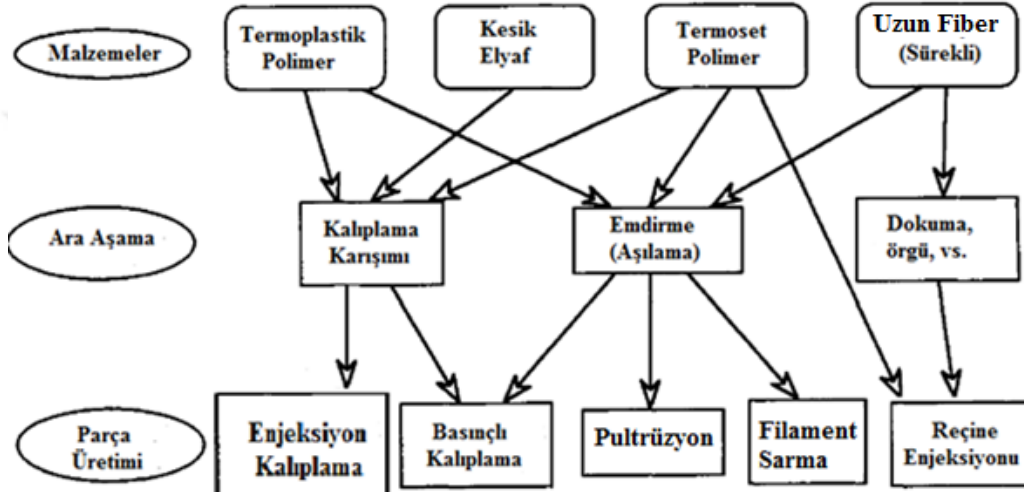
Kompozit malzeme grubu içerisinde çok eski bir kullanım geçmişine sahip tabakalı kompozit malzemeler, ince veya kalın plakalar arasına çeşitli fiber malzemelerin aynı, farklı veya rast gele yönde yerleştirilerek oluşan tabakanın üst üste dizilip uygun yapıştırma metodu sonucunda birleştirilmesi ile imal edilmektedir. Tabakalı kompozit malzemelerde fiberlerin yönü, sayısı ve açısı kompozit malzemenin mukavemet değerlerini önemli oranda etkimektedir. Uygulamada çeşitli özel tipte tabakalı yapılar vardır. Bunlara simetrik, balans, açılı kat, çapraz kat ve yarı izotropik tabakalar örnek olarak verilebilir.

2.3.4. Hibrit Kompozitler

Hibrit kompozitler iki veya daha fazla takviye elemanın matris içine gömülmesi ile elde edilen malzemelerdir(Feng, Malingam, ve Irulappasamy 2019). Hibrit kompozit malzemeler, tek fiber takviyeli malzemeler ile karşılaştırıldığında göstermiş oldukları yüksek performans nedeniyle günümüzde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Bu malzeme grubunda hibridizasyon yoluyla takviye elemanlarından birinin avantajlarının diğer bir takviyenin dezavantajlarını tamamlayabileceği tespit edilmiştir(Jawaid ve Abdul Khalil 2011). Hibrit kompozit malzemesinin mukavemeti fiberin özelliklerine, fiberlerin en boy oranına, fiber uzunluğuna ve yönlenmesine ve fiber matris ara yüzey bağına bağlıdır. Karışım kuralı hibrit malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Hibrit malzemelerin tasarım ve imalatındaki en önemli problem uygun takviye elemanın ve seviyesinin tespitidir. Hibrit kompozitler ticari olarak havacılık, denizcilik ve otomotiv sektörlerindeki yapıların önemli kısımlarında kullanılabilirler.

3. POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Polimer kompozit malzemelerin üretimi için sanayide kullanılan pek çok yöntem vardır. Bu yöntemleri değişik kategorilere ayırmak mümkündür. Genel olarak üç yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, termoset reçinelere lif takviye edilmesinde kullanılan metot, diğer ikisi ise termoplastik kompozit üretilmesinde kullanılan metotlardır. Polimer kompozitlerin üretim aşamalarını içeren şema Şekil 3.1’de verilmektedir(Rajak ve diğ. 2019b; Hull 1996).



Şekil 3.1. Genel olarak polimer kompozit malzemelerin üretim şeması(Hull 1996)

Polimer matrisli kompozit üretiminde mikro yapısal olarak en önemli amaç fiberlerin yeterli ıslatılmaları, düzgün dağıtılmaları ve uygun hızlandırılmalarıdır(Hull 1996).

3.1. Islak Yatırma Yöntemi

Temaslı kalıplama olarak da adlandırılan ıslak yatırma, nispeten basit şekillere sahip teknik parçaların üretimi için kullanılan bir açık kalıp işlemidir. Bir elyaf kumaş tabakası, önceden ince bir ayırıcı madde tabakası ile kaplanmış olan tek taraflı bir erkek veya dişi kalıba elle yerleştirilir. Reçineler, bir rulo yardımıyla elle yayma veya püskürtme ile elyaflara emdirilir. Bu işlem, yapının istenen kalınlığını elde etmek için yeterli donatı katmanı olana kadar tekrarlanır. Elyaf kumaş, elle yerleştirme ve silindire sıkıştırılmadan önce reçine ile önceden ıslatılabilir(Chen 2007). El yatırma işleminde, reçinenin elle çalışabilmesi ve ayrıca liflerin kolayca ıslanmasına yardımcı olması için viskozitesinin düşük olması gerekir. Bu nedenle termoset polimerler, oda sıcaklığında daha düşük viskoziteleri nedeniyle bu işleme yönteminde termoplastik polimerlerden daha uygundur.

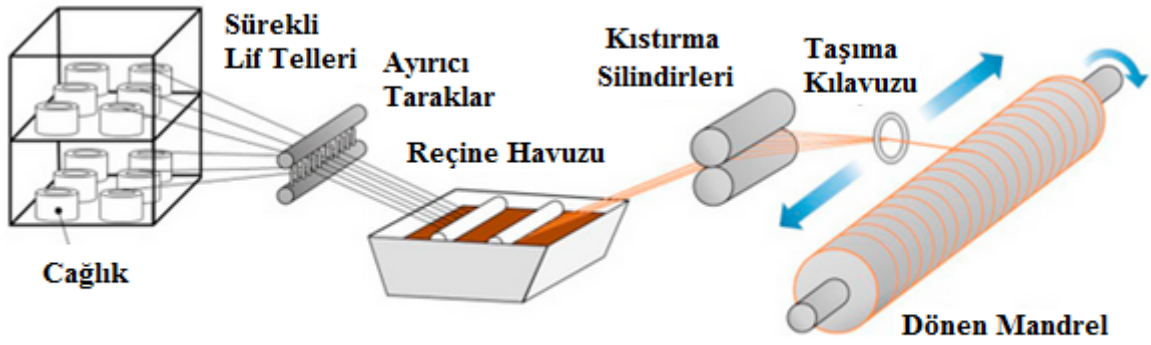
Serilen malzeme standart atmosfer koşulları altında, normal olarak ortam sıcaklığında veya kompozitleri elde etmek için otoklav yöntemiyle kombinasyon halinde kürlenmeye bırakılır. Bu işlemle üretilen kompozit parça, kalıplama işlemleri nedeniyle bir tarafta güzel pürüzsüz bir yüzeye ve diğer tarafta çok pürüzlü bir yüzeye sahip olacaktır. Islak dökmenin tipik uygulamaları arasında standart rüzgar türbini kanatları, üretim tekneleri ve mimari pervazlar bulunur. Bu yöntem, basit ve düşük maliyetlidir. Bu tekniğin en büyük dezavantajı, laminatlarda ürün kalitesini önemli ölçüde düşüren, malzeme içerisindeki hapsolmuş havanın bulunmasıdır. Diğer bir dezavantaj ise yöntemin çok zaman ve emek istemesidir (Chen 2007).

Termoset kompozitlerin hazırlanması için elle yatırma hem küçük hem de büyük takviyeli ürünlerin imalatı için en basit ve en eski kalıplama yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, takviye keçesi veya dokuma kumaş veya fitil, açık kalıba manuel olarak yerleştirilir ve reçine dökülür, fırçalanır veya üzerine püskürtülür ve takviyelerin içine püskürtülür. Laminat yapısını tamamlamak için sıkışan hava, silecekler veya silindirler ile manuel olarak çıkarılır. Oda sıcaklığında kürlenmiş polyesterler ve epoksiler en yaygın olarak kullanılan matris reçinelerdir. Sertleştirme, reçine sistemindeki, fiber takviyeli reçine kompozitlerini harici ısı olmadan sertleştiren bir katalizör tarafından başlatılır. El yatırma işlemi ile işlenen bir kompozit numunenin lif içeriği iyi kontrol edilebilir. Kuru kumaşlar önce tartılır, ardından kürlenmiş kompozit tartılır. İşleme sırasında herhangi bir lif kaybı veya kazanımı olmamasına özen gösterilir. Kuru kumaş kütlelerinin kompozit kütleyle oranı, kompozitin lif içeriğidir (Wang 2015).

3.2. Filament Sarma

Filament sarma tekniği, kompozit malzemeler için en eski üretim tekniklerinden biridir. Filament sarımı, sürekli reçine emdirilmiş fitillerin veya monofilamentlerin temiz, iyi kalıptan çıkarılmış ve tasarım mühendisi tarafından önceden belirlenmiş geometrik bir desende dönen mandrel etrafına sarılmasından oluşur. Lifler, sarılmadan önce bir reçine banyosundan geçerek reçineyi alır. Bu nedenle bu işleme ıslak sarım denir. Kuru sarımda, önceden emprenye edilmiş prepregler, yerinde emprenye yerine mandrel üzerinde biriktirilir. Birkaç kat sarıldıktan sonra, bileşen ya oda sıcaklığında ya da bir fırında kürlenir. Daha sonra kürlenmiş kompozit yapı mandrelden çıkarıldıktan sonra nihai ürün elde edilir. Sayısal olarak kontrol edilen modern sarım makineleri, bu işlemi silindirik

yapılarla sınırlı değil, akla gelebilecek hemen hemen her geometrik şekle uygulanabilir kılımlanmaktadır. Termoset polimerler gibi düşük viskoziteli reçineler genellikle filament sarma işleminde kullanılır. Reçine termoplastik bir polimer ise, ısıtma ve sarma ile aynı anda ısı uygulanır. Filament sarılı parçaların mekanik mukavemetini etkileyen işlem parametreleri; kompozit malzemesinin bileşimini, elyaf gerginliğini, dış sıcaklığı, sertleştirme döngüsünü, sarma açısını ve sarma hızını içerir (Korotkov, Chekanov, ve Rozenberg 1993; Minsch ve diğ. 2017).

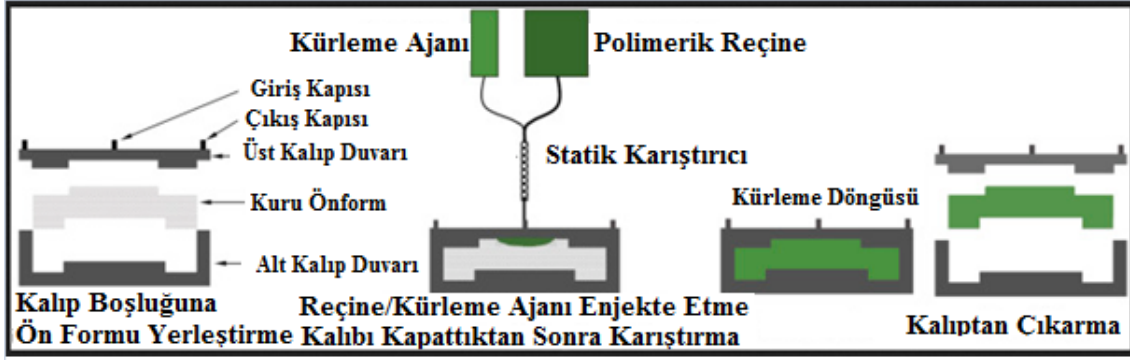


Şekil 3.2. Filament sarma tekniğinin şematik gösterimi (Gonzalez Henriquez ve Mertiny 2018)

Filament sargı geleneksel olarak basınçlı kaplar, borular, roket motoru gövdeleri, tanklar, golf sopası milleri ve dirsekler üretmek için kullanılır. Teknik, fiber yerleştirme ve kompozit katmanların tekdüzeliği için yüksek hızlı ve kesin bir yöntem sağlar. Ancak, ıslak sarım işleminin programlanması zordur ve büyük bileşenler için mandrel maliyetleri yüksek olabilir (Chen 2007).

3.3. Reçine Transfer Kalıplama

Reçine transfer kalıplama işlemi sanayide yaygın olarak kullanılan polimer kompozit imalat yöntemlerinden biridir. Bu işlemde ilk olarak, çok sayıda katmandan oluşan kuru lifli bir ön kalıp, istenen geometriye uyan bir kalıp boşluğuna yerleştirilir. Kalıbın kapatılmasından sonra, polimerik bir reçine bir kürlenme maddesi ile karıştırılır ve daha sonra tekli veya çoklu girişlerden kalıp boşluğuna doldurulur. Enjeksiyon sırasında reçine kalıp boşluğundaki havayı uzaklaştırır ve polimerizasyon başlamadan önce ön kalıbı emdirir. Kürlenme işleminden sonra kalıp açılır ve kompozit parça Şekil 3.3'te görüldüğü gibi kalıptan çıkarılır (Hamidi ve Altan 2018; Meola, Boccardi, ve Carlomagno 2017).



Şekil 3.3. Reçine transfer kalıplama işlem adımlarının şematik gösterimi (Hamidi ve Altan 2018)

RTK, standart otoklav işlemlerinden daha uygun maliyetli olmasına rağmen, bu yöntemi kullanarak PMK parçalarının üretilmesi sıklıkla kusurlara neden olabilir. RTK'nin daha geniş kullanımını sınırlayabilir. Kompozit malzemelerde, çoğu üretim prosesi sırasında, yanlışlıkla imal edilen parçaların istenen özelliklerini değiştiren kusurlar meydana gelir. Bu bölümün odak noktası reçine transfer kalıplı PMK'lerde indüklenen kusurlardır. Bu kusurlar için oluşum mekanizmaları ve karakterizasyon tekniklerinin yanı sıra bunların en aza indirilmesi ve/veya ortadan kaldırılması yöntemlerini anlamak, kompozit endüstrisinde RTK parçalarının daha geniş bir kabulüne ve kullanımına izin verecek gelişmiş prosesler geliştirmenin anahtarıdır.

RTK'nin ana avantajları olarak, kompozit boyutları sadece kalıp şekline bağlıdır, elde edilen kompozitler her iki tarafta da iyi yüzey kalitesine sahiptir ve daha fazla işlem görmeden kullanıma hazırdır. Bu işlem diğerlerinden daha ucuzdur ve popülerlik kazanmaktadır; kapı direkleri, kirişler, sertleştirilmiş paneller, dümen uçları ve nervürler gibi birçok havacılık bileşeni RTK tarafından üretilmektedir (Meola, Boccardi, ve Carlomagno 2017).

3.4. Ekstrüzyon Yöntemi

Extruder, boru, hortum, tel ve kablo gibi eşit kesitli termoplastik parçalar oluşturan çok yönlü bir makinedir. Ekstrüder vidaları, ekstrüde edilen polimerler için tasarlanmıştır. Eritme, sıkıştırma ve ölçüm bölümleri bir vidanın temel bölümleridir. Eritme kısmında katı topaklar haznedan taşınır ve erimiş polimere dönüştürülür. Sıkıştırma bölümünde, erimiş polimer sıkıştırılır ve (gerekirse) katkı maddesi ile karıştırılır. İstenilen ürün

kesitini üretmek için ölçüm bölümüne ihtiyaç vardır. Çift vidalı ekstrüder ve tek vidalı ekstrüder, temel ekstrüder türleridir.

PE kompozitlerin birleştirilmesi için ekstrüzyon işlemi kullanılabilir. Polietilen granüller veya elyaf/dolgulu toz, huniden vidaya beslenir ve daha sonra ısıtılmak üzere varil odası boyunca itilir. İşleme sıcaklığı 190–230°C aralığında olabilir. Karışımlar, ekstrüderin hunisine beslenir, birleştirilir, soğutulur ve granüle edilir. Bileşik numuneler, enjeksiyon kalıplama makinesi veya sıcak pres kalıplama makinesi ile test numuneleri olarak hazırlanır.

3.5. Termoplastiklerin Enjeksiyon Kalıplanması

Bu yöntemde kısa lif ile takviye edilmiş termoplastik malzemeler enjeksiyon kalıplama ile parça üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile kompozit malzeme üretiminde en fazla kullanılan polimerler polipropilen, naylon ve polikarbondur. Bu yöntemde polimer peletler Arşimet vidası bulunan ısıtılmış odaya beslenir.

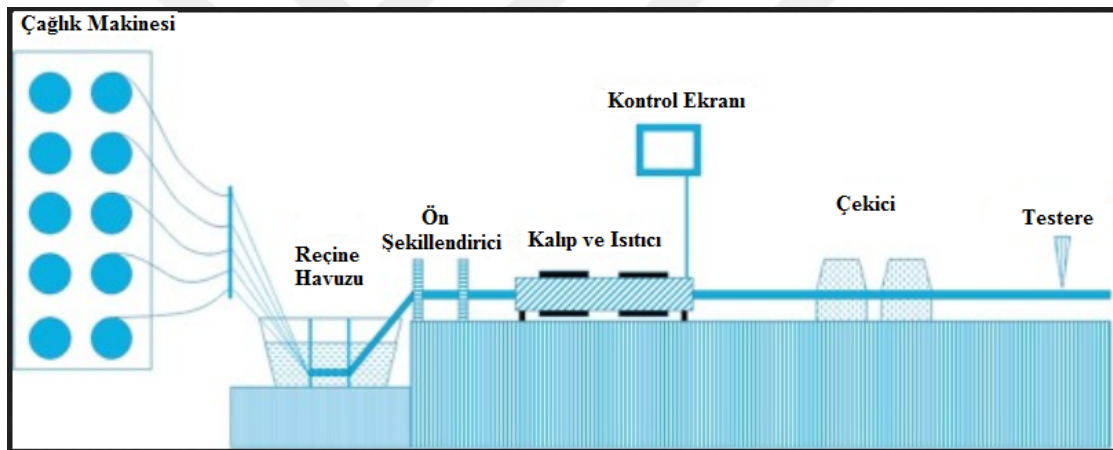
3.6. Pultrüzyon Yöntemi

Bu süreç, 1950'lerde kompozitlerin başlatıcısı olarak kabul edilen Goldsworthy tarafından tasarlandı. Elyaf emdirme ön-formu ve kütleme dahil olmak üzere ham kompozitlerin şekillendirilmiş bir kalıba çekilmesinden oluşur. Daha spesifik olarak, pultrüzyon işlemi, elyaf keçe rulolarını veya elyaf fitil takımlarını tutan raflar veya cağlıklar ile başlar. Ham elyaf raflardan çekilir ve bir reçine emdirme sistemi (bazı pultrüzyon sistemlerinde reçine doğrudan kalıba da enjekte edilebilir) aracılığıyla yönlendirilir ve daha sonra, lifi doğru şekle sokar, fazla reçine ise sıkılır. Son olarak, elde edilen kompozit, bir ekzotermik reaksiyonun reçine matrisini sertleştirdiği ısıtılmış bir çelik kalıptan geçer (Meola, Boccardi, ve Carlomagno 2017).

Bileşen, sürekli olarak çekilir ve genellikle basınçlı hava konveksiyonu ile soğutulan ve daha sonra tercih edilen boyuta kesilen sıcak, sabit kesitli bir parça olarak kalıptan çıkar. Bu işlem, sabit kesitli parçaların yüksek hacimli üretimi için uygun maliyetlidir (Meola, Boccardi, ve Carlomagno 2017).

Pultrüzyon İngilizce pull ile ekstrüzyon kelimelerin bir araya gelmesi ile meydana gelen bir kelimedir. Günümüzde kompozit polimer malzeme üretiminde kullanılan önemli bir

yöntemdir. Pultrüzyon, sabit kesitli polimer kompozit yapılar üretmenin en etkili yöntemlerinden biridir. Pultruded profiller, köprü yapımında, ulaşım endüstrisinde, enerji sektöründe, inşaat ve mimari mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır (Minchenkov ve diğ. 2021). Pultrüzyon esnasında bant şeklindeki fiber takviye elemanı, dokuma kumaşlar ve/veya matlar uygun viskozitedeki reçine havuzuna emdirilir. Ardından, emdirilmiş takviye, fazla reçinenin çıkarıldığı ve takviye paketinin istenen şekli aldığı bir ön şekillendiriciye beslenir. Önceden oluşturulmuş takviye paketi, kürlenme işleminin gerçekleştiği ısıtılmış kalıp bloğundan çekilir. Genellikle, reçine tipine, çekme hızına ve bloğun uzunluğuna bağlı olarak kalıp bloğu boyunca farklı sıcaklıklarda birkaç ısıtma bölgesi kurulur. Kalıp çıkışından sonra, sertleştirilmiş bir pultrüzyon, bir çekirme ünitesi tarafından çekilir ve istenen uzunlukta parçalar halinde kesilir (Safonov, Carlone, ve Akhatov 2018; Minchenkov ve diğ. 2021; Joshi 2012).



Şekil 3.4 Pultrüzyon işleminin şematik gösterimi (Safonov, Carlone, ve Akhatov 2018)

Termoset matrisli kompozit malzemeler için proses hızı 1 m/dakika ikine termoplastik matrisli kompozit malzemeler için proses hızı 60 m/dakika civarındadır. İşlem esnasında proses hızı dikkatli seçilmelidir. Çünkü proses hızı fiberlerin ıslanması ve reçinenin kürlenmesini etkilemektedir. Bunlarda doğal olarak üretilecek kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyecektir (Joshi 2012).

Avantajlar:

Diğer FRP kompozitleri gibi, pultrüzyon ürünleri de yüksek mukavemet-ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci, iyi elektrik yalıtımı ve daha iyi boyutsal kararlılık sergiler. Ek olarak, pultrüzyon, diğer kompozit üretim süreçlerine göre ek avantajlar sunar.

- Özelleştirilebilir ürün uzunluğu: Pultrüzyonun sürekli doğası, cm ile km arasında değişen herhangi bir taşınabilir uzunluğun üretilmesine izin verir.
- Yüksek lif içeriği: Pultrudatlar kürlenirken yeterli gerilim altındadır. Bu, lifleri iyi hizalar ve kompakt, yüksek lif içeriği ve güçlü bir ürün ile sonuçlanır.
- Düşük üretim maliyeti: Optimum lif yerleşimi ve parça performansı gerektiren ürünler üzerinde yapılan çalışmalar, pultrüzyon maliyetinin filament sarımının yaklaşık %41'i ve prepeg elle yatırmanın %26'sı olduğunu göstermiştir.
- Pultrüde kompozitlerin maliyetinin yaklaşık %80-90'ı kullandığı hammaddelerden gelmektedir. Amorti edilmiş makine maliyeti ve pultrüzyon makinelerini çalıştırmak için gereken işçilik, toplam fabrika maliyetlerinin yalnızca küçük bir bölümünü oluşturur.
- İyi üretim hızı: Pultrüzyon son derece otomatikleştirilebilir bir süreç olduğundan, üretim hızı oldukça yüksek olabilir.
- Tutarlı kalite: Daha az insan müdahalesi ile daha fazla otomasyon, pultrüzyonda tek tip bir kalite elde etmeyi mümkün kılar.

Dezavantajlar:

Ancak pultrüzyonun aşağıdaki gibi bazı sınırlamaları da vardır

- Konik ve karmaşık şekiller: Sabit enine kesite sahip pultrudatlar kolaylıkla üretilebilir, ancak konik ve karmaşık şekillerin üretilmesi mümkün değildir.
- Boyutsal doğruluk: Parça boyutları ve toleransları diğer üretim yöntemlerindeki kadar iyi değildir.
- İnce cidarlı parçalar: İnce parçalar üretmek, pultrüzyonda zorlu bir iştir.
- İşleme sorunları: Kalıp tarafında reçine birikmesi, kompozitlerde boşluklar ve kabarcık oluşumu, düzgün olmayan küreleşme vb. gibi birkaç işlem zorluğu, pultrüzyonda zaman zaman ortaya çıkar (Joshi 2012).

4. TRIBOLOJİ, SÜRTÜNME VE AŞINMA

"Triboloji" kelimesi 1960'larda sürtünme yüzeylerinin bilimi ve mühendisliği olarak tanıtıldı. Sürtünme, aşınma ve yağlama ilkelerinin incelenmesini ve uygulanmasını içerir. Bu nedenle triboloji, doğası gereği çok disiplinlidir ve diğer disiplinler arasında fizik, kimya ve malzeme mekaniği ile yakından ilişkilidir. Son yıllarda, tribolojideki araştırmalar, örneğin otomotiv endüstrisi gibi endüstrinin her sektörüne uygulanmasıyla teorik ve deneysel açıdan oldukça ileri bir aşamaya ulaşmıştır: her otomobil yaklaşık 2000 tribolojik bağlantı sunar. Triboloji, izafi hareket halindeki yüzeylerin ve ilgili konuların ve uygulamaların bilim ve teknolojisi olarak tanımlanır; sürtünme, yağlama ve aşınmanın her yönü ile ilgilenir (Williams 2005a; Friedrich, Lu, ve Hager 1995; Echávarri, de la Guerra, ve Chacón 2015).

Sürtünme ve aşınma günlük hayatta daima karşılaştığımız kavramlardır. Pek çok endüstriyel alanda kullanılan malzemelerin ömürleri gösterdikleri sürtünme ve aşınma özelliklerine bağlıdır. Sürtünme ve aşınma ile ilgili yapılan çalışmalar çok eski zamanlara kadar gitmektedir. Ancak malzemelerin gösterdikleri sürtünme ve aşınma davranışlarının ardında yatan esas mekanizmalar son yıllarda geliştirilen SEM, TEM ve XRD gibi Karakterizasyon cihazlarının çalışmalarda kullanılmasıyla aydınlanmaya başlamıştır (Luo 2018).

4.1. Sürtünme

Sürtünme günlük hayatta her alanda gözlemlenen yaygın bir kavramdır. Bazı uygulamalarda arzu edilirken, çoğu diğer uygulamalarda ise istenmeyen bir durumdur. Örneğin, yeni deri ayakkabılarla düz bir yüzeyde veya eğimli düz bir yüzeyde yürürken belirli seviyelere kadar sürtünme arzu edilir. Öte yandan, kayakla kar üzerinde kayma sporunu gerçekleştirebilmek için ise, kayak ve kar arasındaki sürtünmenin düşük olması istenir. Aynı şekilde sanayideki pek çok uygulamada, enerji verimliliğini artırmak ve yakıt tüketimini azaltmak için düşük sürtünme istenmektedir. Diğer taraftan otomotiv araçlarında, aracı durdurmak için fren ve disk arasındaki sürtünmenin yüksek olması arzu edilir (Srivastava 2014).

Tarihte, Leonard da Vinci, sürtünme katsayısı kavramını ilk ortaya atan kişidir ve bunu sürtünme kuvvetinin normal yüke oranı olarak tanımlamıştır (Gao ve diğ. 2004). G.

Amontons ise, birbirine göre izafi hareket halindeki iki kayan yağlanmamış yüzey üzerinde çalışırken, sürtünme kuvvetinin normal yük ile orantılı olduğunu ve temas alanına bağlı olmadığını ileri sürmüştür (Srivastava 2014).

Günümüzde yaygın olarak, birbiriyle temas halindeki malzemelerin harekete karşı göstermiş oldukları direnç sürtünme olarak kabul edilmektedir. Burada "sürtünme" kuvveti, Newton'un tanımındaki, bir cisme dışarıdan etki eden ve onun hızlanmasına neden olan geleneksel uygulanan kuvvetten farklıdır. Yani sürtünme kuvveti, bir cisme etki eden bağımsız bir dış kuvvet değil, dışarıdan uygulanan kuvvete karşı gelen bir iç kuvvet olarak ifade edilmektedir (Gao ve diğ. 2004). İki çeşit sürtünme vardır. Bunlar statik ve kinematik sürtünmedir. Statik sürtünme malzemenin durağan halde kalmasını sağlayan maksimum sürtünmedir. Kinematik sürtünme birbiri ile temas halindeki malzemelerin harekete başladıktan sonra harekete karşı göstermiş oldukları dirence denir. Statik sürtünme genellikle kinetik sürtünmeden daha yüksektir (Srivastava 2014). Sürtünme kanunları Amontons tarafından maddelendirilmiştir. Bunlar;

- Sürtünme kuvveti yük ile doğru orantılıdır.
- Sürtünme katsayısı temas alanından bağımsızdır.
- Statik sürtünme katsayısı kinetik sürtünme katsayısından daha büyük değerdedir.
- Sürtünme katsayısı kayma hızından bağımsızdır (Wakelin 1974; Rigney 1988; Gale ve Totemeier 2004; Williams 2005b; Gao ve diğ. 2004).

Amontons yasasındaki tüm terimler makroskopik, yani uzay ve zaman ortalamalı veya "ortalama alan" değerlerine atıfta bulunur. Bu nedenle temas alanı, moleküler seviyedeki "gerçek" temas alanından ziyade "görünen" veya yansıtılan geometrik alandır. Kayma hızı V , kayan cisimlerin ortalama bağıl hızıdır (Gao ve diğ. 2004). Bu "yasalar", basitlikleri ve dikkate değer ölçüde yaygın uygulanabilirlikleri nedeniyle kullanılmaya devam etmektedir, ancak fiziksel kökenlerinin kapsamlı bir açıklaması henüz yapılamamıştır. Pratikte, sürtünme katsayısının, fiziksel tabanlı bir modelden tahmin edilmek yerine, deneysel olarak (bazı masraflarla) ölçülmektedir (Mulvihill ve diğ. 2011).

Malzemelerin sürtünme davranışlarına basınç, sıcaklık, yüzey kalitesi, yağlama vb. dâhil olmak üzere pek çok parametre etki etmektedir (Echávarri, de la Guerra, ve Chacón 2015).

4.2. Aşınma

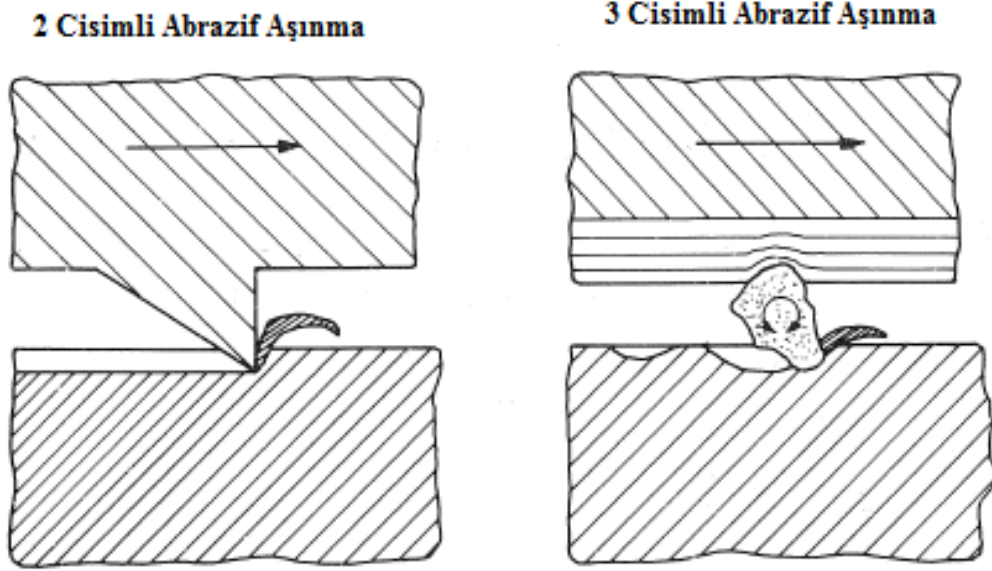
Aşınma, birbiriyle temas halinde çalışan parçalarda izafi hareketin bir sonucu olarak bir bileşenin yüzeyinde meydana gelen, malzeme kaybını içeren bir hasar çeşididir (Rigney 1988). Çoğu tribolojik çift, iki yüzeyin birbirine kuru olarak sürtünmesine izin verilirse ortaya çıkacak aşırı aşınma ve hasarı önlemek için bir yağlayıcı ile sağlanır ve bu, onların harekete karşı sürtünme direncini azaltır. Aşınmanın ekonomik sonuçları yaygın ve yaygındır; bunlar sadece yedek parça maliyetlerini değil, aynı zamanda makinenin arıza süresi, üretim kaybı ve bunun sonucunda iş fırsatlarının kaybıyla ilgili masrafları da içerir. Bir diğer önemli faktör, hem düşük performans hem de artan enerji tüketimine yol açabilen aşınmış tesis ve ekipmanın azalan verimliliği olabilir (Williams 2005b).

Aşınma malzeme yüzeyinde meydana gelen arzu edilmeyen bir hasar mekanizmasıdır. Aşınma izafi hareket halindeki makine elemanlarında, temas yüzeylerinde fiziksel ve kimyasal etkileşimler sonucunda kademeli malzeme kaybı olarak tanımlanabilir (Wakelin 1974; Rigney 1988).

Sünek malzemelerde ise aşınma izi herhangi bir aşınma parçaçığı olmadan, malzemenin yer değiştirmesi ile meydana gelebilir (Rigney 1988). Malzemelerin aşınma davranışına pek çok parametre etki etmektedir. Bu parametrelerden önemli olanlarına örnek normal yük, kayma hızı, ortam sıcaklığı, kayma mesafesi ve ortam cinsi (normal atmosfer, vakum, argon gazı) verilebilir. Bu parametrelerden birinin veya birkaç tanesinin değiştirilmesi aşınma miktarında önemli değişikliklere sebebiyet verebilir (Wakelin 1974; Zum Gahr 1987; Rigney 1988; Srivastava 2014) .

4.2.1. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma birbiri ile temas eden yüzeylerde meydana gelen önemli bir aşınma mekanizmasıdır. Abrazif aşınma temas halinde ve karşı yönlerde hareket eden yüzeylerin pürüzlerinde ya da parçacıkların zıt yönde hareket eden yüzeyler arasında girmesi sonucunda meydana gelir. Abrazif aşınma türünde sert parçacıklar yüzeye girerek kazıma şeklinde yumuşak olan yüzeyden malzeme koparır (Unal, Sen, ve Mimaroglu 2007). İki cisim ve üç cisimli abrazif aşınmanın şematik görünümü aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.1. İki cisim ve üç cisim abrazif aşınmanın şematik resmi (Zum Gahr 1987)

Abrazif aşınma mekanizması ile makine parçalarında meydana gelen istenmeyen malzeme kaybını etkileyen bir dizi faktör vardır. Yaygın olarak tanımlanmış üç aşındırıcı aşınma mekanizması şunlardır: kazıma (plowing), kesme (cutting) ve parçalanma. Kazıma, malzeme yana, aşınma parçacıklarından uzaklaştığında, doğrudan malzeme çıkarmayı içermeyen olukların oluşumuna neden olur.

Yer değiştirmiş malzeme, aşındırıcı parçacıkların sonraki geçişi ile çıkarılabilecek oluklara bitişik sıralar oluşturur. Kesme, malzeme yüzeyden birincil döküntü formunda veya mikroçipler biçiminde, olukların kenarlarına yer değiştirmemiş olan bir malzemedan ayrıldığında meydana gelir. Bu mekanizma konvansiyonel işleme yakından benzerdir. Parçalanma, malzeme bir yüzeyden kesme işlemi ile ayrıldığında ve aşındırıcıyı girinti, aşınma malzemesinin lokalize kırılmasına neden olur. Bu çatlaklar daha sonra, aşınma oluşunun etrafında lokal olarak yayılarak, spalling ile ek malzeme çıkarılmasına neden olur.

Aşınan yüzeyin mekanik özelliklerine bağlı olarak iki farklı sökme işlemi vardır. Sünek malzemelerde, yüzeyde plastik deformasyona abrazif aşınma eşlik eder. Aşınma oluşunun bir kısmı aşınma kalıntısı olarak çıkarılır. Bu oluktaki malzemenin kalan kısmı plastik olarak kanalın kenarlarına kaydırılır

4.2.2. Adhesif Aşınma

Adhesif aşınma en önemli aşınma türü olarak bilim çevrelerince kabul edilen bir aşınma türüdür. En basit olarak iki metal sabit ve birbirine temas halinde durduğunda, temas eden pürüzlerde soğuk kaynak meydana gelmektedir. İzafi hareket başladığında ise bu soğuk kaynak olan bölgelerde kopmalar meydana gelmektedir. Bu şekilde adhesif aşınma meydana gelmektedir. Adhesif aşınma, temiz yüzeylerde, oksit olmayan ortamda ve kimyasal ve yapısal benzerliği olan malzeme çiftlerinde yaygınca meydana gelmektedir (Gale ve Totemeier 2004).

4.2.3. Korozi Aşınma

Korozyon, çeşitli endüstriler için büyük ekonomik kayıpların yanı sıra malzemelerin bütünlüğü üzerinde ilerleyici zararlı etkileri olan doğal bir elektrokimyasal bir olgudur (Pourhashem ve diğ. 2020).

Korozi aşınma, birbiriyle temas halindeki yüzeylerde ortam ile meydana gelen korozi tepkimeler sonucunda meydana gelen aşınma türüdür. Korozi aşınma, petrol ve gaz endüstrisindeki boru hattı sistemlerinde, implante edilmiş tıbbi cihazlar (örneğin, fizyolojik ortamda yapay eklemlerin aşınması), tarım makineleri ve gıda işleme tesisleri (örneğin, pompalama ve damıtma) ve madencilik dahil olmak üzere birçok endüstriyel işlemlerde sıkça karşılaşılan bir aşınma modudur (Wang ve Chung 2013).

4.2.4. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması makine elemanlarında meydana gelen en önemli aşınma türlerinden biridir. Yuvarlanma hareketi ve/veya kayma teması malzeme yüzeylerinde bir gerilme çevrimine sebebiyet verebilir. Bu gerilme tekrarı sonucunda malzeme yüzeyinde yorulma aşınması oluşur (Stachowiak ve Batchelor 1993). Yorulma aşınması tren raylarında, logomatif tekerleklerinde, rulmanlarda, kaymalı yataklarda, sıcak ya da soğuk haddeler gibi pek çok uygulamada yaygın bir şekilde görülmektedir.

4.2.5. Erozyon Aşınması

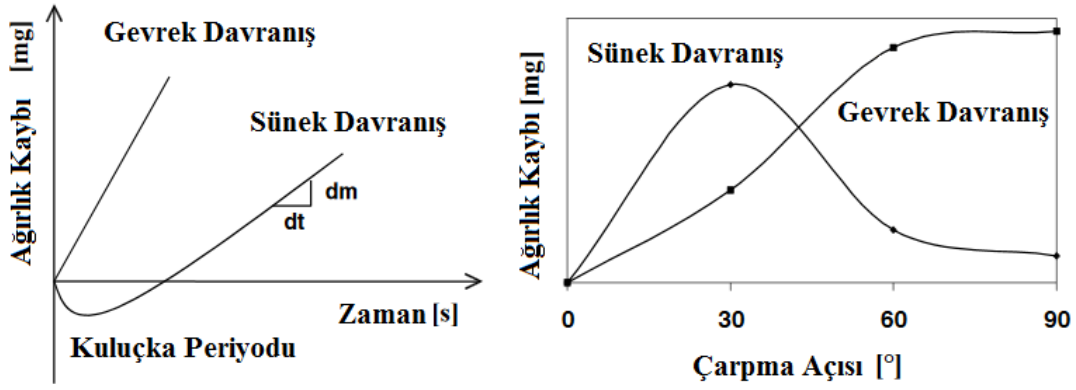
Erozyon, yüzey ile havadaki katı parçacıkların, katı parçacıklar içeren bir sıvı veya sadece sıvı arasındaki mekanik etkileşim nedeniyle katı bir yüzeyden aşamalı olarak malzeme

kaybı ile karakterize edilen bir malzeme bozunma şeklidir(Boggarapu, Gujjala, ve Ojha 2020; Sharma ve diğ. 2021; Ayyagari ve diğ. 2018).

Gazlı ortamda sürüklenen katı parçacıkların çarpması sonucu oluşan erozyon, katı parçacık erozyonu olarak adlandırılır. Öte yandan, taşıyıcı ortam olarak bir sıvı kullanılıyorsa, süreç bulamaç erozyonu olarak adlandırılır (Ayyagari ve diğ. 2018). Katı partikül erozyonu, kumlama ve yüksek hızlı aşındırıcılardaki (su jeti ile kesme) gibi uygulamalarda yararlı bir olgudur, ancak birçok durumda ciddi bir sorundur. Örneğin buhar ve jet türbinleri dahil mühendislik sistemleri, partikül madde taşıyan boru hatları ve vanalar ve akışkan yataklı yanma (FBC) sistemlerde ise önemli hasarlara neden olan bir mekanizmadır (Pasha ve Kaleemulla 2013).

Katı parçacık erozyonu pek çok makine parçası için çok ciddi bir problemdir. Özellikle hidrolik sistemler, buhar ve jet türbinleri, boru hatları ve vanaları, uçak parçaları gibi alanlarda parçacık erozyonundan kaynaklanan hasar mekanizmaları ciddi kayıplara neden olabilmektedir. Erozyona maruz kalan makine elemanlarının yüzeylerinden malzeme kopmaları, yüzey pürüzlülük değerlerinin değişmesi ve toleranslarda bozulma gibi pek çok olumsuz sonuç ortaya çıkmaktadır. Sürtünme ve aşınma proseslerindeki gibi katı partikül erozyonunda da mekanik, ısıl, kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar bir arada meydana gelerek malzeme çiftinin davranışını belirlemektedir. Malzemelerin erozyon davranışının altında yatan temel mekanizmaları ortaya çıkarmak için yapılan çalışmalar 20. Yüzyılın ikinci yarısında yoğunlaşmış ve günümüzde devam etmektedir. Bu amaçla yapılan ilk araştırmaların büyük çoğunluğu metaller ve seramikler üzerine olmuştur. Bu kapsamda polimer malzemeler ve polimer kompozit malzemeler, yüzeylerin erozif aşınmaya maruz kaldığı servis şartlarında önemli oranda tercih edilen malzemelerdir (Barkoula ve Karger-Kocsis 2002).

Sünek ve gevrek malzemelerin katı partikül erozyon davranışları değişiklik göstermektedir. Aşağıdaki şekilde sünek ve gevrek malzemelerin katı partikül erozyon davranışları verilmiştir.



Şekil 4.2. Sünek ve gevrek malzemelerin katı partikül erozyon davranışları

Polimer matris kompozitlerin erozyon dirençleri çarpma açısı, çarpma hızı, erozyon parçacığının şekli ve boyutu, erozyon parçacıklarının debisi, basıncı, sıcaklık, lif uzunluğu, lif yönelimi, dolgu malzemesinin cinsi gibi pek çok faktöre bağlıdır (Barkoula ve Karger-Kocsis 2002).

4.3. Erozyona Etki Eden Faktörler

4.3.1. Parçacık Boyutu

Parçacık boyutu, malzemelerin aşınmasını etkileyen kritik parametrelerden biridir. Bazı araştırmacılar aşındırıcı aşınma ve parçacık boyutu arasında bir güç yasası ilişkisi önerdiler (Desale, Gandhi, ve Jain 2009).

Diğer bazı araştırmacılar, jet çarpma test cihazı ile yapılan deneylere dayanarak, belirli bir boyuta kadar parçacık boyutu ile erozyonun arttığını ve daha sonra boyutun daha da artmasıyla azaldığını bildirmiştir (Lin ve diğ. 2018; Nguyen ve diğ. 2016).

Nguyen vd. parçacık-parçacık etkileşimlerinin etkisinin, jet çarpma test cihazındaki daha büyük boyutlu parçacıklar için baskın olduğunu, bunun da hedef yüzeye çarpan parçacıkların hızını azalttığını ve dolayısıyla erozyonu azalttığını bildirmiştir (Nguyen ve diğ. 2016).

Misra ve Finnie, partikül boyutunun erozyon üzerindeki etkisinin hedef yüzey özellikleri ile değiştiğini gözlemlemişlerdir (Misra ve Finnie 1981).

4.3.2. Parçacık Şekli

Parçacık şekli, malzemelerin erozyonunu etkileyen bir diğer önemli parametredir. Parçacık şeklinin erozyon üzerindeki önemi, parçacık boyutuna eşit veya daha fazla olarak düşünülebilir(Lin ve diğ. 2018; Bahadur ve Badruddin 1990). Parçacık şeklindeki varyasyon, malzeme çıkarma mekanizmasını değiştirir ve ayrıca erozyon oranını önemli ölçüde etkileyebilir. Raask, yumuşak çelik yüzeye 100 m/s hızla çarparken keskin kuvars parçacıklarının küresel cam parçacıklardan 10 kat daha aşındırıcı olduğunu gözlemledi(Raask 1969). Levy ve Chik, AISI 1020 karbon çeliğine 80 m/s hızda çarparken köşeli parçacıkların yuvarlak veya küresel parçacıklardan dört kat daha aşındırıcı olduğunu bildirmiştir (Levy ve Chik 1983).

4.3.3. Parçacık ve Hedef Yüzeyin Sertliği

Genel olarak partikül ile hedef yüzeyi etkileşimi sırasında hedef yüzeye verilen hasar, fonksiyonel olarak partikülün sertliğine bağlıdır. Ancak hasarın boyutu, partikülün ve hedef yüzeyin göreceli sertliğindeki değişime göre değişir. Metaller ve seramikler genellikle sertlik oranındaki artışla, yani erodent sertliğin hedef malzeme sertliğine oranıyla birlikte erozyon oranında artış eğilimi gösterirler (Arabnejad ve diğ. 2015). Bununla birlikte, bu artış, etkinin önemli olmayabileceği belirli bir sertlik oranı değerine kadardır(Arabnejad ve diğ. 2015).

Bunun nedeni, sertliği yüksek parçacıkların çarpma sırasında daha az kırılma eğilimi göstermesi, buna karşılık yumuşak parçacıkların parçalanması ve yüzeye yapışmasının çarpma sırasında parçacıkların kinetik enerjisini düşürmesi ve dolayısıyla erozyon oranını düşürmesi olabilir. Elkholy [75], sertlik oranı 150 ila 400 HB arasında değişen dört farklı metal ve 710 HB sertlikte silis kumu parçacıkları kullanarak sertlik oranı ile erozyon oranı arasındaki fonksiyonel ilişkiyi belirledi. Sertlik oranını erozyon oranı ile ilişkilendirmek için güç yasası korelasyonunu kullandı ve 3,82'lik sertlik oranının güç yasası endeksini 1,9'luk geçiş sınırına kadar ve bu sınırlayıcı oranın ötesinde 0,27 olarak bildirdi (Elkholy 1983).

Elastomerlerin ve plastiklerin erozyon aşınması davranışlarının sertlik oranına göre karşılaştırılması zordur. Bunun nedeni, erozyonun polimerlerin sertliğinin basit bir işlevi

olmamasıdır. Polimerler için, hedef yüzey sertliğinde azalma ile erozyon direncinde artış gibi ters bir eğilim de gözlenmiştir.

4.3.4. Çarpma Açısının Etkisi

Parçacık çarpma açısı, hedef yüzey ile çarpma sırasında parçacık hızının yönü arasındaki açıdır. Erozyon hızının aynı zamanda parçacık çarpma açısının bir fonksiyonu olduğu kabul edilmektedir. Malzemelerin erozyon davranışı genellikle sünek veya kırılğan olarak karakterize edilir. Sünek erozyon davranışında, çarpma açısı ile erozyon hızı artar, 10° ila 40° arasında bir açıda maksimum değere ulaşır ve daha sonra 90°'ye kadar azalırken, gevrek erozyon davranışında erozyon hızı çarpma açısı ile artar ve maksimum erozyon hızı 90° civarında veya 90° olur (Abd-Elrhman ve diğ. 2014). Çarpma açısı ile malzemenin erozyonu davranışının bilinmesi ve maksimum erozyon aşınmasını göstermiş olduğu açının doğru tespit edilmesi, malzeme seçiminde tasarımcının erozif aşınma nedenlerini daha iyi kontrol etmesine yardımcı olabilir. Maksimum erozyon oranının gözlemlendiği çarpma açısı 15°-30° arasında olduğu zaman sünek davranış olarak ifade edilirken, maksimum erozyon oranı 90° olur ise gevrek davranış olarak ifade edilir. Bunun aksine maksimum erozyon oranı 30 ve 90 arasında meydana geliyorsa bu sefer davranış yarı sünek/yarı gevrek olarak ifade edilir (Sharma ve diğ. 2021).

4.3.5. Parçacık Çarpma Hızı

Parçacık çarpma hızı, malzemelerin erozyon aşınma oranını etkileyen en baskın faktörlerden biridir. Daha yüksek çarpma hızında, daha küçük boyutlu parçacıklar bile önemli erozyona neden olabilir. Hız arttıkça erozyon oranının arttığı tespit edilmiştir(Lindsley ve Marder 1999; Islam ve Farhat 2014). Bu, çarpan parçacıkların kinetik enerjisindeki artışa bağlanabilir.

4.3.6. Sıcaklık

Partikül taşıma işlemlerinde bileşenlerin duvar yüzey sıcaklığının oda sıcaklığından fazla olması, yüksek çalışma sıvısı sıcaklığından ve partikül çarpması sırasında hedef yüzeyden enerji kaybı olmamasından kaynaklanabilir. Çalışma sıcaklığı aralığı ve hedef malzeme özelliklerine göre sıcaklığın erozyon hızına etkisinin değiştiği gözlemlenmiştir.

Malzemelerin erozyon hızına gözlemlenen sıcaklık bağımlılığı dört sınıf altında sınıflandırılabilir. Birinci sınıfta, başlangıçta, sıcaklık artışı ile erozyon hızı azalır ve daha sonra sıcaklığın bazı kritik değerlerinden sonra sıcaklıkla artar. İkinci sınıfta, başlangıçta, erozyon hızı sıcaklıktan bağımsızdır ancak belirli bir kritik sıcaklığın üzerinde, erozyon hızı sıcaklıkla artar. Üçüncü sınıfta, erozyon oranı sadece sıcaklık artışı ile artar. Son olarak dördüncü sınıfta, başlangıçta erozyon hızı artar ve kritik sıcaklıktan sonra sıcaklığın artmasıyla azalır.

Levy ve Man, yukarıda bahsedilen birinci sınıf erozyon davranışının, sıcaklık artışıyla birlikte çarpma mukavemetindeki artışa ve metalik hedef yüzeyin çekme mukavemetindeki azalmaya atfedildiğini öne sürmüştür. Kritik sıcaklık değerinin altında, darbe mukavemetindeki artışın baskınlığı daha fazladır, bu da erozyon hızının azalmasına yardımcı olur ve kritik bir sıcaklığın üzerinde, çekme mukavemetinin azalmasının baskınlığı daha fazladır, bu da hedef yüzeyin erozyon oranını arttırır (Levy ve Man 1986).

Li vd. dördüncü sınıfın erozyon davranışının, başlangıçta erozyonu arttıran sıcaklık artışı ile yüzey sertliğindeki azalmanın baskın etkisinden kaynaklandığını ve kritik sıcaklıktan sonra malzeme oksidasyonundan yoğun camsı bir film oluşumunun iyileştiğini bildirmiştir. (Li ve diğ. 2014).

Erozyon hızının sıcaklığa bağımlılığının parçacık çarpma açısı tarafından da etkilendiği gözlemlenmiştir. Sığ çarpma açısında, sıcaklıkla erozyon hızındaki artış normal çarpma açısına göre daha fazladır (Shida ve Fujikawa 1985; Shimizu, Xinba, ve Araya 2011). Malzemelerin sıcaklıkla erozyon hızına olan tüm bu karmaşık davranışlarıyla, erozyon hızının sıcaklıkla tek bir korelasyonunu elde etmek zordur. Metaller ve seramikler için, sıcaklığın erozyon üzerindeki etkileri yalnızca yüksek sıcaklıklarda (200°C'den fazla) daha fazla bulunmuştur (Zhou ve Bahadur 1989). Bu nedenle, genel olarak, oda sıcaklığına yakın sıcaklık değişiminin etkisinin metal ve seramiklerin erozyon hızı üzerinde çok az etkisi olduğu düşünülebilir. Polimerik malzemelerin erozyon hızı, sıcaklıktaki küçük bir değişiklik ile önemli ölçüde değişir (Ashrafizadeh, Mertiny, ve McDonald 2016). Bu nedenle, polimerler için, erozyon oranı tahmini, oda sıcaklığına yakın işlemler için bile sıcaklık değişiminin uygun şekilde dikkate alınmasını gerektirir.

5. PTFE VE PTFE MATRİSLİ KOMPOZİTLER İLE İLGİLİ YAPILAN LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

PTFE (Politetrafloroetilen) kompozitlerinin sürtünme ünitelerinde ve çeşitli makine ve ekipmanların contalarında yaygın olarak kullanılması, politetrafloroetilenin moleküler ve supramoleküler yapısının özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Panda ve diğ. 2017).

Yapılan bir çalışmada, PTFE ve naylon-6'nın etki eden temas performansı, özel bir aşındırıcı erozyon test makinesi ile araştırılmıştır [41]. PTFE'nin aşınmış yüzeyinde pulluklar, çizikler ve plastik deformasyon birikimi, naylon-6'nın aşınmış yüzeyinde de çizikler ve daha hafif plastik deformasyon tespit edildi. PTFE malzemesinin aşınma mekanizmasının öncelikle plastik kırılma olduğu sonucuna varılmıştır. Naylon-6'nın aşınmasına gelince, bunun akan aşındırıcılarla mikro kesimin sonucu olduğu düşünülmektedir. Polimerlerin aşınma oranları üzerindeki etkili faktörler, esas olarak akış hızının yanı sıra partiküllerin boyutu ve konsantrasyonu olduğu rapor edilmiştir (Zhang, Deguo, ve Weihua 1995).

Grafit/PTFE kompozitlerinin aşınma davranışı ve mikro yapısı arasındaki korelasyon, hacimce %0 ila %50 arasında geniş bir grafit içeriği aralığında incelenmiştir. Mikroskobik kusurların özellikleri, pozitron yok etme ömür boyu tekniği ile analiz edildi. Grafit/PTFE kompozitlerinin aşınma davranışının, makro ve mikroskobik anlamda kusurların fiziksel özelliklerine tekabül ettiği ve PTFE'deki kristal ve amorf bölgeler arasındaki ara yüz özellikleri tarafından oldukça iyi yansıtıldığı bulundu (Yan ve diğ. 1996).

Sulu bir ortamda paslanmaz çeliğe karşı kayan PTFE kompozitlerin sürtünme ve aşınma mekanizması incelenmiştir. Sadece cam elyaflarla takviye edilmiş PTFE kompozitlerinin aşınmasının, muhtemelen takviye edilen cam tozundan kaynaklanan artan temas bölgesi yüzeyi pürüzlülüğü nedeniyle, sulu ortamda test edilen diğer kompozitlerden çok daha fazla olduğu bulundu. Mikroskobik gözlemler, cam elyafların kolayca aşındığını ve ince kırık cam elyafların su içinde eşleşen metal yüzeye yapıştığını göstermiştir (Watanabe 1992).

Onlarca yıldır, PTFE'nin aşınmasını azaltmak için dolgu maddeleri başarıyla kullanılmıştır. PTFE bazlı kompozitlerde dolgu maddelerinin aşınmayı azaltan mekanizması hala bir tartışma konusu olmaya devam ediyor. Çeşitli fiber ve partikül dolgu maddeleri, PTFE'nin aşınmasını birkaç büyüklük sırası ile başarılı bir şekilde azaltmıştır, ancak her ikisi de dolgunun etkinliğini sınırlayan sürtünme katsayılarını artırır ve uygun transfer filmlerini ve karşı yüzeyi aşındırır (Panda ve diğ. 2017).

Mühendislik uygulamalarında pek çok polimer ve polimer esaslı kompozit malzemeler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu polimer malzemelerin en önemlilerinden biri PTFE olup, bunun sebebi bu malzemenin düşük sürtünme katsayısına sahip olması, kendi kendini yağlayabilme özelliği ve solventlere karşı göstermiş olduğu dirençtir. Poli tetra flor etilen ayrıca yataklarda ve sızdırmazlık elemanı olarak da kullanılan önemli bir polimer malzemesidir. PTFE kimyasal etkilere karşı dirençli, düşük sürtünme katsayısına sahip aynı zamanda sıcaklık kararlılığı da yüksek bir polimerdir (Sujuan ve Xingrong 2014).

PTFE 1938 yılında Roy PUNKETT tarafından keşfedildiğinden beri kendisine termoplastik olarak otomobil, havacılık, elektronik ve yarı iletken olarak pek çok endüstri kolunda uygulama alanı bulmuştur. Araştırmalar PTFE malzemesinin düşük sürtünme katsayısı göstermesini işletme şartlarında temas eden karşı yüzeyde ince bir transfer tabakasının oluşmasına bağlamışlardır. Ancak bununla beraber karşı yüzeyde oluşan bu transfer tabakasının özelliklerinin yüksek yüklerde, hızlarda ve sürede zamanla değişmekte olduğu ve aşınma direncini azalttığı ifade edilmektedir. Çalışmalar PTFE malzemesinin aşınma direncini artırmanın en etkin yollarından birinin içerisine belirli oranlarda bronz, karbon fiber, cam elyaf, ZnO ve Al₂O₃ gibi takviye elemanlarının eklenmesi olduğunu göstermiştir (Trabelsi, Kharrat, ve Dammak 2016).

Jisheng ve Gawne yapmış oldukları çalışmada bronz takviye edilmiş PTFE kompozit malzemenin dökme demir yüzeyine karşı göstermiş olduğu sürtünme ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kompozit malzemenin saf PTFE ve bronz göre daha yüksek bir aşınma direnci gösterdiğini rapor etmişlerdir (Wang ve Yan 2007).

Yapılan bir çalışmada MoS₂ ve Bronz parçacıkları ile takviye edilmiş PTFE matrisli kompozit malzemenin sürtünme ve aşınma davranışı incelenmiştir. Yapılan çekme deneyleri sonucunda kompozit malzemenin akma mukavemetinin MoS₂ eklenmesi ile azaldığı tespit edilmiştir. Aynı çalışmada MoS₂ eklenmesi ile PTFE-Bronz kompozit malzemenin aşınmaya karşı göstermiş olduğu direncin arttığı tespit edilmiştir. Aşınma yüzeylerinden yapılan SEM incelemeleri sonucunda mikro çatlakların ve aşınma parçacıklarının aşınma yüzeylerine gömüldüğü tespit edilerek, aşınma mekanizmasının abrazif karakterde olduğu rapor edilmiştir (Trabelsi, Kharrat, ve Dammak 2016).

Wang ve Yan gerçekleştirdikleri çalışmada, çelik bir karşı yüzeye karşı yaptıkları aşınma deneyinde PTFE/bronz kompozit malzemenin bir transfer film oluşturup, bu filmin şeklini, kalınlığını ve tribolojik karakterizasyonunu incelediler. Araştırmadan elde ettikleri sonuca göre aşındırıcı karşı yüzeyde oluşan transfer film içeriğinde bronz miktarının artması ile birlikte aşınma dayanımının da arttığını ifade etmişlerdir. Aynı çalışmada artan bronz miktarının sürtünme katsayısını da düşürdüğü not edilmiştir.

Tanaka ve Kawakami PTFE esaslı kompozitlerde kullanılan çeşitli takviye elemanlarının aşınma davranışına etkilerini inceledikleri çalışmada, sürtünme katsayısının takviye elemanına bağlı olmadığını öne sürmüşlerdir. Bu çıkarımlarını, aşınma deneyleri esnasında küçük boyutlardaki takviye elemanlarının PTFE matrisi içerisine gömülmesine dayandırmışlardır. Ayrıca, deney esnasında takviye elemanları çok büyük değillerse, temas eden yüzeyler arasında bir PTFE filmin oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu durumda takviye elemanlarının tercihli olarak yükü taşıyarak kompozit malzemenin aşınma direncini arttırdığını ifade etmişlerdir. Parçacık halindeki takviye elemanlarının da eğer çok büyük değillerse aşınma miktarını azalttıklarını ancak bu etkinin elyaf takviyelilere göre daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı çalışmada uygun elyaf ve parçacık dolgu malzemelerinin PTFE esaslı kompozit malzemelerin aşınma dirençlerini artırmada MoS₂ grafit tozlarından ve çok küçük sert parçacıklardan daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir (Tanaka ve Kawakami 1982).

Yapılan başka bir çalışmada PTFE içerisine dolgu malzemesi olarak cam ve bronz eklenmesi ile aşınma dayanımının arttığı tespit edilmiştir (Pasha ve diğ. 2013). Hasan ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada cam elyaf takviyeli PTFE kompozit malzemelerinin saf PTFE polimer malzemesine göre daha düşük sürtünme katsayısı, daha

düşük aşınma miktarı davranışı gösterdiklerini rapor etmişlerdir (Unal ve diğ. 2010). Yapılan diğer bir çalışmada PTFE içerisine karbon fiber ve grafit fiber eklenerek kompozit malzeme oluşturulup, yapılan aşınma deneylerinden karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin daha iyi abrazif aşınma direnci gösterdiği ifade edilmiştir (Li ve Ran 2010).

Yapılan bir başka çalışmada PTFE içerisine değişik oranlarda Potasyum Titanat viskerler takviye elemanı olarak eklenmiş, ardından sürtünme ve aşınma özellikleri kuru kayma şartlarında test edilmiştir. Yapılan aşınma deneyleri sonucunda aşınma oranının PTW miktarının %1'den %20'ye artırılmasıyla azaldığı tespit edilmiştir (Feng ve diğ. 2006).



6. TEZİN AMACI

Pek çok mühendislik uygulamasında katı parçacıkların içerisinde sürüklendiği sıvıların, örneğin katı parçacıkların boru hattından hidrolik ve pnömatik olarak taşınmasında, karıştırılan tanklarda, akışkan yataklı sistemlerde, siklonlarda, pompalarda vb. Katı parçacıkları işlerken, önemli miktarda parçacık-duvar etkileşimleri meydana gelebilir. Sonuç olarak, enerji, hedef yüzeyin aşındırıcı aşınmasını ve partikül kırılmasını tetikleyebilecek darbe bölgesine aktarılır. Bunlar genellikle sistem performansını etkileyen kaçınılmaz bir olgu olarak kabul edilir. Ek olarak, partikül kırılması ürün kalitesini etkileyebilirken, duvar erozyonu bileşenin hizmet ömrünü azaltır. Bu nedenle, bu sorunları azaltmak önemlidir. Optimize edilmiş tasarıma sahip sistem kurulumu ve optimize edilmiş çalışma koşullarında çalışmak bu sorunları azaltabilir. Bunlara ek olarak bu alanlarda kullanılacak malzemelerin erozyon aşınması dayanımının tespit edilmesi gerekmektedir.

Çalışmada, Tribolojik uygulamalarda yaygın kullanılan fakat partikül erozyonu davranışı hakkında yeterli literatür bilgisi bulunmayan saf Teflon (PTFE) malzemesi, çam elyaf ve bronz parçacık takviyeli kompozitlerinin mikro yapısal, mekanik ve partikül erozyonu davranışları incelenmiştir.

PTFE kompozitleri rastgele dağılımlı kısa cam fiber takviyeli, karbon ve bronz partikül takviyeli olmak üzere, 3 PTFE matrisli karma malzeme ve saf PTFE çalışmada incelenmiştir.

Katkı malzemelerinin partikül erozyonu dayanımına etkilerinin incelenmesi, partikül erozyonu esnasında oluşan etkileşimlerin belirlenmesi ve sebep sonuç ilişkilerinin ortaya konulması tez çalışmasının konusunu oluşturmaktadır.

7. MALZEME VE YÖNTEM

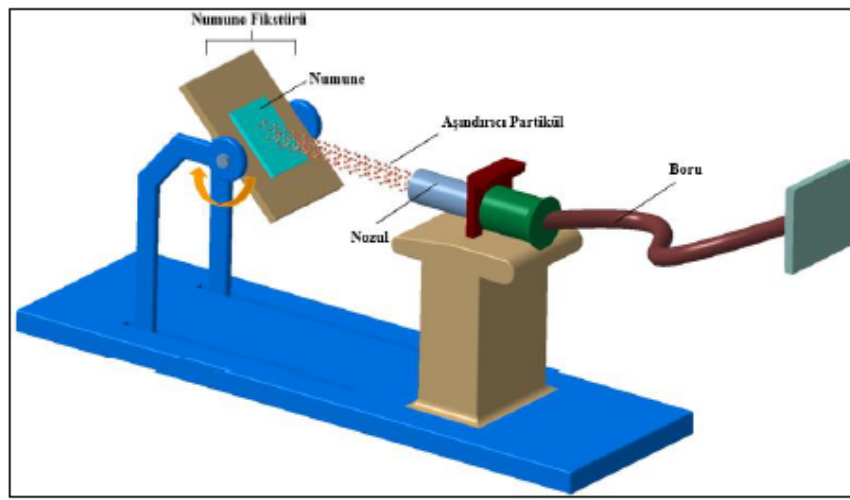
Bu çalışmada, Polikim Polimer ve Kimya firmasından temin edilen 6 cm x 6 cm x 0,5 cm boyutlarında cam fiber ve bronz parçacık takviyeli numuneler ile 6 cm x 6 cm x 0,8 cm boyutlarında saf PTFE ve karbon partikül takviyeli plakalar halinde hazırlanmış numuneler kullanılmıştır. Deneylerde, %25 oranında rastgele dağılımlı kısa cam fiber takviyeli PTFE, %35 oranında karbon partikül ve %60 oranında bronz partikül ile takviye edilmiş 3 adet PTFE kompoziti ve saf PTFE (Teflon) numuneleri kullanılmıştır.



Şekil 7.1. Numunelerin fotoğrafları

Deneyisel çalışmalarda, plakalar halinde hazırlanmış olan her bir numuneden 12'şer adet olmak üzere, SAF PTFE (Teflon), Cam fiber, Karbon ve Bronz partikül takviyeli numuneler yüzeyine, Saykar Kuşlama firmasından temin edilen 60 mesh (180-600 μm) Garnet aşındırıcı püskürtülmüştür. Aşındırma işlemi, kuşlama yöntemi kullanılarak 20 sn süre ile 20 mm mesafeden Garnet parçacıklarının 5 mm çapındaki nozuldan numunelerin yüzeyine püskürtülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Aşındırma işlemi, özel olarak tasarlanan kuşlama düzeneği ile Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesindeki Eroziyon Aşınma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Aşındırma düzeneği, basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, kuşlama kabini, numune fikstürü ve kuşlama tabancası elemanlarından oluşan bu test düzeneğinde aşınma işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Düzenekte, açılı yüzeye sahip olan numune fikstürü, numunenin sabitlenmesini ve 15'er derece dönme hareketi yaparak istenilen açıda kumun püskürtülmesini sağlamaktadır.

Testler Şekil 7.2’de verilen ASTM G77 standardına göre hazırlanmış 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 sağlamaktadır. Aşındırıcı partiküllerin numunelerin yüzeyine çarpma açısı numune fikstürü kullanılarak 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°’ye ayarlanmıştır.



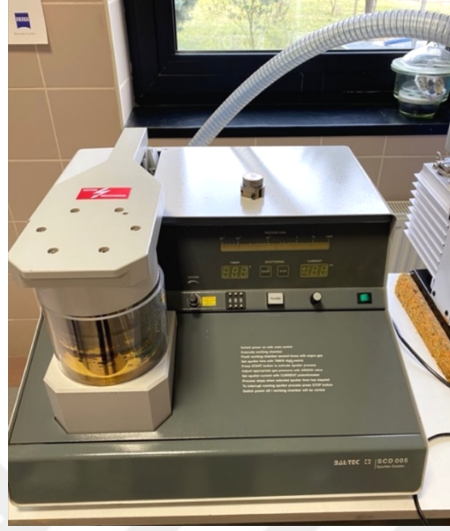
Şekil 7.2. Katı partikül erozyonu deney düzeneği (ÖZZAİM 2021)

Yapılan deneyler sonucunda meydana gelen erozyon oranları, numunelerin deney öncesinde ve sonrasında tartılarak elde edilen ağırlık kayıplarının aşındırıcının toplam kütesine bölünmesi ile hesaplanmıştır.

7.1. Morfolojik Analizler

Deneyler sonucunda numunelerin göstermiş oldukları aşınma davranışlarının mekanizmalarının belirlenmesi için erozyon deneyine maruz kalmış yüzeyler SEM cihazı ile gözlenmiştir. Yüzeyde genel itibariyle aşınma ağırlıklı en yüksek deformasyon 45°’de ve en düşük deformasyon eğik açılar için 15° çarpma açısıyla aşındırma işlemi uygulanan numunelerde görülmüştür. Bu nedenle, 15° ve 45° çarpma açılarında aşınmış numuneler SEM ile incelenmek üzere seçilmiştir. SEM görüntüsü alınması için seçilen numuneler, en yüksek deformasyona uğradıkları bölgelerden 1 cm x 1 cm boyutlarda kıl testere ile kesilmiş ve her bir numunenin yüzeyi önce su ile akabinde alkol ile temizlenerek

kurutulmuştur. Kurutulan numunelerin yüzeyi Angström mertebesinde Şekil 7.3'te fotoğrafı verilen BAL-TEC SCD 005 Sputter Coater cihazı kullanılarak altın ile kaplanmıştır.



Şekil 7.3. Kaplama cihazının fotoğrafı

Malzemelerin mikro yapılarında meydana gelen değişimlerin gözlenmesi için Şekil 7.4'te verilen JEOL JSM-6060 SEM cihazı kullanılmıştır. Kaplama işlemi 1 bar 15° aşındırma işlemi uygulanan numunelerde bakır ile diğer numunelerde bakır kaplamanın tükenmesinden dolayı altın ile yapılmıştır.



Şekil 7.4. Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) fotoğrafı

7.2. Topografik Analizler

Çalışmada aşınan yüzeylerin yüzey topografyasının incelenmesi ve yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi için Nanovea PS50-USA marka optik profilometre kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, farklı açılarda aşındırılan numunelerin yüzeylerinde aşınma hasarının bulunduğu bölgelerden alınmıştır. Çalışmada 15° ve 90° çarpma açılarında oluşan yüzey topografyası ve pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Ölçümlerde kullanılan optik profilometrenin resmi Şekil 7.5'te verilmiştir.

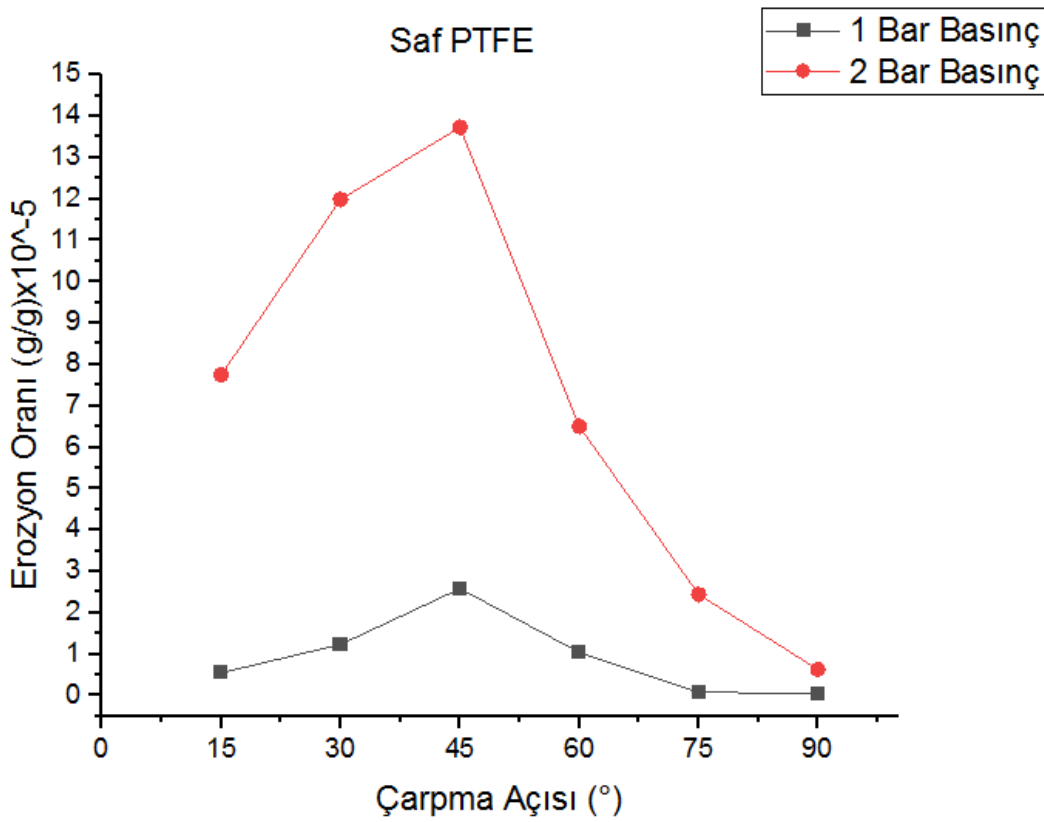


Şekil 7.5. Optik Profilometre cihazının fotoğrafı

8. BULGULAR

8.1. Katı Parçacık Erozyon Oranları

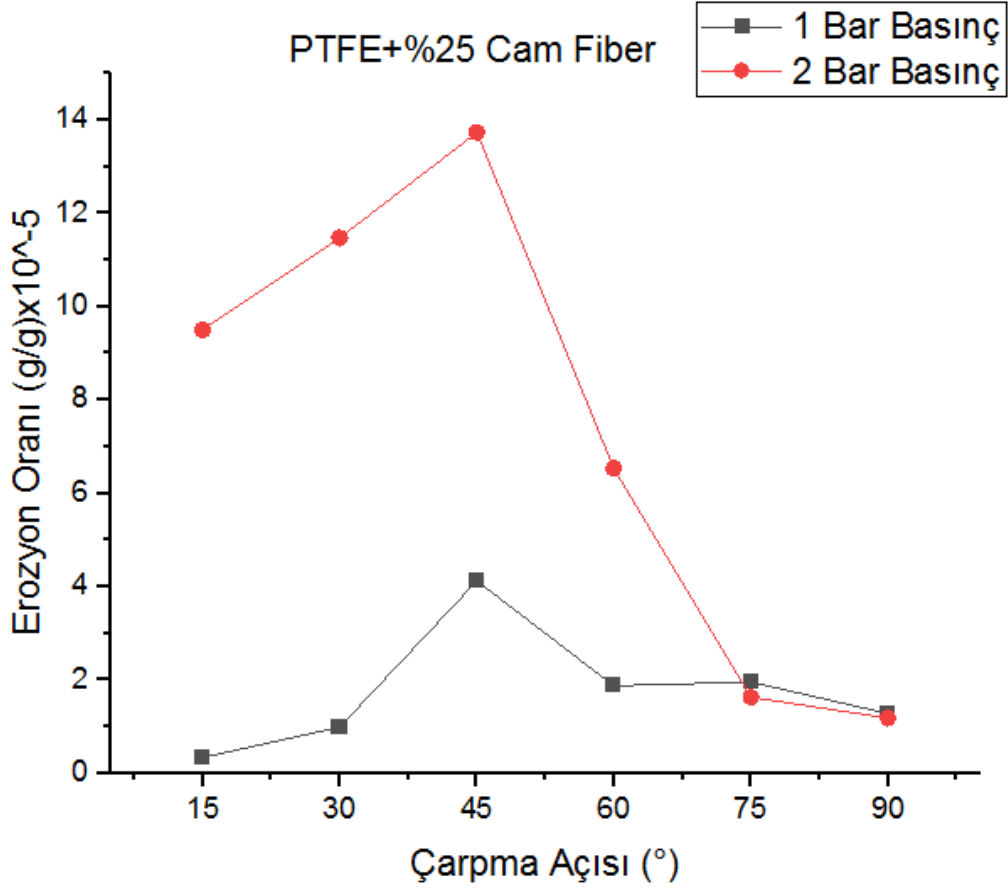
Çalışma kapsamında saf PTFE, PTFE+%25 cam fiber, PTFE+%35 karbon partikül ve PTFE+%60 bronz partikül malzemelerine 1 bar ve 2 bar basınç şartlarında ve 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarında garnet aşındırıcı katı parçacıkları ile 30 saniye süre ile erozyon deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda her bir malzeme için 1 ve 2 bar basınç şartlarında elde edilen erozyon aşınma oranları grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.1. Saf PTFE malzemesinin 1 ve 2 bar basınç altında ve farklı çarpma açılarındaki erozyon oranları

Şekil 8.1 incelendiğinde saf PTFE malzemesinin 1 bar basınç altında en düşük erozyon aşınması 90° çarpma açısında, en fazla erozyon aşınması ise 45° çarpma açısında meydana geldiği görülmektedir. Basıncın 2 bara yükseltilmesiyle erozyon aşınma oranının bütün çarpma açılarındaki artış oldukça yükseldiği görülmektedir. Basıncın 2 bara artırılması ile elde edilen erozyon oranlarındaki artış en fazla yaklaşık 31 kat olarak 75°

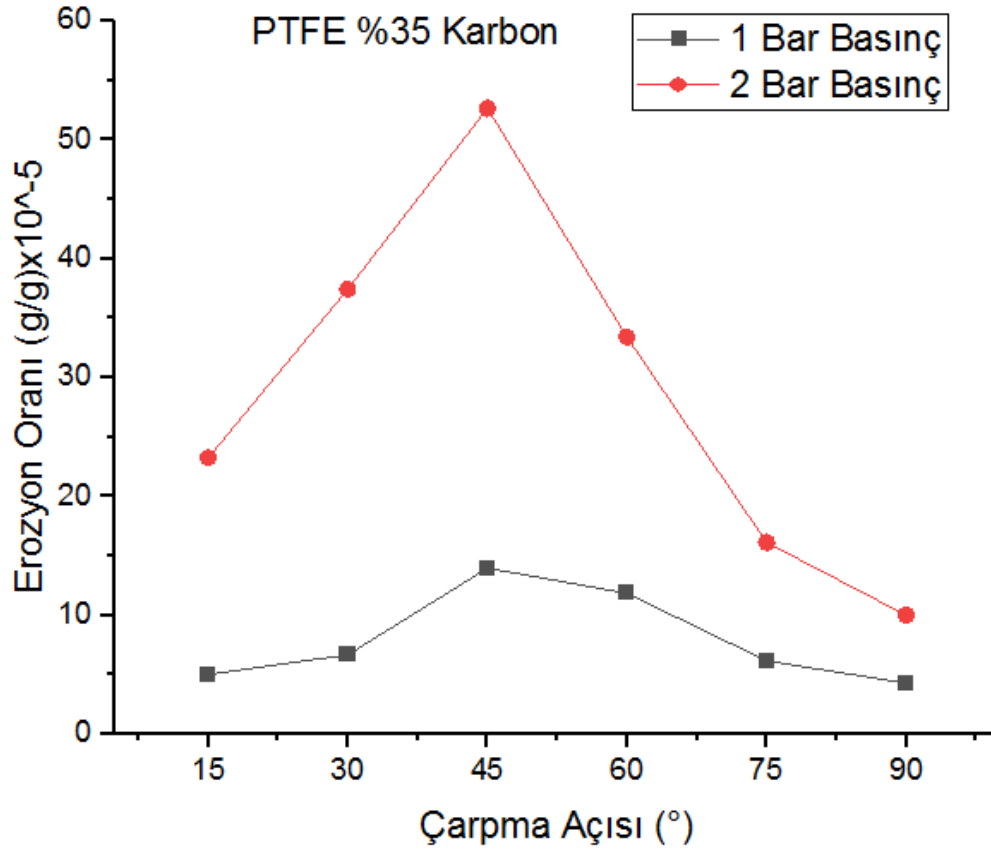
çarpma açısında elde edilirken, en düşük artış yaklaşık 5 kat ile 45° çarpma açısında elde edilmiştir.



Şekil 8.2. PTFE+%25 Cam Fiber takviyeli kompozit malzemenin 1 ve 2 bar basınç altında ve farklı çarpma açılarındaki erozyon oranları

Şekil 8.2 incelendiğinde %25 cam fiber ile takviye edilmiş PTFE kompozit malzemesinin 1 bar basınç altında katı parçacık erozyonuna maruz bırakıldığında en fazla erozyon oranının 45° çarpma açısında, en düşük erozyon oranının ise 15° çarpma açısında meydana geldiği görülmektedir.

Basıncın 2 bar seviyesine yükseltildiğinde ise yine en fazla erozyon oranının 45° çarpma açısında meydana geldiği, en düşük erozyon oranının ise 90° çarpma açısında olduğu görülmektedir. Basıncın 2 bar seviyesine çıkartılması ile en fazla artış yaklaşık 28 kat ile 15° çarpma açısı ile elde edilirken, en düşük artış yaklaşık 0,8 kat ile 75° çarpma açısında elde edilmiştir.

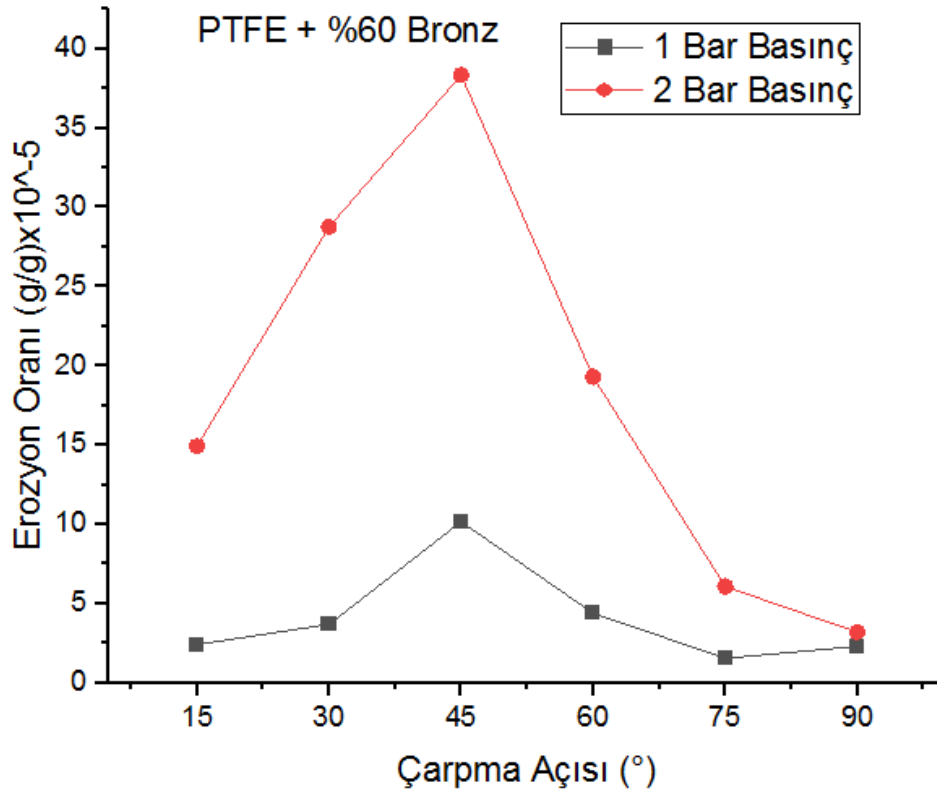


Şekil 8.3. PTFE+%35 Karbon takviyeli kompozit malzemesinin 1 ve 2 bar basınç altında ve farklı çarpma açılarındaki erozyon oranları

Şekil 8.3 incelendiğinde, %35 karbon ile takviye edilmiş PTFE kompozit malzemesine 1 bar basınç altında katı partikül erozyonu uygulanmasıyla en yüksek erozyon aşınma oranının 45° çarpma açısında, en düşük erozyon aşınma oranının ise 90° çarpma açısında meydana geldiği görülmektedir.

Basıncın 2 bar seviyesine yükseltilmesi ile aşınma oranlarının bütün çarpma açılarında arttığı ve maksimum değere 45° çarpma açısında eriştiği görülmektedir. 2 bar basınçta en düşük erozyon aşınma oranının 90° çarpma açısında elde edildiği yine Şekil 8.3'ten görülmektedir.

Basıncın 2 bar seviyesine çıkartılması ile en fazla artış yaklaşık 5 kat ile 30° çarpma açısında elde edilirken, en düşük artış yaklaşık 2 kat olarak 90° çarpma açısı ile elde edilmiştir.

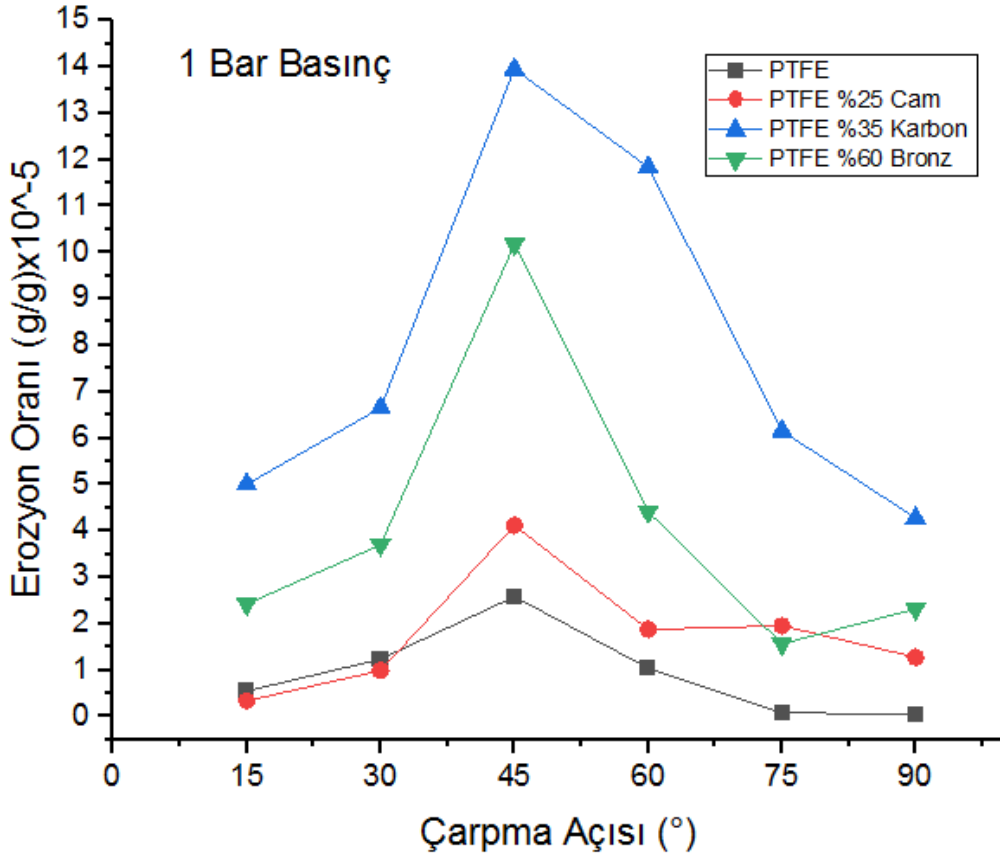


Şekil 8.4. PTFE+%60 Bronz takviyeli kompozit malzemenin 1 ve 2 bar basınç altında ve farklı çarpma açılarındaki erozyon oranları

Şekil 8.4 incelendiğinde %60 Bronz ile takviye edilmiş PTFE kompozit malzemesinin 1 bar basınçta en yüksek erozyon aşınma değerinin 45° çarpma açısında elde edildiği, en düşük erozyon oranı değerinin ise 75° çarpma açısında elde edildiği görülmektedir. Basınç değerinin 2 bar seviyesine çıkartılması ile bütün çarpma açılarındaki erozyon oranının dikkate değer oranda arttığı aynı şekilde görülmektedir. 2 bar basınç seviyesinde maksimum erozyon aşınma oranının yine 45° çarpma açısında elde edildiği, en düşük çarpma açısının ise 90° çarpma açısında elde edildiği Şekil 8.4'ten görülmektedir.

Basıncın 2 bar seviyesine çıkartılması ile erozyon oranındaki en fazla artış yaklaşık 7 kat ile 30° çarpma açısında elde edilirken, en düşük artış yaklaşık 1 kat ile 90° çarpma açısında elde edilmiştir.

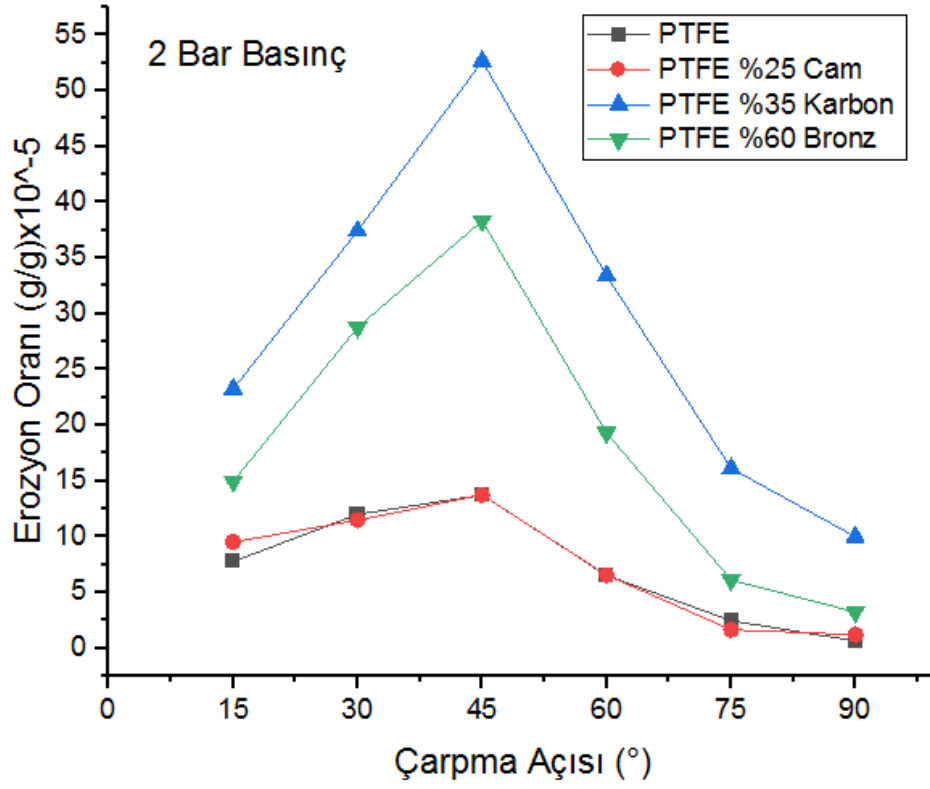
Bütün malzemelerin 1 bar basınç altında göstermiş oldukları erozyon oranları aynı grafikte Şekil 8.5'te verilmiştir.



Şekil 8.5. 1 bar basınç altında PTFE, PTFE %25 Cam, PTFE %35 Karbon ve PTFE %60 Bronz kompozit malzemelerinin 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarında göstermiş oldukları erozyon aşınma oranları

Şekil 8.5 incelendiğinde 45° çarpma açısında, 1 bar basınç altında katı parçacık erozyonuna maruz kalan dört numuneden en düşük aşınma miktarı saf PTFE malzemesinde elde edilirken, en fazla erozyon oranı yaklaşık 5 katla %35 karbon takviyeli kompozit malzemede elde edildiği görülmektedir. Aynı şekilde 60° çarpma açısında 1 bar basınç altında en düşük erozyon oranı saf PTFE malzemesinde elde edilirken, en yüksek erozyon oranı yaklaşık 11 kat artışla %35 karbon takviyeli kompozit malzemede elde edildiği görülmektedir. Aynı şekilde 75° ve 90° çarpma açılarında 1 bar basınç altında en düşük erozyon aşınma oranları saf PTFE malzemesinde elde edilirken, en yüksek erozyon aşınma oranları sırasıyla yaklaşık olarak 78 ve 82 katla %35 karbon takviyeli kompozit malzemelerde elde edildiği görülmektedir.

2 bar basınç altında bütün numunelerin maruz kaldığı katı parçacık erozyonu deneyinde elde edilen erozyon oranlarının grafikleri Şekil 8.6'te verilmiştir.

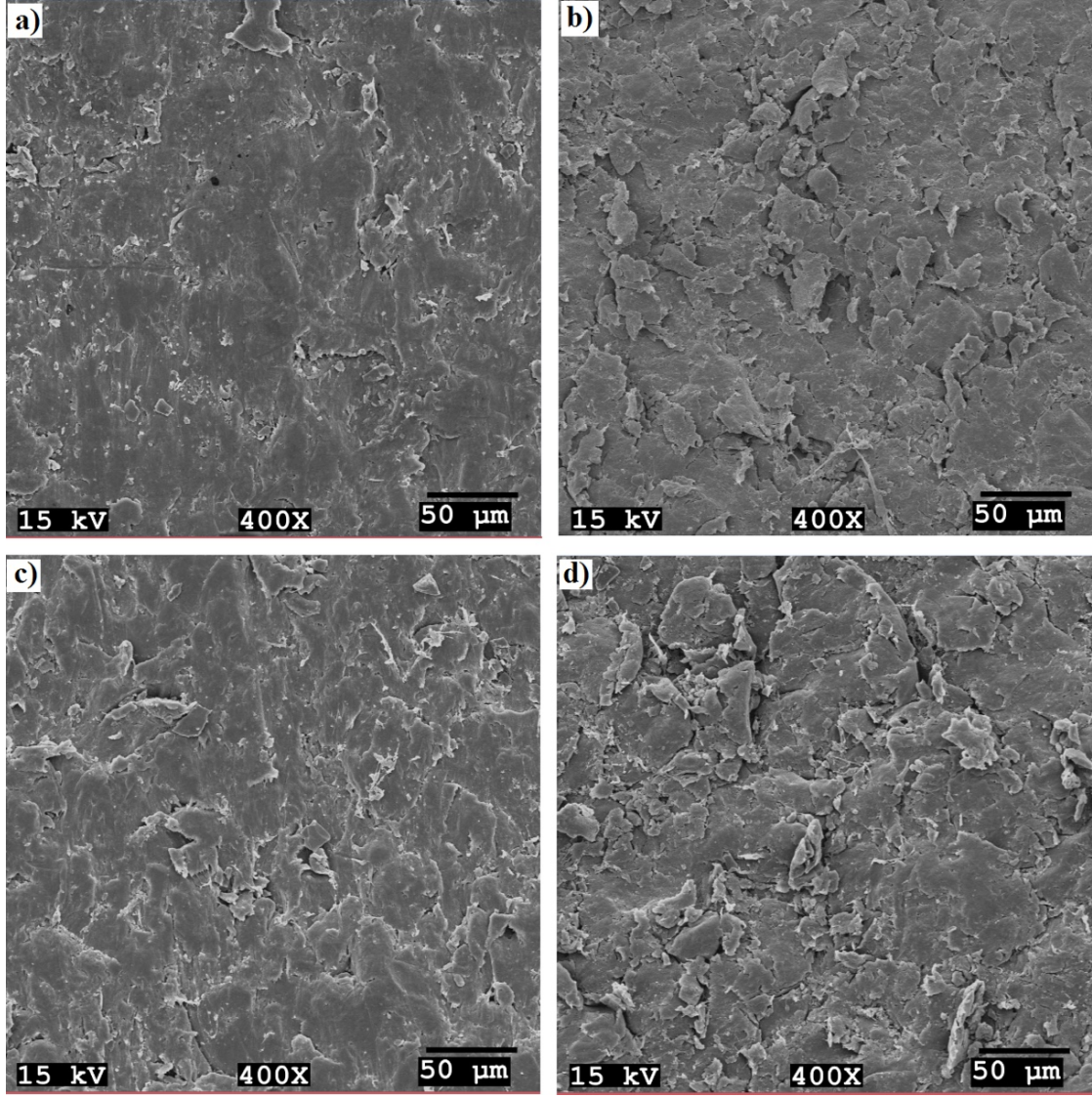


Şekil 8.6. 2 bar basınç altında PTFE, PTFE %25 Cam, PTFE %35 Karbon ve PTFE %60 Bronz kompozit malzemelerinin 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarında göstermiş oldukları erozyon aşınma oranları

Şekil 8.6 incelendiğinde 2 bar basınç altında 15° çarpma açısında en düşük erozyon aşınma oranının saf PTFE malzemesinde elde edilirken, en yüksek erozyon aşınma oranı yaklaşık 3 katla %35 karbon takviyeli kompozit malzemeden elde edildiği görülmektedir. Aynı şekilden 30°, 45°, 60° ve 75° çarpma açıları en düşük erozyon aşınma oranı %25 cam takviyeli kompozit malzeme elde edilirken, en fazla erozyon aşınma oranları sırasıyla yaklaşık 3, 4, 5 ve 6 katla %35 karbon takviyeli kompozit numuneden elde edildiği görülmektedir. 90° çarpma açısında ise en düşük erozyon aşınma oranı saf PTFE malzemesinde elde edilirken, en yüksek aşınma oranı yaklaşık 15 katla %35 karbon takviyeli kompozit malzemesinden elde edilmiştir.

8.2. Yüzey Morfolojileri

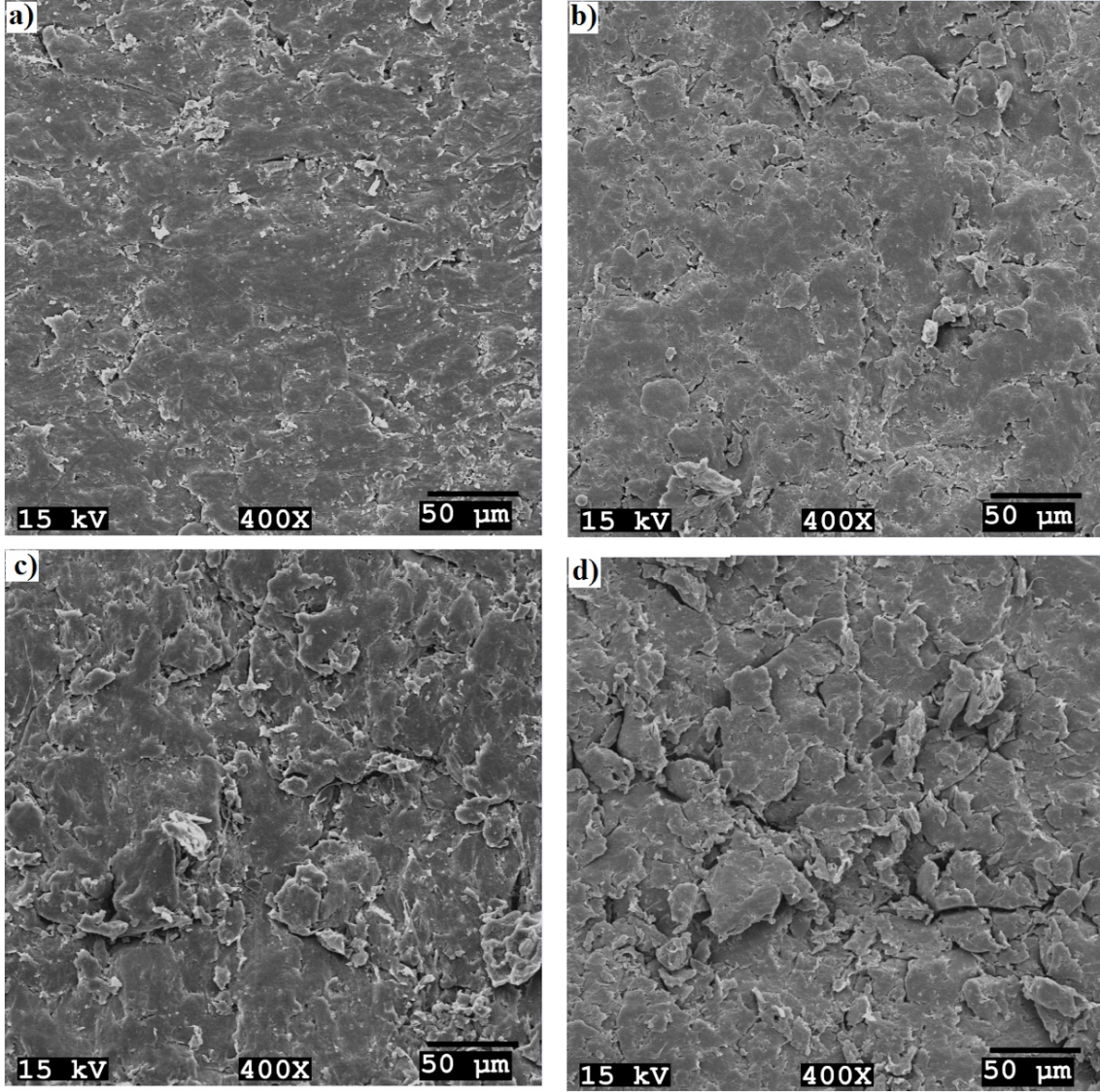
Erozyon deneylerine maruz kalmış numunelerin yüzeylerinden çekilmiş SEM fotoğrafları aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.7. Saf PTFE numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey SEM fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 1 bar basınç ve 45° çarpma açısı, c) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 45° çarpma açısı

Şekil 8.7.a incelendiğinde saf PTFE numunesinin 1 bar basınç altında ve 15° çarpma açısında katı garnet parçacıkları ile erozyona maruz bırakılmasıyla yüzeyden kesme mekanizmasıyla düşük miktarda malzeme koparıldığı görülmektedir. Aynı resimde mikro düzeyde çizikler ve malzeme çatlakları da görülmektedir. Basıncın sabit tutulup çarpma açısının 45° seviyelerine çıkartılmasıyla erozyona uğratılmış yüzeyine daha pürüzlü hale geldiği ve parçalanmaların meydana geldiği Şekil 8.7.b'den görülmektedir. Basıncın 2 bar seviyesine çıkartılıp, çarpma açısının 15°'ye düşürüldüğü Şekil 8.7.c incelendiğinde, artan basınç ile birlikte yüzeyde daha fazla parçalanma olduğu görülmektedir. Basıncın 2 barda sabit tutulup çarpma açısının 45° seviyesine çıkartılması ile erozyon aşınmasının

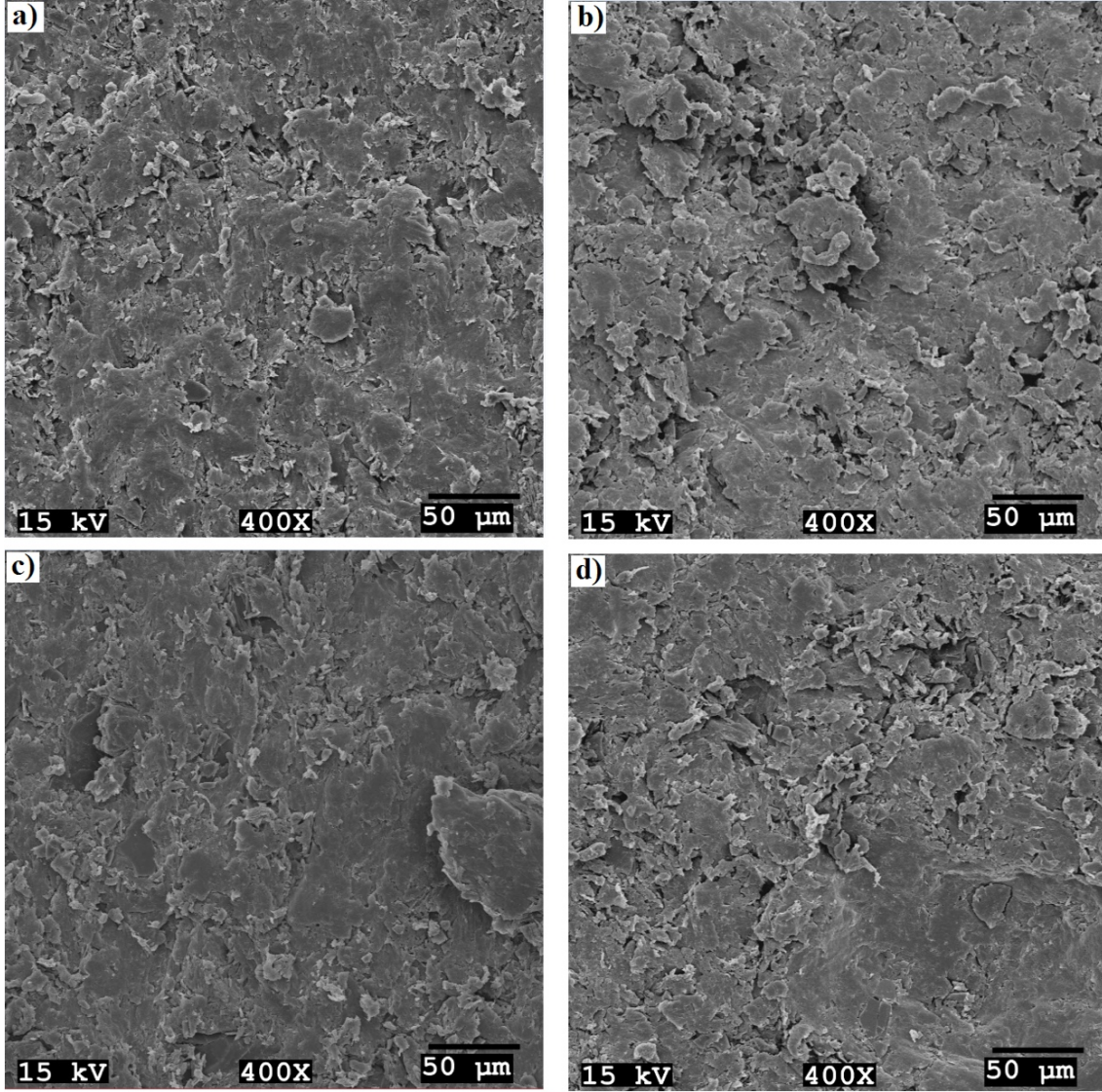
şiddetinin arttığı ve yüzeyin dikkate değer plastik deformasyona uğradığı Şekil 8.7.d'den görülmektedir.



Şekil 8.8. PTFE+%25 cam fiber kompozit malzemesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey SEM fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 1 bar basınç ve 45° çarpma açısı, c) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 45° çarpma açısı

Şekil 8.8.a incelendiğinde %24 cam fiber ile takviye edilmiş PTFE kompozit malzemenin 1 bar basınç altında ve 15° çarpma açısında garnet ile erozyona uğratılması sonucunda yüzeyde çiziklerin meydana geldiği ve küçük parçacıklar halinde aşınma parçacıklarının oluştuğu görülmektedir. Basıncında 1 bar sabit tutulup çarpma açısının 45°'ye değiştirilmesi ile yüzeydeki mikro çatlakların ve plastik deformasyonun arttığı Şekil 8.8.b'den görülmektedir. Çarpma açısının 15° yapıp basının 2 bar seviyesine

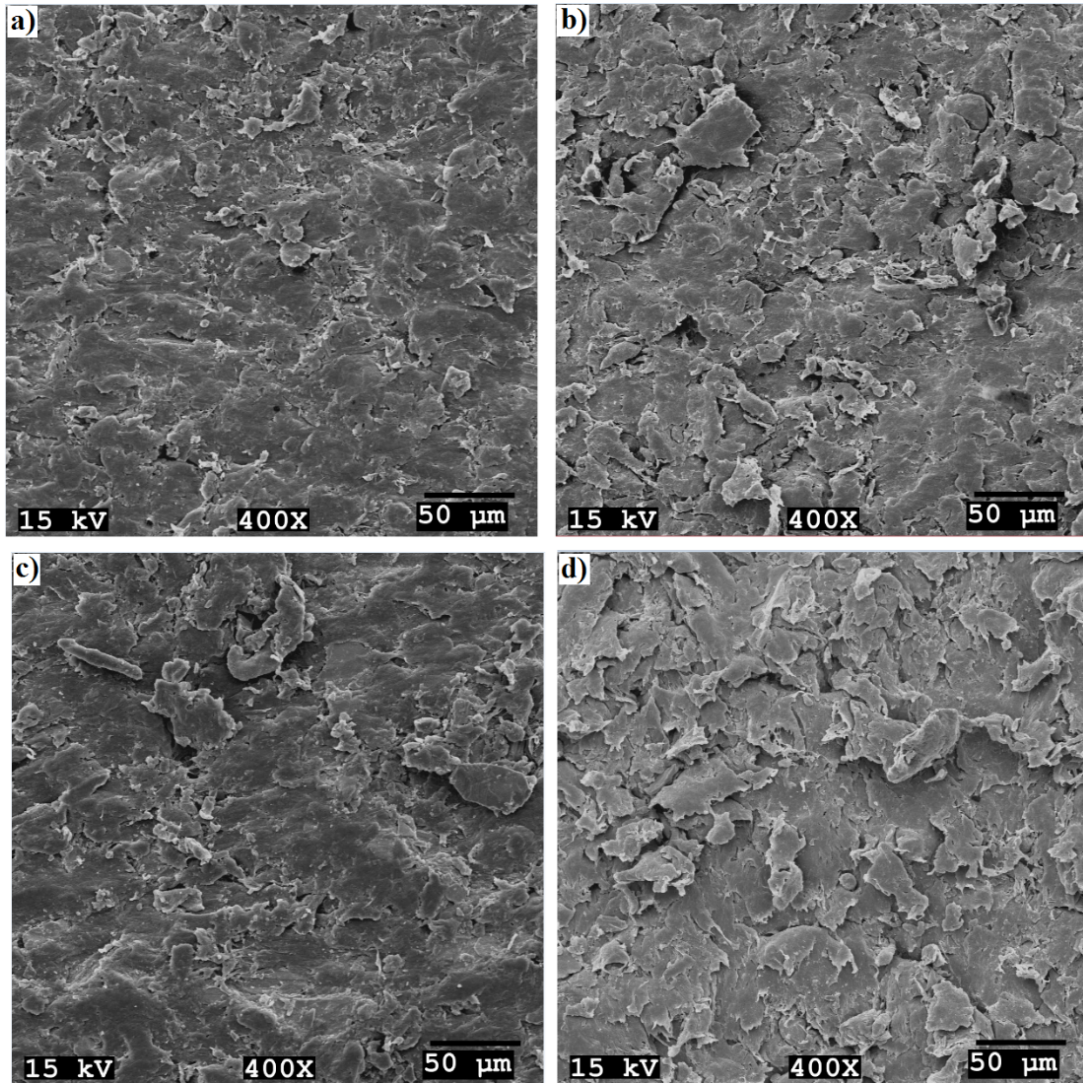
çıkartılmasıyla numune yüzeyinde parçalanmanın ve aşınmanın arttığı görülmektedir (Şekil 8.8.c). Basıncın 2 barda sabit tutulup çarpma açısının 45°'ye çıkartılması ile aşındırıcı garnet parçacıklarının yüzeyde meydana getirdiği tahribatın arttığı ve bunun sonucu olarak daha fazla aşınma parçacıklarının oluştuğu görülmektedir (Şekil 8.8.d).



Şekil 8.9. PTFE+%35 karbon partikül kompozit malzemesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey SEM fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 1 bar basınç ve 45° çarpma açısı, c) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 45° çarpma açısı

Şekil 8.9.a incelendiğinde %35 karbon fiber takviye edilmiş PTFE kompozit malzemesinin 1 bar basınçta ve 15° çarpma açısındaki erozyon deneyin sonrasında yüzeyin SEM fotoğrafı görülmektedir. Bu fotoğrafta malzeme yüzeyinde eğik açı ile çarpan garnet aşındırıcı parçacıklarının çiziklere neden olduğu ve küçük parçacıklar

haline aşınmaların meydana geldiği görülmektedir. Çarpma açısının 45°'ye çıkartılmasıyla numune yüzeyinde daha geniş aşınma bölgelerinin oluştuğu ve aşınmanın şiddetinin arttığı görülmektedir (Şekil 8.9.b). Basıncın 2 bara çıkartılıp, çarpma açısının 15°'ye düşürülmesi ile numune yüzeyinde yırtılma mekanizması ile parçalanmanın ve çukurların oluştuğu görülmektedir (Şekil 8.9.c). Basıncın 2 barda sabit tutulup, çarpma açısının 45° yapılması ile numune yüzeyinin aşırı plastik deformasyonu uğradığı Şekil 8.9.d'den görülmektedir.

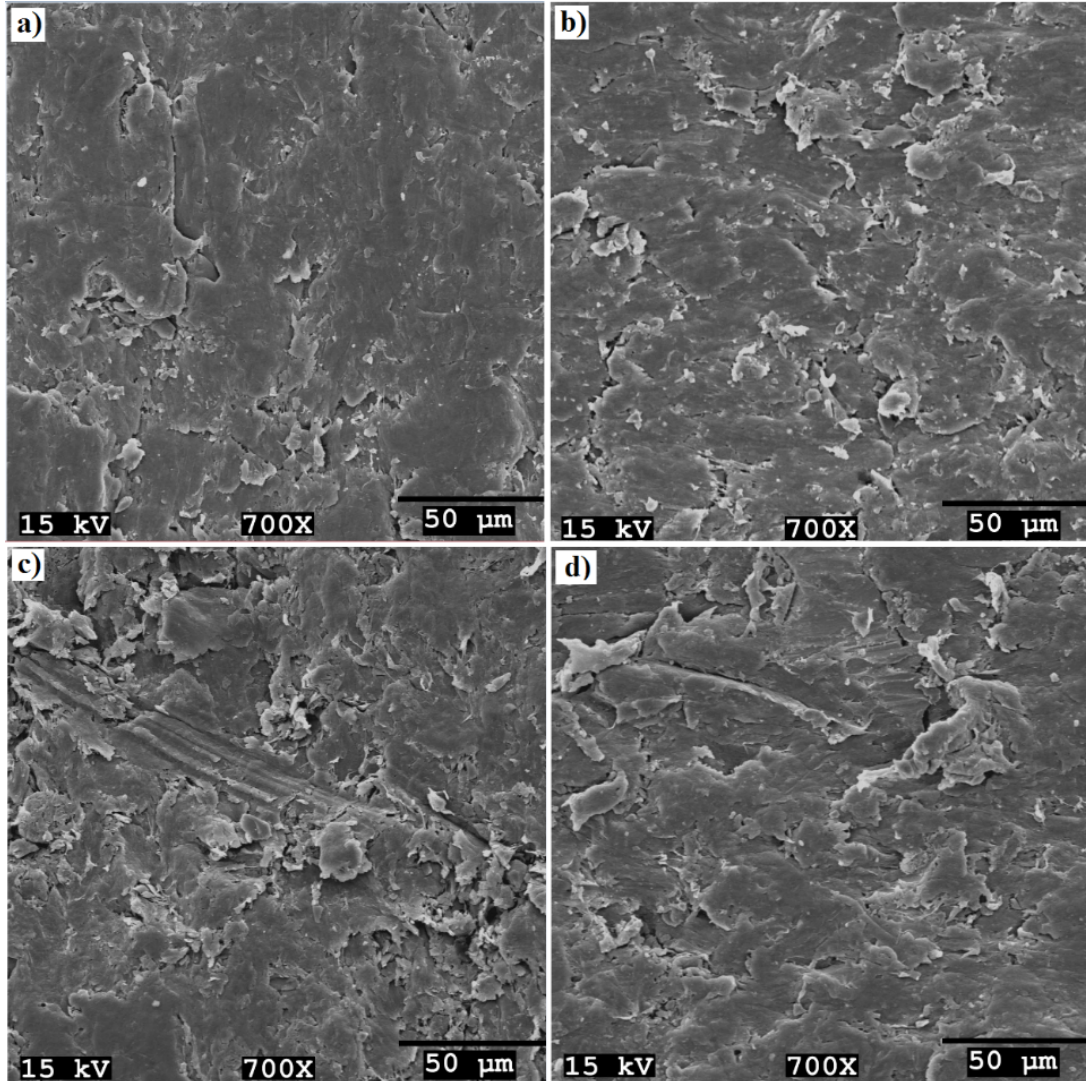


Şekil 8.10. PTFE+%60 bronz kompozit malzemesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey SEM fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 1 bar basınç ve 45° çarpma açısı, c) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 45° çarpma açısı

Şekil 8.10.a incelendiğinde %60 bronz takviye edilmiş PTFE kompozit malzemesinin 1 bar basınç ve 15° çarpma açısında yüzeyinden çekilen SEM fotoğrafı görülmektedir.

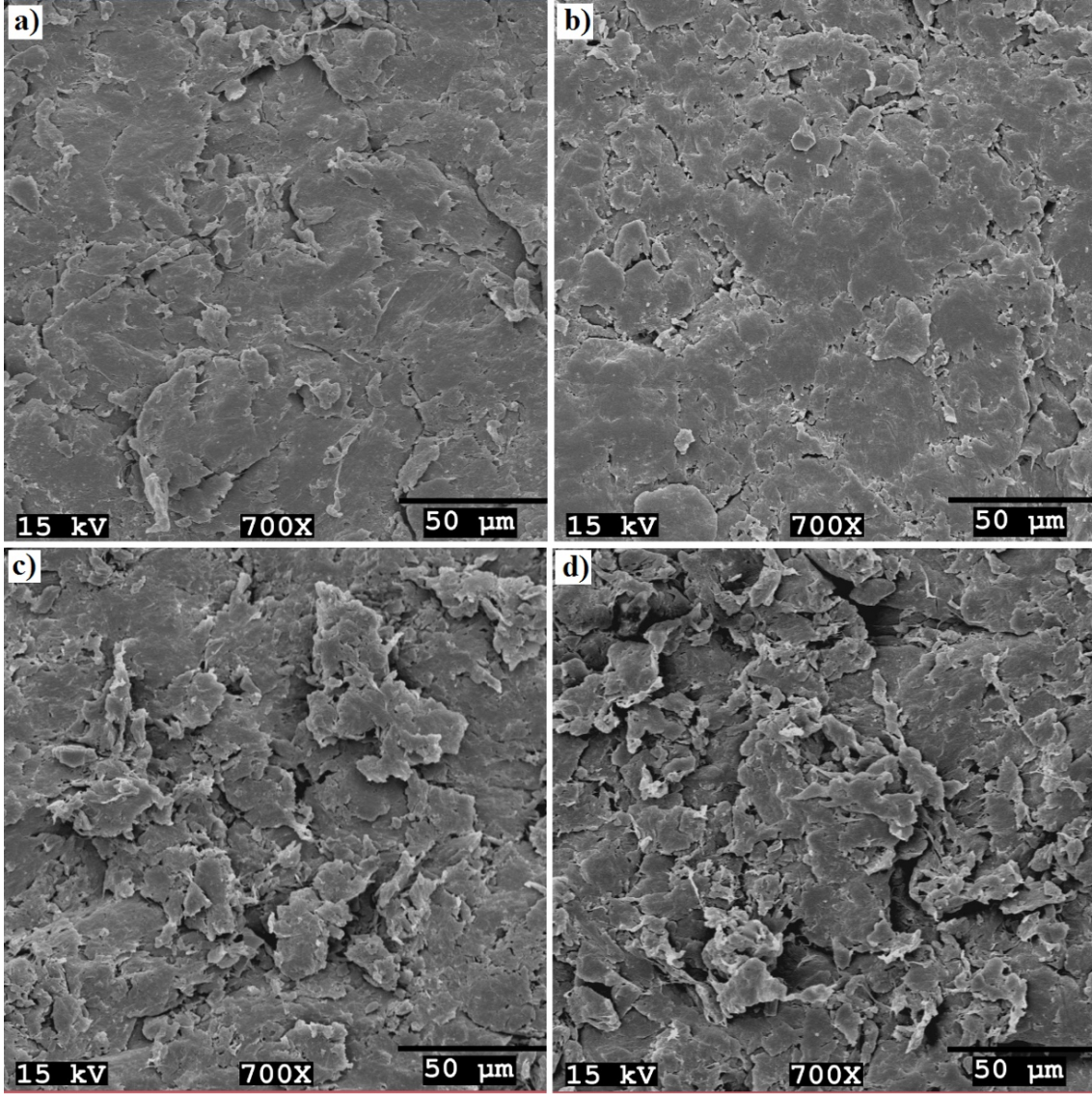
Şekilde görüldüğü üzere yüzeyde pek çok çizik ve küçük aşınma parçacıkları görülmektedir. Çarpma açısının 45°'ye çıkartılması ile garnet parçacıklarının yüzeyde meydana getirdiği aşınma etkisi artarak çatlakların oluşmasına neden olduğu görülmektedir (Şekil 8.10.b). Basıncın 2 bar yapıp çarpma açısının 15°'ye düşürülmesi ile yüzeyde olukların oluştuğu görülmektedir (Şekil 8.10.c). Basıncın 2 barda sabit tutulup çarpma açısının 45°'ye çıkartılması ile numune yüzeyinde pek çok parçalanmanın meydana geldiği görülmektedir (Şekil 8.10.d).

Numunelerin sabit 1 bar basınç altında 15° ve 45° çarpma açılarında dört numunenin erozyona uğramış yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.11. Sabit 1 bar basınç altında 15° çarpma açısında yapılan erozyon deneylerinden elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli ve d) %60 bronz takviyeli

Şekil 8.11’de 1 bar basınç altında erozyona maruz bırakılmış numunelerin SEM fotoğrafları karşılaştırılmalı olarak incelendiğinde saf PTFE ve %25 cam takviyeli numunelerde çok derin aşınma izleri görülmemektedir. %35 karbon takviyeli numunede ise (Şekil 8.11.c) aşındırıcı garnet parçacıkları numune yüzeyinde derin abrazif çizikler oluşturmuştur. Aynı etki %60 bronz takviyeli numune yüzeyinde de gözlemlenmiştir (Şekil 8.11.d).

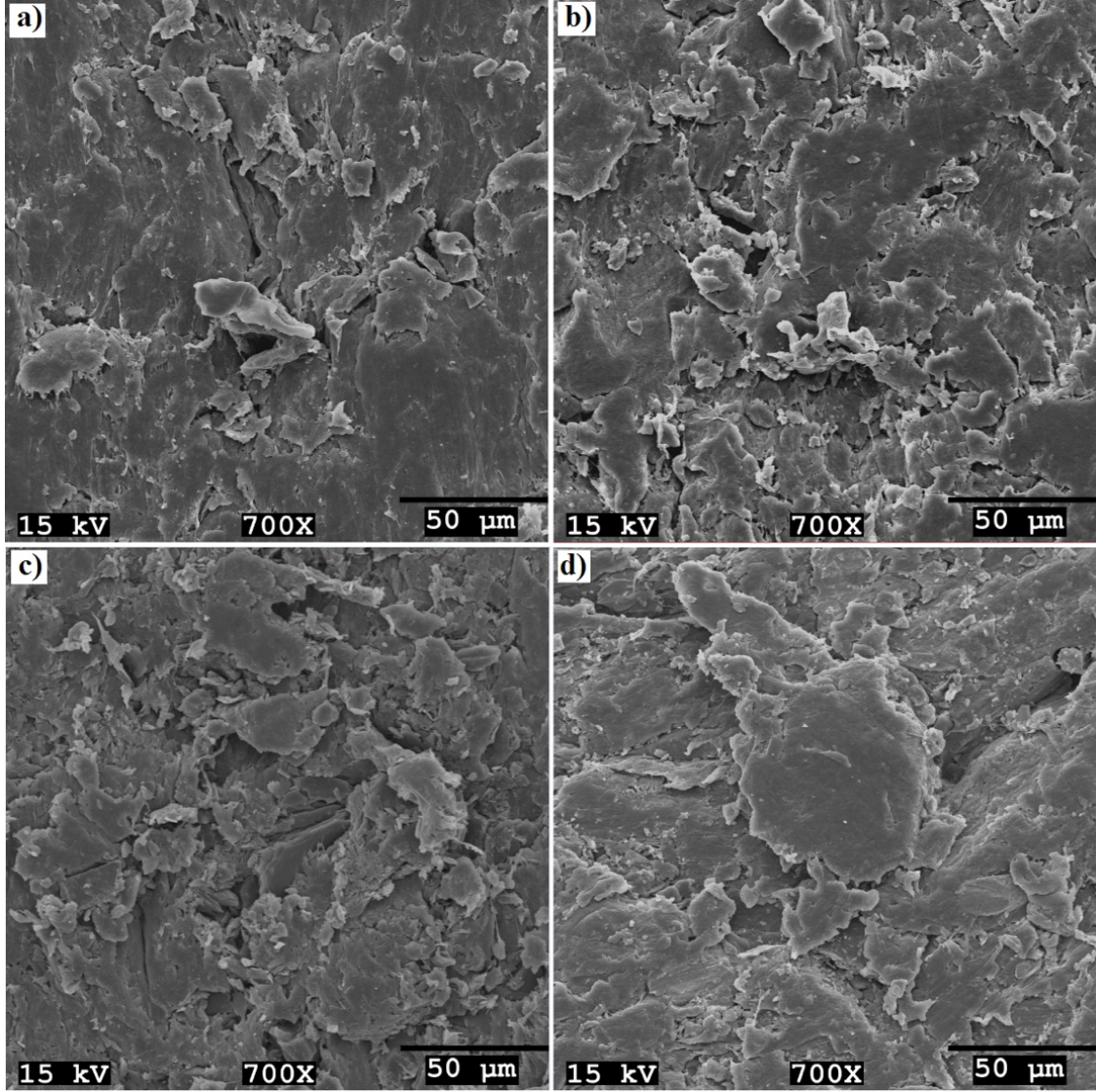


Şekil 8.12. Sabit 1 bar basınç altında 45° çarpma açısında yapılan erozyon deneylerinden elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları, a a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli ve d) %60 bronz takviyeli

Şekil 8.12 incelendiğinde çarpma açısının 45°’ye çıkartılması ile saf PTFE (Şekil 8.12.a) ve %25 cam takviyeli numune (Şekil 8.12.b) yüzeylerinde mikro düzeyde çatlaklar ve

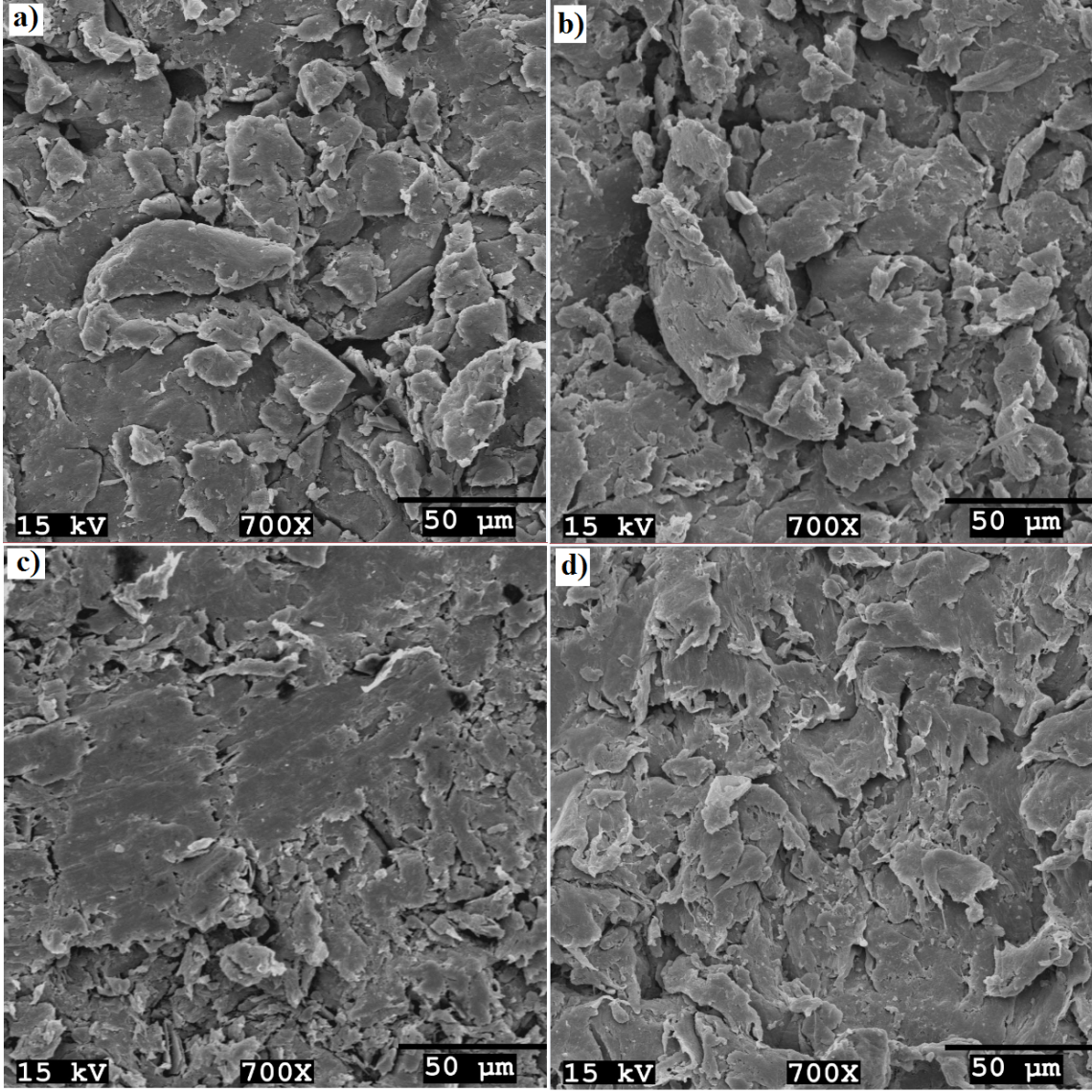
kesilmeler görülmektedir. %35 karbon (Şekil 8.12.c) ve %60 bronz (Şekil 8.12.d) takviyeli numunelerde ise daha büyük çatlaklar, parçalanmalar ve çizikler gözlenmiştir.

Numunelerin sabit 2 bar basınç altında 15° ve 45° çarpma açılarında erozyona uğramış yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.13. Sabit 2 bar basınç altında 15° çarpma açısında yapılan erozyon deneylerinden elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli ve d) %60 bronz takviyeli

Şekil 8.13'ten Saf PTFE ve %25 cam katkılı kompozit numunelerin yüzeylerinde pek çok mikro çatlak ve iki cisimli abrazyon izleri gözlenmiştir. Şekil 8.13.c (%35 karbon takviyeli) ve Şekil 8.13.d'de (% 60 bronz takviyeli) ise çiziklerin derinliği artmış ve daha büyük çatlakların oluştuğu gözlenmiştir.

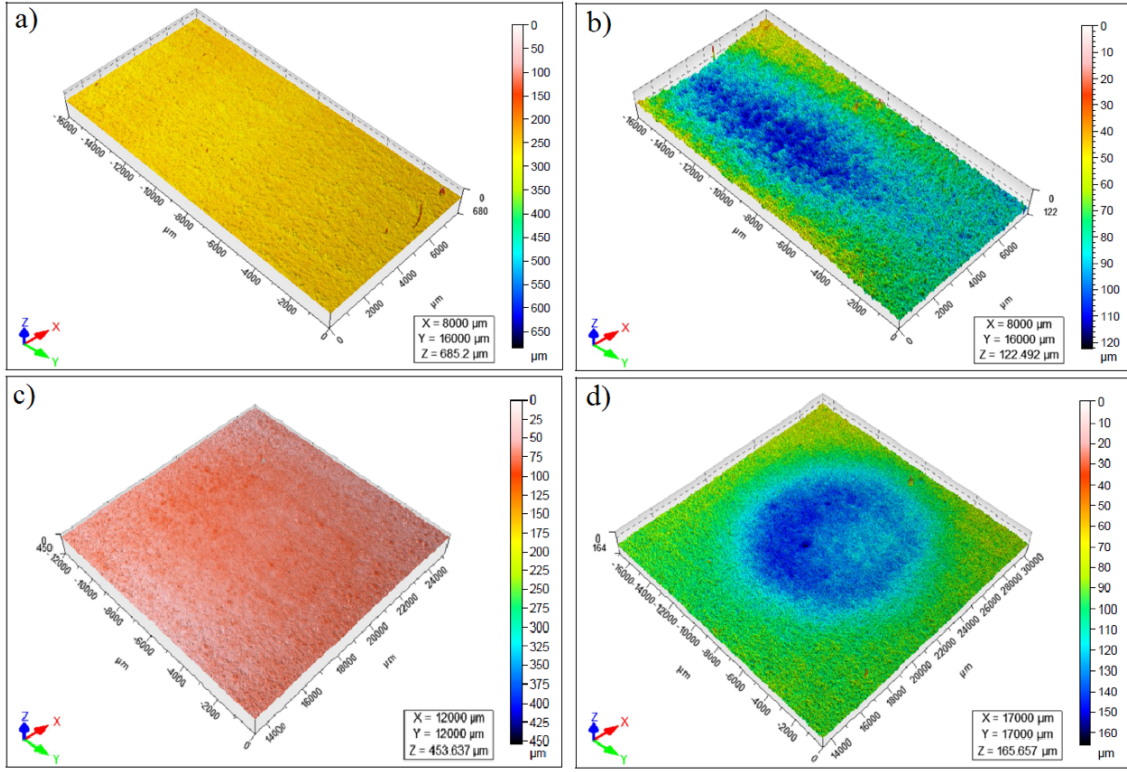


Şekil 8.14. Sabit 2 bar basınç altında 45° çarpma açısında yapılan erozyon deneylerinden elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli ve d) %60 bronz takviyeli

Şekil 8.14.a'da saf PTFE malzeme yüzeyinin aşırı hasara uğradığı görülmektedir. Şekil 8.14.b'de %25 cam takviyeli numunede yine abrazyon etkisi mikro çatlaklar ve kesilmeler şeklinde gözlenmiştir.

%35 karbon takviyeli numune (Şekil 8.14.c) ve %60 bronz takviyeli (Şekil 8.14.d) numuneler de ise gevrek kırılmaların ve talaş şeklinde malzeme aşınmalarının etkin olduğu görülmektedir.

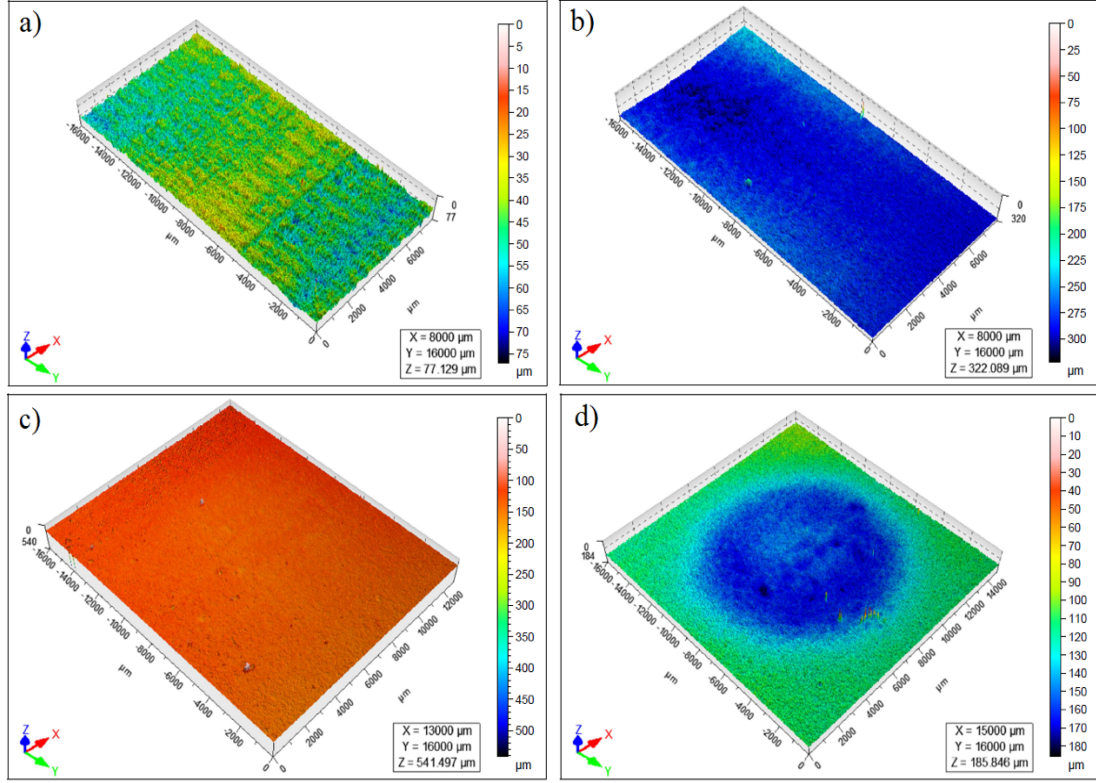
8.3. Optik Profilometre Analizleri



Şekil 8.15. Saf PTFE numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey optik profilometre fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı, c) 1 bar basınç ve 90° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 90° çarpma açısı

Şekil 8.15.a incelendiğinde 1 bar basınç ve 15° çarpma açısında saf PTFE yüzeyinde garnet aşındırıcı parçacıkların aşırı bir aşınmaya neden olmadığı görülmektedir. Basıncın aynı çarpma açısında (15°) sabit tutulup, basıncın 2 bar seviyelerine getirilmesi ile numune yüzeyinde dikkate değer bir aşınmaya neden olduğu görülmektedir (Şekil 8.15.b).

Şekil 8.15.c'ye bakıldığında basıncın 1 bar seviyelerinde tutulup, çarpma açısının 90° 'ye ayarlanması ile numune yüzeyinde hafif dairesel bir aşınma yüzeyinin oluştuğu görülmektedir. Çarpma açısının 90° 'de sabit tutulup basıncın 2 bar seviyelerine çıkartılması ile yüzeyde dikkate değer bir derinlikte aşınma kraterinin oluştuğu görülmektedir (Şekil 8.15.d).

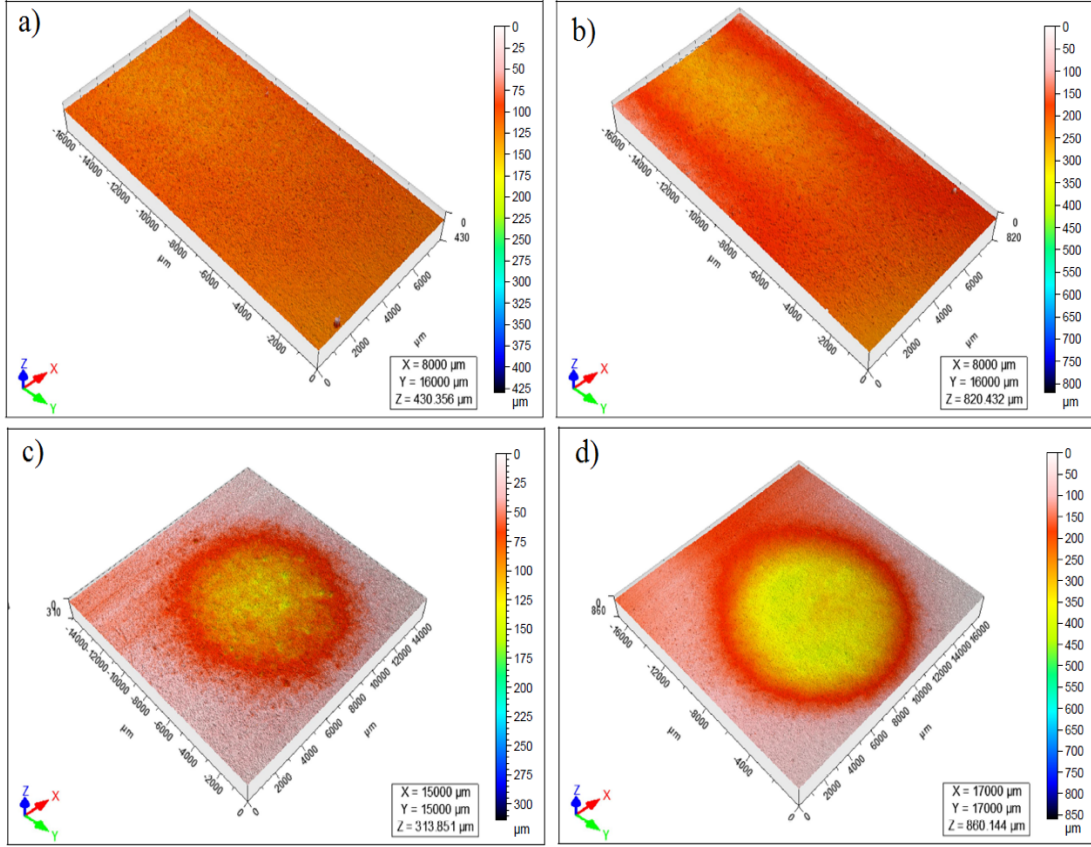


Şekil 8.16. PTFE+%25 Cam Fiber kompozit numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey optik profilometre fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı, c) 1 bar basınç ve 90° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 90° çarpma açısı

Şekil 8.16.a incelendiğinde kompozit PTFE+%25 cam fiber yüzeyine 1 bar basınç ve 15° çarpma açısında yapılan erozyon aşınma deneyinde aşındırıcı garnet parçalarının yüzeyi kazıma şeklinde kestiği görülmektedir.

Çarpma açısının 15° 'de sabit tutulup basıncın 2 bar seviyelerine çıkartılması ile garnet aşındırıcı tozların yüzeyi daha derin bir şekilde deformasyona uğrattığı görülmektedir (Şekil 8.16.b).

Çarpma açısının 90° 'ye yükseltilmesi ile ve basıncın 1 bar basınca düşürülmesi ile numune yüzeyinde dairesel hafif bir aşınma yüzeyinin elde edildiği Şekil 8.16.c'de görülmektedir. Çarpma açısının 90° 'de sabit tutulup basıncın 2 bar seviyelerine çıkartılması ile numune yüzeyinde derin bir kraterin oluşmuştur (Şekil 8.16.d).

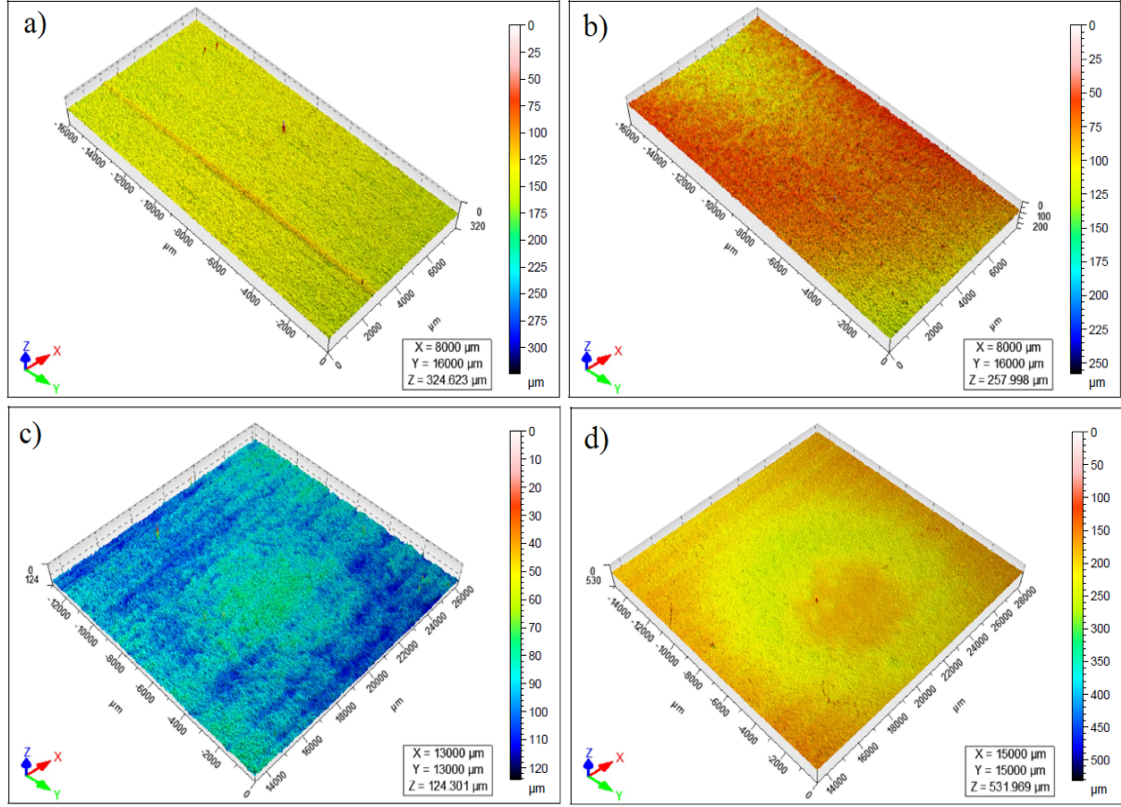


Şekil 8.17. PTFE+%35 Karbon kompozit numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey optik profilometre fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı, c) 1 bar basınç ve 90° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 90° çarpma açısı

Şekil 8.17.a incelendiğinde PTFE+%35 karbon takviyeli kompozit numunenin 1 basınç altında ve 15° çarpma aşınmasında hafif aşınma davranışı gösterdiği görülmektedir.

Çarpma açısının 15° 'de sabit tutulup, basıncın 2 bar seviyelerine çıkartılması ile göreceli olarak aşınmanın arttığı Şekil 8.17.b'den görülmektedir. Basıncın 1 bar tutulup ve çarpma açısının 90° 'ye çıkartılması ile belirgin bir aşınma dairesinin oluştuğu Şekil 8.17.c'den görülmektedir.

Çarpma açısının 90° 'de sabit tutulup basıncın 2 bar seviyelerine çıkartılması ile daha derin bir ve krater görünümünde aşınma bölgesinin oluştuğu Şekil 8.17.d'de görülmektedir.



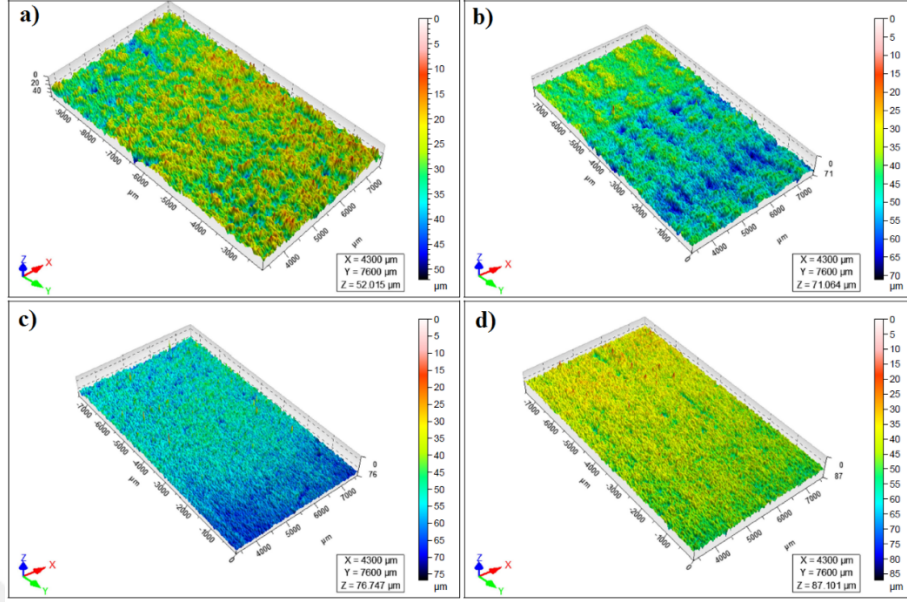
Şekil 8.18. PTFE+%60 Bronz kompozit numunesinin erozyon deneyleri sonrasındaki yüzey optik profilometre fotoğrafları; a) 1 bar basınç ve 15° çarpma açısı, b) 2 bar basınç ve 15° çarpma açısı, c) 1 bar basınç ve 90° çarpma açısı ve d) 2 bar basınç ve 90° çarpma açısı

Şekil 8.18.a incelendiğinde PTFE+%60 bronz takviyeli kompozit malzemenin 15° çarpma açısında ve 1 bar basınçta hafif derecede çizgiler şeklinde aşındığı görülmektedir. Çarpma açısının 15°'de sabit tutulup basıncın 2 bar seviyelerine çıkartılması ile numune yüzeyinde daha fazla bir aşınmanın olduğu görülmüştür (Şekil 8.18.b).

Çarpma açısının 90°'ye çıkartılıp basıncın 1 bar seviyelerine ayarlandığında, numune yüzeyinde dairesel bir aşınma bölgesinin oluştuğu görülmektedir (Şekil 8.18.c).

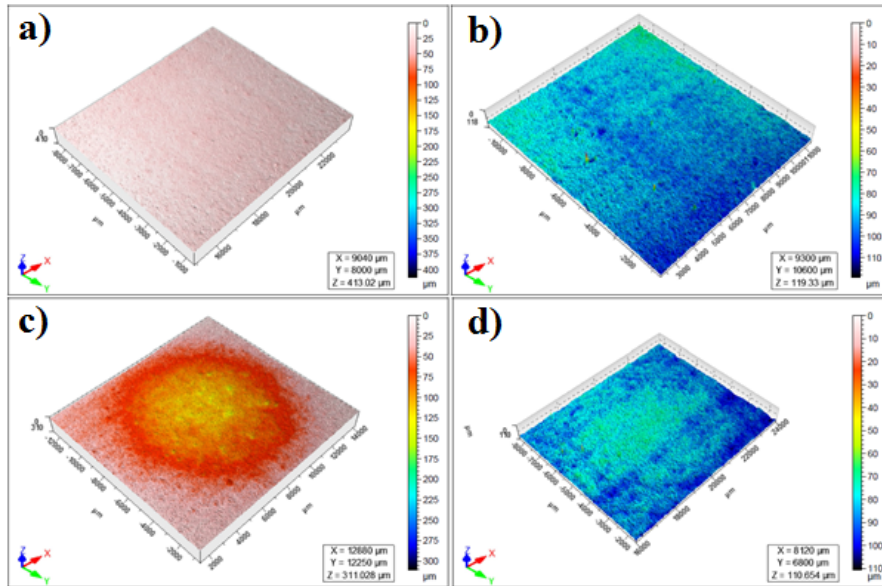
Şekil 8.18.d'de ise çarpma açısının 90°'de sabit tutulup, basıncın 2 bar seviyesine çıkartılması ile daha derin krater şeklinde bir aşınma bölgesinin oluştuğu görülmektedir.

1 bar sabit basınçta ve 15° ve 90° çarpma açılarında yapılan deneylerden elde edilen optik profilometre görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.19. Sabit 1 bar basınçta ve 15° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonucunda elde edilen optik Profilometre görüntüleri, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli, d) %60 bronz takviyeli

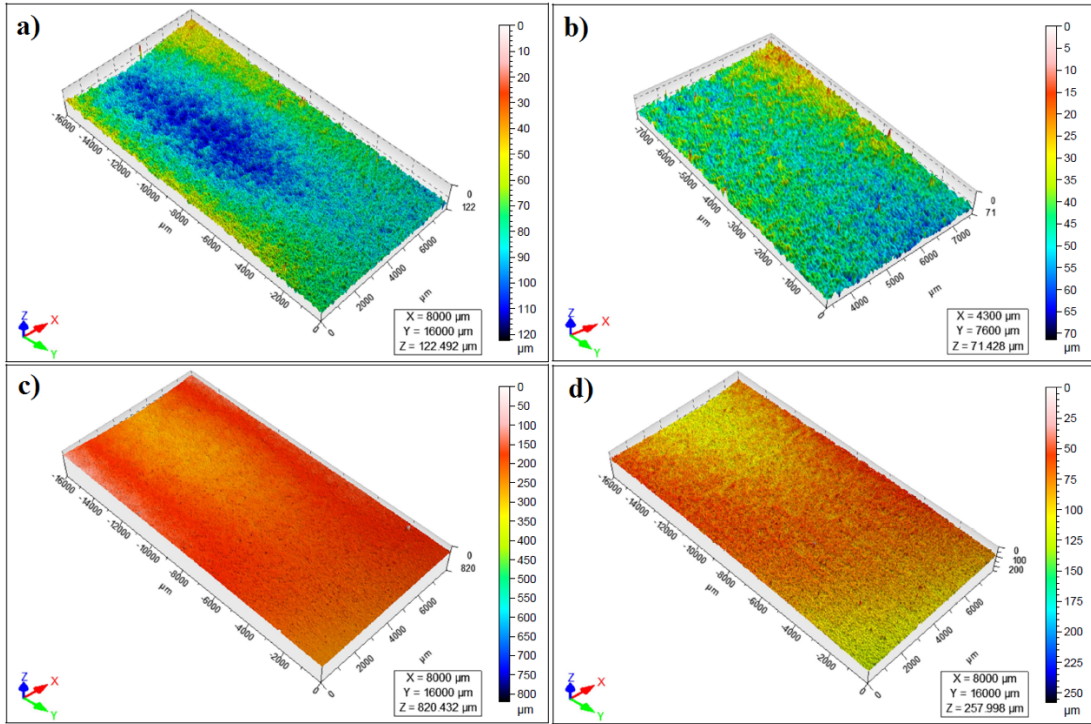
Şekil 8.19'dan görüldüğü üzere bütün numunelerin yüzeylerinde düşük miktarda aşınma bölgelerinin olduğu görülmektedir. Şekil 8.19.a ve Şekil 8.19.b'de görüldüğü üzere aşınma miktarı düşük olduğu için yüzey topografyasında lokal etkiler görülürken, Şekil 8.19.c ve Şekil 8.19.d'de görüldüğü üzere daha genele yayılmış bir aşınma görüntüsü elde edilmiştir.



Şekil 8.20. Sabit 1 bar basınçta ve 90° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonucunda elde edilen optik Profilometre görüntüleri, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli, d) %60 bronz takviyeli

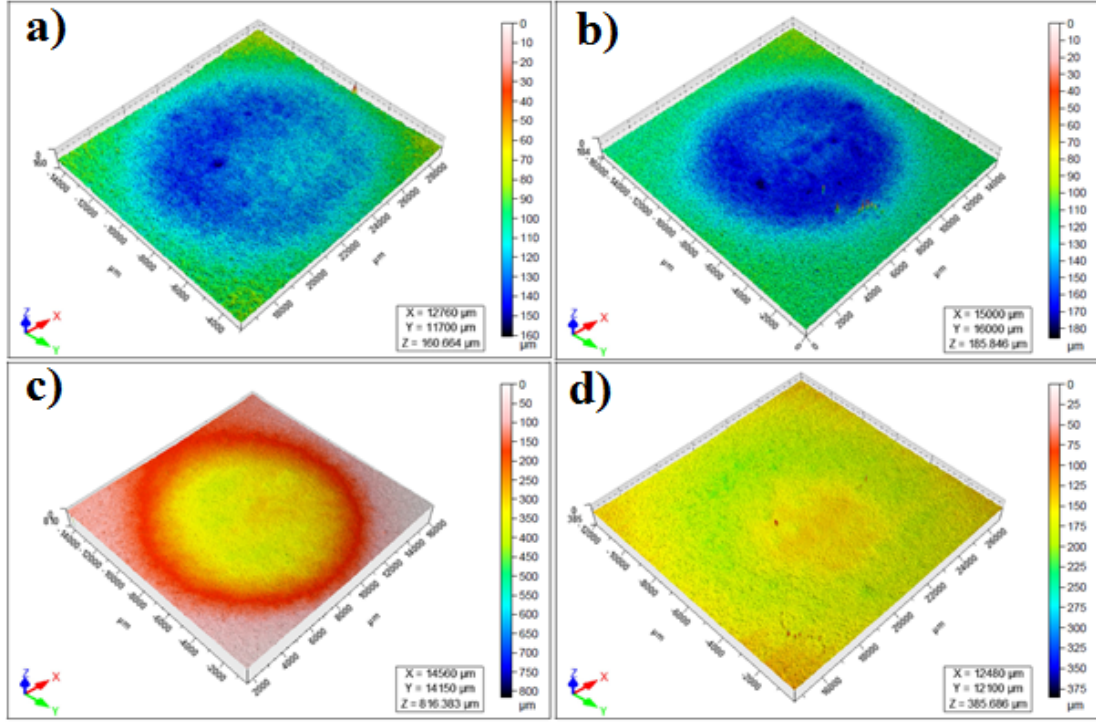
Şekil 8.20.a ve 8.20.b’de görüldüğü üzere saf PTFE ve %25 cam takviyeli numunelerde düşük erozyon aşınma oranları sebebiyle yüzeyde çok belirgin olmayan bir aşınma bölgesi görüntüsü elde edilmiştir. Şekil 8.20.c’de %35 karbon takviyeli numuneye ait optik profilometre fotoğrafına bakıldığında ise yüksek aşınma oranına bağlı olarak yüzeyde derin bir krater oluştuğu görülmektedir. %60 bronz takviye edilmiş numunede ise aşınma miktarı düşüğünden derin olmayan bir kraterin oluştuğu Şekil 8.20.d de görülmektedir.

Sabit 2 bar basınçta ve 15° ve 90° çarpma açılarında yapılan deneylerden elde edilen optik profilometre görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.21. Sabit 2 bar basınçta ve 15° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonucunda elde edilen optik Profilometre görüntüleri, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli, d) %60 bronz takviyeli

Şekil 8.21’de verilen optik profilometre fotoğraflarında görüldüğü üzere PTFE malzemesine uygulanan erozyon deneyi sonucunda elips şeklinde bir aşınma görüntüsü oluşmuştur. Aynı deney şartlarında %25 cam takviyeli numunede ise yüzeyde daha geniş alana yayılan bir aşınma görüntüsü oluşmuştur. %35 karbon takviye edilmiş numunede ise tekrar merkez de elips şeklinde aşınma bölgesi oluşmuştur. %60 bronz takviyeli numunede yine geniş alana yayılan bir aşınma bölgesi oluşmuştur (Şekil 8.21.d).



Şekil 8.22. Sabit 2 bar basınçta ve 90° çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonucunda elde edilen optik Profilometre görüntüleri, a) Saf PTFE, b) %25 cam takviyeli, c) %35 karbon takviyeli, d) %60 bronz takviyeli

Şekil 8.22’de verilen 2 bar sabit basınç ve 90° çarpma açısında elde edilen optik profilometre görüntüleri ışığında saf PTFE malzemesinin yüzeyinde krater şeklinde bir erozyon aşınması şekli olduğu görülmektedir. Aynı şartlarda %25 cam takviyeli kompozit malzemenin optik profilometre görüntüsü incelendiğinde, aşınmanın etkisinin arttığı ve saf PTFE malzemesine göre daha derin bir kraterin olduğu Şekil 8.22.b’de görülmektedir. Şekil 8.22.c incelendiğinde, numunenin %35 karbon elyaf olarak değiştirilmesi ile diğer numuneler ile karşılaştırıldığında en derin eroziv aşınma yüzeyinin olduğu görülmektedir. %60 bronz takviyeli numunenin eroziv aşınma optik profilometre görüntüsü incelendiğinde PTFE ve %25 cam takviyeli numunelere göre daha derin, %35 karbon takviyeli kompozit malzemeye göre ise daha yüzeysel bir kraterin olduğu görülmektedir.

9. TARTIŞMA

Şekil 8.5 incelendiğinde 1 bar basınç altında 15° ve 30° çarpma aşılarda en düşük erozyon aşınması %25 cam takviyeli numune göstermiştir. 45° , 60° , 75° ve 90° çarpma açılarında ise en düşük erozyon aşınması saf PTFE numunesi göstermiştir. Şekil 8.6 incelendiğinde basıncın 2 bar seviyesine çıkartılması ile 15° çarpma aşınmasında en düşük erozyon aşınması saf PTFE malzemesi gösterirken diğer çarpma açılarında en düşük erozyon aşınması PTFE ve %25 cam (yaklaşık olarak aynı oranda) katkılı numunelerden elde edildiği görülmektedir. Malzemelerin erozyon aşınmasında çarpma hızı ve açısı, ortam sıcaklığı, malzemelerin gevrek, sünekliği ve yüzey morfolojisi gibi pek çok parametre etkindir. Sünek malzemeler düşük çarpma açılarında daha fazla erozif aşınmaya uğrarken, gevrek malzemeler yüksek açılarda maksimum erozif aşınmaya uğrarlar (Kumar ve diğ. 2020). Katı parçacık erozyonu, erozyon oranının çarpma açısı ile değişimine bağlı olarak gevrek ve sünek aşınma olarak kategorize edilmektedir. Burada çarpma açısı erozif aşınmaya neden olan katı parçacığın yörüngesi ile numune yüzeyi arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır. Eğer erozyon aşınması düşük açılarda (10° - 30°) çok yüksek çıkarsa, malzemenin göstermiş olduğu bu davranış sünek olarak ifade edilir. 30° - 60° çarpma açılarında aşınma yüksek çıkarsa sünek-gevrek aşınması, eğer erozyon oranı çarpma açısıyla beraber artar ve 90° 'de maksimuma ulaşırsa malzemenin göstermiş olduğu bu davranış gevrek olarak ifade edilir. İdeal etkileşim şartlarında erozyon aşınmasının şiddeti katı parçacığın çarpma hızının normal ve yatay bileşenleri ile belirlenir (Biswas, Satapathy, ve Patnaik 2010). Ancak burada ifade edilen hususlar mutlak her zaman geçerli olan durumlar değildir. Çünkü literatürde bu konuda henüz bir konsensüs oluşmuş değildir. Örneğin küresel parçacıklar aşınma partikülü olarak kullanıldığında erozyon aşınması sünek malzemelerde bile 90° 'de maksimum olmaktadır. Benzer şekilde gevrek malzeme olan inorganik camlar çok ince aşındırıcı parçacıklar ile erozyona uğratıldıklarında sünek aşınma davranışı gösterirler (Biswas, Satapathy, ve Patnaik 2010). Düşük çarpma açılarından erozyon deneyine tabi tutulan malzemelerde ana aşınma mekanizmaları yırtılma, kesme, kazıma ve talaş oluşmasıyken, gevrek malzemelerde 90 derece çarpma açısında aşınma mekanizması çatlak oluşumu şeklindedir. Erozyon parçacığı numune yüzeyine düşük açılarda vurduğunda, çarpma kuvveti iki bileşene ayrılır. Bileşenlerden bir tanesi numune yüzeyine paralel olur ve diğeri ise dikey olur. Bileşenlerden paralel olan abrasive aşınmaya neden olurken, diğeri

ise çarpma kavramını kontrol eder. Çarpma açısı 90° 'ye kaydığında yatay kuvvetin etkisi azalırken, dikey kuvvet en etkin hale gelir (Sınmazçelik ve Taşkıran 2007). Gevrek erozyon aşınma modunda aşınma, çatlak oluşumu neticesinde meydana gelmektedir. Gevrek bir malzeme sert bir parçacık tarafından erozyona uğratıldığında, temas alanı yüksek bası ve kayma gerilmeleri nedeniyle plastik deformasyon uğrar ve bu şekilde radyal çatlaklar oluşur. Bu işlem esnasında çarpma gerçekleştikten sonra, plastik deformasyon büyük çekme gerilmelerine yol açarak yanal çatlaklar oluşturup aşınma olayının meydana gelmesine sebebiyet verir (Biswas, Satapathy, ve Patnaik 2010).

Yukarıda ifade edilen hususlar neticesinde, Saf PTFE malzemesinin Şekil 8.1'deki erozyon oranlarına bakıldığında ve diğer numuneler ile birlikte karşılaştırıldığı Şekil 8.5 ve 8.6'ya bakıldığında düşük erozyon aşınması değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni saf haldeki PTFE malzemesinin maruz kaldığı erozyon parçacıklarına daha fazla direnç göstermesidir. Özellikle düşük çarpma açılarında yüzeye çarpan garnet aşınma parçacıklarının oluşturmuş oldukları gerilme, malzemenin plastik deformasyon dayanım değerlerinin altında kaldığını ve bu nedenle sınırlı etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca düşük açı değerlerinde hedef yüzeye gelen garnet aşınma parçacıklarının sahip oldukları kinetik enerjilerinin yatay bileşeninin dikey bileşenine göre daha etkin olduğu ve yüzeyde hafif şiddette çizikler ile sınırlı aşınmaya sebep olduğu Şekil 8.7a ve b, 8.11 ve 8.12'deki SEM fotoğrafları ve Şekil 8.15 ve 8.19'daki optik profilometre fotoğrafları ışığında düşünülmektedir. Basıncın 2 bar seviyesine çıkartılması ile yukarıdaki anlatılan mekanizmaların şiddetinin aşındırıcı parçacıkların kinetik enerjilerinin artması nedeniyle daha fazla artarak erozyon aşınmasını artırdığı Şekil 8.7 c-d, 8.13 ve 8.14 SEM fotoğrafları ile Şekil 8.15 b-d ve 8.20 optik profilometre fotoğrafları ışığında düşünülmektedir.

%25 oranında cam fiber takviye edilmiş PTFE kompozit malzemesinin 1 bar basınç seviyesindeki erozyon aşınması davranışı analiz edildiğinde göze ilk çarpan sonucun 15° ve 30° çarpma açılarında saf PTFE malzemedan daha düşük aşınma davranışı gösterdiği ve çarpma açısının arttırılması ile saf PTFE numunelerinden daha fazla aşınma oranı gösterdiği (Şekil 8.2 ve 8.5). Kompozit haldeki malzemenin, saf haldeki PTFE malzemesinden daha fazla aşınmış olmasının yapıya giren cam takviye elemanları ile matris arasındaki bağın yeterli yapışkanlıkta olmaması ile ilişkili olduğu

düşünülmektedir. Literatürde yapılan pek çok çalışmadan elde edilen sonuçların hali hazırdaki bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir (Shahapurkar ve diğ. 2021). Aynı numunenin değişen çarpma açıları ile erozyon oranlarındaki değişime bakıldığında düşük açılarda hedef malzeme yüzeyinde kesme kuvveti ile malzemeyi aşındırdığı açının 45° çıkartılması ile aşınma değerlerinin maksimuma ulaştığı ve açının 90° artırılması ile erozyon oranının düştüğü tipik bir sünek-gevrek erozyon aşınması davranışı gösterdiği aynı şekillerden görülmüştür. Basıncın 2 bara çıkartıldığı numunelerde aşındırıcı parçacıkların hedef malzeme yüzeyini düşük 15° - 30° çarpma açılarında çizerek aşındırdığı (Şekil 8.8), 45° ve üzerinde ise kazıma mekanizmasının etkin olduğu ve bu nedenle aşınmanın çok yüksek olmasının bununla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Aynı numunede artan çarpma açısı ile birlikte yüzeyde belirgin bir krater görünümüne sahip aşınma bölgesinin olduğu (Şekil 8.16) aynı zamanda numune yüzeyinde aşınma parçacıklarının tekrarlı çarpmalarından dolayı numune yüzeyinden kopmayan ancak plastik deformasyon ile birlikte malzemenin yer değiştirmesi sonucu ana malzemenin özelliklerinden farklı bir deformasyon tabakasının oluşturduğu düşünülmektedir.

%35 oranında karbon ile takviye edilmiş PTFE kompozit malzemesinin erozyon davranışı Şekil 8.3, 8.5, 8.6, 8.9, 8.11, 8.12, 8.13, 8.14, 8.17, 8.19, 8.20, 8.21 ve Şekil 8.22'den incelendiğinde diğer numunelere oranla en fazla aşınma maruz kalan numune olduğu görülmektedir. Bu numunede de yapıya takviye elemanının eklenmesinin saf PTFE malzemesinin erozyon direncini düşürdüğü düşünülmektedir. Bu davranışın takviye elemanları ile matris malzemesinin ara yüzey mukavemetlerinin yeterli seviyede olmamasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Aynı şekiller incelendiğinde 45° çarpma açısında en yüksek aşınma oranı elde edildiği görüldüğünden sergilemiş olduğu aşınma mekanizmasının sünek-gevrek olduğu düşünülmektedir. Bu numunede de düşük açılarda garnet aşınma parçacıklarının numune yüzeyinden kesme kuvveti ile malzeme kopardığı, çarpma açısının artırılması ile numune yüzeyinde diğer numunelerden daha geniş krater görünümlü bir aşınma bölgesinin oluşturduğu görülmektedir (Şekil 8.21-8.22). Bu durumun numune yüzeyine aşınma parçacıklarının dik açı ile gelmesiyle sahip oldukları kinetik enerjinin numune yüzeyine paralel olan bileşenin etkisinin azalmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

%60 oranında bronz ile takviye edilmiş PTFE kompozit malzemesinin erozyon davranışı analiz edildiğinde aşınma miktarının saf PTFE malzemesine göre yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 8.5-8.6). Bu durumun aşırı miktarda takviye elemanından ve takviye elemanı ile matris malzemesi arasındaki bağın zayıf olması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Aşınma oranı değerlerine bakıldığında en fazla aşınma miktarının 45° çarpma açısında görüldüğünden sünek-gevrek aşınma mekanizmasının bu numunede de etkin olduğu düşünülmektedir (Şekil 8.4-8.6). Şekil 8.10'den SEM fotoğrafları incelendiğinde 15° çarpma açısında yüzeyde küçük çatlakların oluştuğu, çarpma açısının ve basıncın artmasıyla çatlakların büyüdüğü ve parçalanmanın arttığı görülmektedir. Şekil 8.11'te verilen SEM fotoğraflarından %60 bronz ile takviye edilmiş PTFE kompozit malzemenin saf PTFE ve %25 cam takviye edilmiş numunelere göre daha fazla abrazyon mekanizması ile aşındığı, %35 karbon ile takviye edilmiş numuneden ise daha ince kazıma etkisinin etkin olduğu görülmektedir. Çarpma açısının 45° olduğu Şekil 8.12'deki SEM fotoğraflarına bakıldığında, Saf PTFE ve %25 cam takviyeli numunelere göre daha baskın bir parçalanmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun yapıya eklenen bronzun matris fazı ile yeterli seviyede mekanik bir bağ oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı durum daha şiddetli olarak 2 bar basınç altında da gözlemlenmiştir (Şekil 8.13-8.14). Şekil 8.18, 8.19, 8.20, 8.21 ve 8.22 verilen optik profilometre fotoğraflarına bakıldığında, düşük açılarda elips şeklinde bir aşınma bölgesinin oluştuğu, çarpma açısının 90° çıkartılmasıyla krater görünümünde bir aşınma bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Bu durumun geometrik faktörlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada metal malzemelerin yerlerini alan PTFE ve onun kompozitleri olan PTFE+%25 cam fiber, PTFE+%35 karbon partikül ve PTFE+%60 bronz partikül takviyeli kompozitlerin garnet aşındırıcı parçacıkları altında göstermiş oldukları aşınma davranışları incelenmiştir. Deneyler 1 ve 2 bar basınç şartlarında ve 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 olmak üzere 6 değişik çarpma açısında gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkartılmıştır;

1. Saf PTFE polimeri en yüksek erozyon aşınması direnci gösteren malzemedir.
2. PTFE+%35 karbon takviyeli kompozit en düşük erozyon aşınma direnci gösteren malzemedir.
3. En yüksek aşınma oranı 45° çarpma açısı ile aşındırılmış numunelerde gözlenmiştir.
4. Bütün deney numunelerinde sünek-gevrek aşınma mekanizması etkindir.
5. Düşük çarpma açılarında çizik, mikro çatlaklar etkin aşınma iken, büyük çarpma açılarında kazıma, plastik deformasyon ve krater oluşumu ana aşınma davranışlarıdır.
6. Bütün numunelerde erozyon basıncının artırılması aşınma miktarını artırmıştır.
7. Saf PTFE numunesinin aşınma direnci kompozitlerine göre daha yüksektir.

KAYNAKLAR

- Abd-Elrhman, Y. M., A. Abouel-Kasem, K. M. Emara, ve S. M. Ahmed. 2014. 'Effect Of Impact Angle On Slurry Erosion Behavior And Mechanisms Of Carburized AISI 5117 Steel', *Journal Of Tribology*, 136 (1).
- Abraham, Thomas. 1992. 'The U.S. Ceramic-Matrix Composites Market In The 1990s', *JOM*, 44(6), 44-45.
- Agrawal, S., K. K. Singh, ve P. K. Sarkar. 2014. 'Impact Damage On Fibre-Reinforced Polymer Matrix Composite - A Review', *Journal Of Composite Materials*, 48 (3), 317-32.
- Ahmad, N., A. Kausar, ve B. Muhammad. 2016. 'Perspectives On Polyvinyl Chloride And Carbon Nanofiller Composite: A Review', *Polymer-Plastics Technology And Engineering*, 55 (10), 1076-98.
- Alabtah, Fatima Ghassan, Elsadig Mahdi, ve Faysal Fayezi Eliyan. 2021. 'The Use Of Fiber Reinforced Polymeric Composites In Pipelines: A Review', *Composite Structures*, (276), 114595.
- Antonioli, D., K. Sparnacci, M. Laus, L. Boarino, ve M. C. Righetti. 2015. 'Polycarbonate-Based Composites Reinforced By In Situ Polytetrafluoroethylene Fibrillation: Preparation, Thermal And Rheological Behavior', *Journal Of Applied Polymer Science*, (132), 32.
- Arabnejad, H., S. A. Shirazi, B. S. Mclaury, H. J. Subramani, ve L. D. Rhyne. 2015. 'The Effect Of Eroding Particle Hardness On The Erosion Of Stainless Steel', *Wear*, (332-333), 1098-103.
- Arencon, D., Ve J. I. Velasco. 2009. 'Fracture Toughness Of Polypropylene-Based Particulate Composites', *Materials*, 2 (4), 2046-94.
- Ashrafizadeh, H., P. Mertiny, ve A. McDonald. 2016. 'Evaluation Of The Effect Of Temperature On Mechanical Properties And Wear Resistance Of Polyurethane Elastomers', *Wear*, (368-369), 26-38.
- Ayyagari, Aditya, Vahid Hasannaemi, Harpreet Singh Grewal, Harpreet Arora, ve Sundeep Mukherjee. 2018. 'Corrosion, Erosion And Wear Behavior Of Complex Concentrated Alloys: A Review', *Metals*, 8 (8), 603.
- Bahadur, S., ve R. Badruddin. 1990. 'Eroding Particle Characterization And The Effect Of Particle Size And Shape On Erosion', *Wear*, 138 (1), 189-208.
- Barkoula, N. M., ve J. Karger-Kocsis. 2002. 'Review Processes And Influencing Parameters Of The Solid Particle Erosion Of Polymers And Their Composites', *Journal Of Materials Science*, 37 (18), 3807-20.

- Bauer, Ronald S., Steven L. Stewart, ve Horst D. Stenzenberger. 2000. 'Composite Materials, Thermoset Polymer-Matrix.' In, *Kirk-Othmer Encyclopedia Of Chemical Technology*.
- Begum, S., S. Fawzia, ve M. S. J. Hashmi. 2020. 'Polymer Matrix Composite With Natural And Synthetic Fibres', *Advances In Materials And Processing Technologies*, 6 (3), 547-64.
- Bendjaouahdou, C., ve K. Aidaoui. 2021. 'Synthesis And Characterization Of Polyvinyl Chloride/Wood Flour/Organoclay Ternary Composites', *Polymers & Polymer Composites*, (29),S949-S58.
- Bhattacharyya, D., P. Maitrot, ve S. Fakirov. 2009. 'Polyamide 6 Single Polymer Composites', *Express Polymer Letters*, 3 (8), 525-32.
- Bhushan, Rajesh Kumar, ve Deepak Sharma. 2020. 'Fabrication And Analysis Of AA6082/Si3N4 And AA6082/Sic Composites', *International Journal Of Structural Integrity*, 11 (2), 277-85.
- Biswas, Sandhyarani, Alok Satapathy, ve Amar Patnaik. 2010. 'Erosion Wear Behavior Of Polymer Composites: A Review', *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, 29 (19), 2898-924.
- Boggarapu, Vasavi, Raghavendra Gujjala, ve Shakuntla Ojha. 2020. 'A Critical Review On Erosion Wear Characteristics Of Polymer Matrix Composites', *Materials Research Express*, 7 (2), 022002.
- Butler, E. P., ve E. R. Fuller Jr. 2000. 'Composite Materials, Ceramic-Matrix.' In, *Kirk-Othmer Encyclopedia Of Chemical Technology*.
- Chawla, K. K. 1993. 'Ceramic Matrix Materials.' In, *Ceramic Matrix Composites* Springer US: Boston, MA.
- Chen, Jui-Ying. 2007. 'Processing, Characterization, And Modeling Of Nanoparticle Reinforced Fiber Composites', Ph.D., Northwestern University.
- Cheng, R. X. 2013. 'The Selection Of Adhesive Used To Bond Polyvinyl Chloride/Wood Flour Composites', *Journal Of Adhesion Science And Technology*, 27 (24), 2696-704.
- Chuai, C. Z., K. Almdal, L. Poulsen, ve D. Plackett. 2001. 'Conifer Fibers As Reinforcing Materials For Polypropylene-Based Composites', *Journal Of Applied Polymer Science*, 80 (14), 2833-41.
- Da Silva, R. V., E. M. F. Aquino, L. P. S. Rodrigues, ve A. R. F. Barros. 2008. 'Development Of A Hybrid Composite With Synthetic And Natural Fibers', *Materia-Rio De Janeiro*, 13 (1), 154-61.
- Das, Tushar Kanti, Prosenjit Ghosh, ve Narayan Ch Das. 2019. 'Preparation, Development, Outcomes, And Application Versatility Of Carbon Fiber-Based

- Polymer Composites: A Review', *Advanced Composites And Hybrid Materials*, 2 (2), 214-233.
- Desale, Girish R., Bhupendra K. Gandhi, ve S. C. Jain. 2009. 'Particle Size Effects On The Slurry Erosion Of Aluminium Alloy (AA 6063)', *Wear*, 266 (11), 1066-71.
- Devaraju, Subramani, ve Muthukaruppan Alagar. 2021. 'Polymer Matrix Composite Materials For Aerospace Applications.' In Dermot Brabazon (Ed.), *Encyclopedia Of Materials: Composites*. Elsevier: Oxford.
- Dike, A. S., ve H. Mindivan. 2013. "Mechanical Properties Of Polypropylene Based Composites Reinforced With B4C." In *3rd International Conference On Advanced Materials Research (ICAMR 2013)*, 19-23. Dubai, U ARAB EMIRATES.
- Dios, J. R., B. Gonzalo, C. R. Tubio, J. Cardoso, S. Goncalves, D. Miranda, V. Correia, J. C. Viana, P. Costa, ve S. Lanceros-Mendez. 2020. 'Functional Piezoresistive Polymer-Composites Based On Polycarbonate And Polylactic Acid For Deformation Sensing Applications', *Macromolecular Materials And Engineering*, 305 (12).
- Dong, Ming, Han Zhang, Lazaros Tzounis, Giovanni Santagiuliana, Emiliano Bilotti, ve Dimitrios G. Papageorgiou. 2021. 'Multifunctional Epoxy Nanocomposites Reinforced By Two-Dimensional Materials: A Review', *Carbon*, 185,57-81.
- Dutra, R. C. L., B. G. Soares, E. A. Campos, ve J. L. G. Silva. 2000. 'Hybrid Composites Based On Polypropylene And Carbon Fiber And Epoxy Matrix', *Polymer*, 41 (10), 3841-49.
- Echávarri, Javier, Eduardo De La Guerra, ve Enrique Chacón. 2015. 'Tribology: A Historical Overview Of The Relation Between Theory And Application.' In Raffaele Pisano (Ed.), *A Bridge Between Conceptual Frameworks: Sciences, Society And Technology Studies*. Springer Netherlands: Dordrecht.
- Elkholly, Ahmed. 1983. 'Prediction Of Abrasion Wear For Slurry Pump Materials', *Wear*, 84 (1), 39-49.
- Eterigho-Ikelegbe, Orevaoghene, Kelvin O. Yoro, ve Samson Bada. 2021. 'Coal As A Filler In Polymer Composites: A Review', *Resources, Conservation And Recycling*, 174, 105756.
- Feng, Ng Lin, Sivakumar Dhar Malingam, ve Siva Irulappasamy. 2019. '4 - Bolted Joint Behavior Of Hybrid Composites.' In Mohammad Jawaaid, Mohamed Thariq Ve Naheed Saba (Eds.), *Failure Analysis In Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites And Hybrid Composites*. Woodhead Publishing.
- Feng, Xin, Xiaosong Diao, Yijun Shi, Huaiyuan Wang, Shenghua Sun, ve Xiaohua Lu. 2006. 'A Study On The Friction And Wear Behavior Of Polytetrafluoroethylene Filled With Potassium Titanate Whiskers', *Wear*, 261 (11), 1208-12.

- Fidan, Sinan. 2011. 'Polimer Matrisli Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi Ve Oluşan Hasarların Mikro Tomografi Yöntemiyle İncelenmesi'. Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri enstitüsü, Kocaeli, 301641.
- Friedrich, K., Z. Lu, ve A. M. Hager. 1995. 'Recent Advances In Polymer Composites' Tribology', *Wear*, 190 (2), 139-44.
- Fu, S. R., L. J. Yang, H. Li, ve Z. X. Li. 2020. 'Steel Fiber-Reinforced Nonferrous Metal Matrix Composites: A Review', *Rare Metal Materials And Engineering*, 49 (9), 3035-44.
- Fu, S. Y., X. Q. Feng, B. Lauke, ve Y. W. Mai. 2008. 'Effects Of Particle Size, Particle/Matrix Interface Adhesion And Particle Loading On Mechanical Properties Of Particulate-Polymer Composites', *Composites Part B-Engineering*, 39 (6),933-61.
- Furuta, T., J. Radhakrishnan, H. Ito, T. Kikutani, ve N. Okui. 1998. 'Fabrication Of Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites With Structural Gradient From Sheath-Core Type Bicomponent Fibers', *Composite Interfaces*, 6 (5), 451-66.
- Gale, W. F., ve T. C. Totemeier. 2004. '25 - Friction And Wear.' In W. F. Gale Ve T. C. Totemeier (Eds.), *Smithells Metals Reference Book* (Eighth Edition). Butterworth-Heinemann: Oxford.
- Gao, Jianping, W. D. Luedtke, D. Gourdon, M. Ruths, J. N. Israelachvili, ve Uzi Landman. 2004. 'Frictional Forces And Amontons' Law: From The Molecular To The Macroscopic Scale', *The Journal Of Physical Chemistry B*, 108 (11), 3410-25.
- Godara, S. S., Abhishek Yadav, Bharat Goswami, ve R. S. Rana. 2021. 'Review On History And Characterization Of Polymer Composite Materials', *Materials Today: Proceedings*, (44), 2674-77.
- Gonzalez Henriquez, Raelvim, ve Pierre Mertiny. 2018. '3.21 Filament Winding Applications.' In Peter W. R. Beaumont Ve Carl H. Zweben (Eds.), *Comprehensive Composite Materials II*. Elsevier: Oxford.
- Gupta, M. K., M. Ramesh, ve S. Thomas. 2021. 'Effect Of Hybridization On Properties Of Natural And Synthetic Fiber-Reinforced Polymer Composites (2001-2020): A Review', *Polymer Composites*, 42 (10), 4981-5010.
- Hamidi, Youssef K., ve Cengiz M. Altan. 2018. '2.5 Process-Induced Defects İn Resin Transfer Molded Composites.' In Peter W. R. Beaumont Ve Carl H. Zweben (Eds.), *Comprehensive Composite Materials II*. Elsevier: Oxford.
- Ho, K. C., J. R. Hwang, ve J. L. Doong. 1996. 'Tensile Properties Of Short Glass Fibre Reinforced Polycarbonate', *Polymers And Polymer Composites*, 4 (8), 563-75.
- Holliday, L., ve J. Robinson. 1973. 'Review: The Thermal Expansion Of Composites Based On Polymers', *Journal Of Materials Science*, 8 (3), 301-11.

- Huang, Silu, Qiuni Fu, Libo Yan, ve Bohumil Kasal. 2021. 'Characterization Of Interfacial Properties Between Fibre And Polymer Matrix In Composite Materials – A Critical Review', *Journal Of Materials Research And Technology*, (13),1441-84.
- Huang, X. Y., Q. Q. Ke, C. N. Kim, H. F. Zhong, P. Wei, G. L. Wang, F. Liu, ve P. K. Jiang. 2007. 'Nonisothermal Crystallization Behavior And Nucleation Of LDPE/Al Nano- And Microcomposites', *Polymer Engineering And Science*, 47 (7),1052-61.
- Hull, D., & Clyne, T. . 1996. 'An Introduction To Composite Materials.' In D. Hull Ve T. W. Clyne (Eds.), *An Introduction To Composite Materials*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Islam, Md Aminul, ve Zoheir N. Farhat. 2014. 'Effect Of Impact Angle And Velocity On Erosion Of API X42 Pipeline Steel Under High Abrasive Feed Rate', *Wear*, (311), 180-90.
- Islam, R., T. Islam, F. Nigar, S. Saha, A. Tapash, N. Sharmin, K. Dey, A. I. Mustafa, R. A. Khan, M. A. Khan, ve H. U. Zaman. 2011. 'Fabrication And Mechanical Characterization Of Jute Fabrics: Reinforced Polyvinyl Chloride/Polypropylene Hybrid Composites', *International Journal Of Polymeric Materials*, 60 (8), 576-90.
- Jang, K. S. 2018. 'Mechanics And Rheology Of Basalt Fiber-Reinforced Polycarbonate Composites', *Polymer*, (147),133-41.
- Jawaid, M., ve H. P. S. Abdul Khalil. 2011. 'Cellulosic/Synthetic Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Review', *Carbohydrate Polymers*, 86 (1), 1-18.
- Jin, F. L., S. Y. Lee, ve S. J. Park. 2013. 'Polymer Matrices For Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites', *Carbon Letters*, 14 (2), 76-88.
- Jogur, Ganesh, Ashraf Nawaz Khan, Apurba Das, Puneet Mahajan, ve R. Alagirusamy. 2018. 'Impact Properties Of Thermoplastic Composites', *Textile Progress*, 50 (3), 109-83.
- Joshi, S. C. 2012. '12 - The Pultrusion Process For Polymer Matrix Composites.' In Suresh G. Advani Ve Kuang-Ting Hsiao (Eds.), *Manufacturing Techniques For Polymer Matrix Composites (Pmcs)*. Woodhead Publishing.
- Karger-Kocsis, József, Haroon Mahmood, Ve Alessandro Pegoretti. 2015. 'Recent Advances In Fiber/Matrix Interphase Engineering For Polymer Composites', *Progress In Materials Science*, (73),1-43.
- Konopka, K. 2015. 'Alumina Composites With Metal Particles In Ceramic Matrix', *Powder Metallurgy And Metal Ceramics*, 54 (5), 374-79.
- Korotkov, V. N., Y. A. Chekanov, ve B. A. Rozenberg. 1993. 'The Simultaneous Process Of Filament Winding And Curing For Polymer Composites', *Composites Science And Technology*, 47 (4), 383-88.

- Kracalik, M., S. Laske, ve C. Holzer. 2010. *Polymer Matrix Composites: Properties, Performance And Applications*. Elsevier.
- Krause, B., C. Barbier, J. Levente, M. Klaus, ve P. Potschke. 2019. 'Screening Of Different Carbon Nanotubes In Melt-Mixed Polymer Composites With Different Polymer Matrices For Their Thermoelectrical Properties', *Journal Of Composites Science*, 3 (4).
- Kumar, Rahul, Bastien Malaval, Maksim Antonov, ve Gai Zhao. 2020. 'Performance Of Polyimide And PTFE Based Composites Under Sliding, Erosive And High Stress Abrasive Conditions', *Tribology International*, (147), 106282.
- Lau, Kin-Tak, Chong Gu, ve David Hui. 2006. 'A Critical Review On Nanotube And Nanotube/Nanoclay Related Polymer Composite Materials', *Composites Part B: Engineering*, 37 (6), 425-36.
- Lebar, A., R. Aguiar, A. Oddy, ve O. E. Petel. 2021. 'Particle Surface Effects On The Spall Strength Of Particle-Reinforced Polymer Matrix Composites', *International Journal Of Impact Engineering*, (150), 103801
- Lee, Seul-Yi, ve Park. 2013. 'Polymer Matrices For Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites', *Carbon Letters*, 14 (2), 76-88.
- Levy, Alan, ve Yong-Fa Man. 1986. 'Surface Degradation Of Ductile Metals In Elevated Temperature Gas-Particle Streams', *Wear*, 111 (2), 173-86.
- Levy, Alan V., ve Pauline Chik. 1983. 'The Effects Of Erodent Composition And Shape On The Erosion Of Steel', *Wear*, 89 (2), 151-62.
- Li, J, ve Y Ran. 2010. 'Evaluation Of The Friction And Wear Properties Of PTFE Composites Filled With Glass And Carbon Fiber', *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 41 (2), 115-18.
- Li, J. S., Y. Li, J. Zhang, G. Li, X. Liu, Z. Li, X. Q. Liu, Y. X. Han, ve Z. Zhao. 2015. 'Nano Polypeptide Particles Reinforced Polymer Composite Fibers', *Acs Applied Materials & Interfaces*, 7 (7), 3871-76.
- Li, Xiaochao, Hao Ding, Zhaohui Huang, Minghao Fang, Baolin Liu, Yan'Gai Liu, Xiaowen Wu, ve Shusen Chen. 2014. 'Solid Particle Erosion-Wear Behavior Of Sic-Si3N4 Composite Ceramic At Elevated Temperature', *Ceramics International*, 40 (10), 16201-07.
- Liang, R., ve G. Hota. 2013. 'Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites In Environmental Engineering Applications.' In N. Uddin (Ed.), *Developments In Fiber-Reinforced Polymer*.
- Lin, Nan, H. Arabnejad, S. A. Shirazi, B. S. Melaury, ve Huiqing Lan. 2018. 'Experimental Study Of Particle Size, Shape And Particle Flow Rate On Erosion Of Stainless Steel', *Powder Technology*, (336), 70-79.

- Lindsley, B. A., ve A. R. Marder. 1999. 'The Effect Of Velocity On The Solid Particle Erosion Rate Of Alloys', *Wear*, (225-229), 510-16.
- Liu, Ankang, Bing Wang, ve Fei Li. 2021. 'High Performance Thermoplastic Polymer For The Compressive Behaviour Of Carbon Fibre Reinforced Composites', *Pigment & Resin Technology*, 50 (5): 426-36.
- Liu, Y. T., L. Li, J. P. Wang, Y. J. Fei, N. D. Liu, ve G. P. Wu. 2021. 'Effect Of Carbon Nanotube Addition In Two Sizing Agents On Interfacial Properties Of Carbon Fiber / Polycarbonate Composites', *New Carbon Materials*, 36 (3), 639-48.
- Luo, Quanshun. 2018. 'Electron Microscopy And Spectroscopy In The Analysis Of Friction And Wear Mechanisms', *Lubricants*, 6 (3), 58.
- Matabola, K. P., A. R. De Vries, F. S. Moolman, ve A. S. Luyt. 2009. 'Single Polymer Composites: A Review', *Journal Of Materials Science*, 44(23),6213-22.
- Meola, Carosena, Simone Boccardi, ve Giovanni Maria Carlomagno. 2017. 'Chapter 1 - Composite Materials In The Aeronautical Industry.' In Carosena Meola, Simone Boccardi Ve Giovanni Maria Carlomagno (Eds.), *Infrared Thermography In The Evaluation Of Aerospace Composite Materials*. Woodhead Publishing.
- Minchenkov, Kirill, Alexander Vedernikov, Alexander Safonov, ve Iskander Akhatov. 2021. 'Thermoplastic Pultrusion: A Review', *Polymers*, 13 (2), 180.
- Minsch, N., F. H. Herrmann, T. Gereke, A. Nocke, ve C. Cherif. 2017. "Analysis Of Filament Winding Processes And Potential Equipment Technologies." In *1st CIRP Conference On Composite Materials Parts Manufacturing (CIRP CCMPM)*, 125-30. Karlsruhe Inst Technol, Karlsruhe, Germany.
- Misra, Ambrish, ve Iain Finnie. 1981. 'On The Size Effect In Abrasive And Erosive Wear', *Wear*, 65, 359-73.
- Miyazaki, N. 2016. 'Solid Particle Erosion Of Composite Materials: A Critical Review', *Journal Of Composite Materials*, 50 (23),3175-217.
- Morampudi, P., K. K. Namala, Y. K. Gajjela, M. Barath, ve G. Prudhvi. 2020. "Review On Glass Fiber Reinforced Polymer Composites." In *1st International Conference On Energy, Materials Sciences And Mechanical Engineering (EMSME)*, 314-19. Delhi, India.
- Morita, M. 1995. 'Metal-Matrix Composites', *Advanced Composite Materials*, 4 (3),237-46.
- Mouritz, A. P., E. Gellert, P. Burchill, ve K. Challis. 2001. 'Review Of Advanced Composite Structures For Naval Ships And Submarines', *Composite Structures*, 53 (1), 21-42.

- Mulvihill, D. M., M. E. Kartal, D. Nowell, ve D. A. Hills. 2011. 'An Elastic–Plastic Asperity Interaction Model For Sliding Friction', *Tribology International*, 44 (12), 1679-94.
- Neto, J., H. Queiroz, R. Aguiar, R. Lima, D. Cavalcanti, ve M. D. Banea. 2022. 'A Review Of Recent Advances In Hybrid Natural Fiber Reinforced Polymer Composites', *Journal Of Renewable Materials*, 10 (3), 561-89.
- Nguyen, V. B., Q. B. Nguyen, Y. W. Zhang, C. Y. H. Lim, ve B. C. Khoo. 2016. 'Effect Of Particle Size On Erosion Characteristics', *Wear*, (348-349),126-37.
- Özzaim, Pelin. 2021. 'Aşındırıcı Partiküllerin PTFE Matrisli Polimer Kompozitlerin Partikül Erozyonuna Etkileri ', Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 701785
- Panda, Anton, Kostiantyn Dyadyura, Jan Valíček, Marta Harničárová, Jozef Zajac, Vladimír Modrák, Iveta Pandová, Peter Vrábel, Ema Nováková-Marcinčinová, ve Zdeněk Pavelek. 2017. 'Manufacturing Technology Of Composite Materials— Principles Of Modification Of Polymer Composite Materials Technology Based On Polytetrafluoroethylene', *Materials*, 10 (4),377.
- Pasha, BA Mudasar, D Abdul Budan, S Basavarajappa, S Manjunath Yadav, ve BA Nizamuddin. 2013. 'Studies On Wear Resistance Of PTFE Filled With Glass And Bronze Particles Based On Taguchi Technique', *Journal Of Thermoplastic Composite Materials*, 26 (2), 243-59.
- Pasha, Mudasar, ve Mohammed Kaleemulla. 2013. 'Erosive Wear Behavior Of Sprayed Metal Matrix Composites: An Overview', *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part J: Journal Of Engineering Tribology*, 227 (10), 1063-75.
- Pourhashem, Sepideh, Farhad Saba, Jizhou Duan, Alimorad Rashidi, Fang Guan, Elham Garmroudi Nezhad, ve Baorong Hou. 2020. 'Polymer/Inorganic Nanocomposite Coatings With Superior Corrosion Protection Performance: A Review', *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry*, (88), 29-57.
- Raask, E. 1969. 'Tube Erosion By Ash Impaction', *Wear*, 13 (4), 301-15.
- Rahman, Khandaker Mezanur, Vassili A. Vorontsov, Stephen. M. Flitcroft, ve David Dye. 2017. 'A High Strength Ti–SiC Metal Matrix Composite', *Advanced Engineering Materials*, 19 (7),1700027.
- Rajak, D. K., D. D. Pagar, P. L. Menezes, ve E. Linul. 2019. 'Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, And Applications', *Polymers*, 11(10),1667.
- Rigney, D A. 1988. 'Sliding Wear Of Metals', *Annual Review Of Materials Science*, 18 (1), 141-63.

- Safonov, Alexander A., Pierpaolo Carlone, ve Iskander Akhatov. 2018. 'Mathematical Simulation Of Pultrusion Processes: A Review', *Composite Structures*, (184), 153-77.
- Sajan, S., ve D. Philip Selvaraj. 2021. 'A Review On Polymer Matrix Composite Materials And Their Applications', *Materials Today: Proceedings*, 47,5493-98.
- Sak,N., Zeren, M. ve Ymanoğlu, R. 2018. 'Alümina Katkılı Ve Nikel İle Alaşımlandırılmış Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Özelliklerin Karakterizasyonu', *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1 (1), 1-7.
- Samal, Subhranshu S., ve Manoj Lanka. 2012. 'Ceramic Matrix Composites: Carbon Fiber Reinforced.' İn, *Wiley Encyclopedia Of Composites*.
- Sathishkumar, T. P., J. Naveen, ve S. Satheeshkumar. 2014. 'Hybrid Fiber Reinforced Polymer Composites - A Review', *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, 33 (5), 454-71.
- Shahapurkar, Kiran, Vaibhav Darekar, Rashmi Banjan, Ningappa Nidasosi, ve Manzoore Elahi M Soudagar. 2021. 'Factors Affecting The Solid Particle Erosion Of Environment Pollutant And Natural Particulate Filled Polymer Composites—A Review', *Polymers And Polymer Composites*, 29 (9), 1587-98.
- Sharma, Ankush, Mahavir Choudhary, Pankaj Agarwal, S. K. Biswas, ve Amar Patnaik. 2021. 'Review On Erosion Wear Characteristic Of Natural Fiber Reinforced Polymer Composite', *Materials Today: Proceedings*, (44),4795-800.
- Shi, Yijun, Xin Feng, Huaiyuan Wang, ve Xiaohua Lu. 2008. 'The Effect Of Surface Modification On The Friction And Wear Behavior Of Carbon Nanofiber-Filled PTFE Composites', *Wear*, 264 (11-12),934-39.
- Shida, Y., ve H. Fujikawa. 1985. 'Particle Erosion Behaviour Of Boiler Tube Materials At Elevated Temperature', *Wear*, 103 (4), 281-96.
- Shimizu, K., Y. Xinba, ve S. Araya. 2011. 'Solid Particle Erosion And Mechanical Properties Of Stainless Steels At Elevated Temperature', *Wear*, 271 (9), 1357-64.
- Sınmazçelik, Tamer, ve İsa Taşkiran. 2007. 'Erosive Wear Behaviour Of Polyphenylenesulphide (PPS) Composites', *Materials & Design*, 28 (9), 2471-77.
- Srivastava, S. P. 2014. 'Lubrication, Friction, And Wear.' İn, *Developments İn Lubricant Technology*.
- Stachowiak, G. W., ve A. W. Batchelor. 1993. '14 Fatigue Wear.' In G. W. Stachowiak Ve A. W. Batchelor (Eds.), *Tribology Series*.Elsevier.
- Stavroy, D., ve H. E. N. Bersee. 2005. 'Resistance Welding Of Thermoplastic Composites-An Overview', *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 36 (1), 39-54.

- Steenkamer, David A., ve John L. Sullivan. 1998. 'On The Recyclability Of A Cyclic Thermoplastic Composite Material', *Composites Part B: Engineering*, 29 (6), 745-52.
- Sujuan, Ye, ve Zeng Xingrong. 2014. 'Tribological Properties Of PTFE And PTFE Composites At Different Temperatures', *Tribology Transactions*, 57 (3), 382-86.
- Tanaka, Kyuichiro, ve Satoshi Kawakami. 1982. 'Effect Of Various Fillers On The Friction And Wear Of Polytetrafluoroethylene-Based Composites', *Wear*, 79 (2), 221-34.
- Trabelsi, M., M. Kharrat, ve M. Dammak. 2016. 'On The Friction And Wear Behaviors Of PTFE Based Composites Filled With Mos2 And/Or Bronze Particles', *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 69 (5), 1119-28.
- Uflyand, Igor E., ve Vadim I. Irzhak. 2021. 'Recent Advances In The Study Of Structure And Properties Of Fiber Composites With An Epoxy Matrix', *Journal Of Polymer Research*, 28 (11), 440.
- Unal, H, Salih Hakan Yetgin, A Mimaroglu, ve M Sumer. 2010. 'The Effect Of Test Parameters On Friction And Wear Performance Of PTFE And PTFE Composites', *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, 29 (13), 1978-86.
- Unal, H., U. Sen, ve A. Mimaroglu. 2007. 'Study Of Abrasive Wear Volume Map For PTFE And PTFE Composites', *Applied Composite Materials*, 14 (5), 287-306.
- Unlu, B. S., M. Uzkut, ve E. Atik. 2010. 'Tribological Behaviors Of Polymer-Based Particle-Reinforced PTFE Composite Bearings', *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, 29 (9), 1353-58.
- Van Rijswijk, K., ve H. E. N. Bersee. 2007. 'Reactive Processing Of Textile Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites – An Overview', *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 38 (3), 666-81.
- Vijaya Ramnath, B., C. Parswajinan, R. Dharmaseelan, K. Thileepan, ve K. Nithin Krishna. 2021. 'A Review On Aluminium Metal Matrix Composites', *Materials Today: Proceedings*, (46), 4341-43.
- Wakelin, R J. 1974. 'Tribology: The Friction, Lubrication, And Wear Of Moving Parts', *Annual Review Of Materials Science*, 4 (1), 221-53.
- Wang, Q. Jane, ve Yip-Wah Chung. 2013. 'Corrosive Wear And Fretting.' In Q. Jane Wang Ve Yip-Wah Chung (Eds.), *Encyclopedia Of Tribology*. Springer US: Boston, MA.
- Wang, Qiushi. 2015. 'Carbon Fiber Content Measurement In Composite', Ph.D., The University Of Alabama At Birmingham.
- Wang, Yunxia, ve Fengyuan Yan. 2007. 'A Study On Tribological Behaviour Of Transfer Films Of PTFE/Bronze Composites', *Wear*, 262 (7), 876-82.

- Watanabe, Makoto. 1992. 'Wear Mechanism Of PTFE Composites In Aqueous Environments', *Wear*, 158 (1), 79-86.
- Williams, John. 2005a. 'Introduction.' In John Williams (Ed.), *Engineering Tribology* Cambridge University Press: Cambridge.
- Williams, John. 2005b. 'Wear And Surface Damage.' In John Williams (Ed.), *Engineering Tribology*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Wolf, Clarence J. 2000. 'Composite Materials, Thermoplastic Polymer-Matrix.' In, *Kirk-Othmer Encyclopedia Of Chemical Technology*.
- Yan, F., W. Wang, Q. Xue, ve L. Wei. 1996. 'The Correlation Of Wear Behaviors And Microstructures Of Graphite-PTFE Composites Studied By Positron Annihilation', *Journal Of Applied Polymer Science*, 61 (7), 1231-36.
- Yeh, S. K., K. J. Kim, ve R. K. Gupta. 2013. 'Synergistic Effect Of Coupling Agents On Polypropylene-Based Wood-Plastic Composites', *Journal Of Applied Polymer Science*, 127 (2), 1047-53.
- Yenilmez, Furkan, ve Ilven Mutlu. 2021. 'Production And Nondestructive Characterization Of Thermoplastic-Based Polymer Matrix Composite Materials', *Polymer-Plastics Technology And Materials*, 60 (2),165-81.
- Zhang, S. W., Wang Deguo, ve Yin Weihua. 1995. 'Investigation Of Abrasive Erosion Of Polymers', *Journal Of Materials Science*, 30 (18), 4561-66.
- Zhou, J., ve S. Bahadur. 1989. 'High-Temperature Erosion-Corrosion Behavior Of Stainless Steels', *Corrosion And Particle Erosion At High Temperatures*: 315-33.
- Zum Gahr, K-H. 1987. *Microstructure And Wear Of Materials*.Elsevier.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Eşiyok K., Zeren M., Sınmazçelik T., Teflon (PTFE) Matrisli Polimer Kompozitlerde Takviye Edici Malzemelerin Partikül Erozyonuna Etkileri, *6. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi (IMASCON 2021 Bahar)*, Kocaeli, Türkiye, 21-22 Mayıs 2021.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Aydın'da tamamladı. 2008 yılında Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Uzun yıllar özel sektörde kalite, iş güvenliği, iş geliştirme alanlarında çeşitli iş tecrübeleri kazandıktan sonra, 2019 yılı güz döneminde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Aralık 2021'den beri Yalova İmes Makine İhtisas Organize Sanayi Bölgesi Müdürlüğü'nde İş Geliştirme ve Kurumsal İletişim Koordinatörlüğü görevini yürütmektedir.

