

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOLGU MALZEMESİ TÜRÜ VE ORANLARININ ELYAF TAKVİYELİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN EROZYON AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Yavuz Selim KILIÇARSLAN

OCAK 2020
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOLGU MALZEMESİ TÜRÜ VE ORANLARININ ELYAF TAKVİYELİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN EROZYON AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Yavuz Selim KILIÇARSLAN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12.12.2019
Tezin Savunma Tarihi : 03.01.2020**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK

Trabzon 2020

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yavuz Selim KILIÇARSLAN Tarafından Hazırlanan**

**DOLGU MALZEMESİ TÜRÜ VE ORANLARININ ELYAF TAKVİYELİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN EROZYON AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 17/12/2019 gün ve 1832 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANSTEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK

Üye : Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ

Üye : Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU


.....
.....
.....

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında bilgi ve tecrübesinden yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını hiç esirgemeyen ve her daim bana destek veren tez danışmanım Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK'e, deney numunelerinin üretilmesi ve deneylerin yapılması aşamasında bilgilerinden faydalandığım Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ ve Arş. Gör. İsmail ÖZEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam süresince benden hiç desteklerini esirgemeyen ve bugünlere gelmemde çok büyük payı olan Aileme sonsuz teşekkür ederim.

Yavuz Selim KILIÇARSLAN
Trabzon, 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Dolgu Malzemesi Türü ve Oranlarının Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışına Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

03/01/2020

Yavuz Selim KILIÇARSLAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması.....	2
1.3. Kompozit Malzemeler	10
1.3.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı.....	10
1.3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	11
1.3.2.1. Matris Yapılarına Göre Sınıflandırılması	11
1.3.2.2. Takviye Elemanlarına Göre Sınıflandırılması	14
1.3.3. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	17
1.3.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	18
1.4. Aşınma.....	22
1.4.1. Aşınma Türleri.....	23
1.4.1.1. Adezyon Aşınması.....	23
1.4.1.2. Abrazyon Aşınması	24
1.4.1.4. Yorulma Aşınması	26
1.4.1.5. Erozyon Aşınması.....	27
1.4.2. Erozyon Aşınmasına Etki Eden Faktörler	27
1.4.3. Erozyon Aşınma Mekanizmaları	29
1.4.4. Erozyon Aşınması Deney Metotları	30
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	32
2.1. Kullanılan Malzemeler	32
2.2. Numune Üretimi	35

2.3.	Katı Parçacık Erozyon Aşınma Testleri için Kullanılan Deneysel Düzenekleri.....	37
2.4.	Aşındırıcı Parçacıkların Çarpma Hızlarının Belirlenmesi.....	39
2.5.	Katı Parçacık Erozyon Deneylerinin Yapılışı.....	40
2.6.	SEM İncelemeleri.....	42
3.	BULGULAR.....	43
3.1.	Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Erozyon Aşınma Performansı.....	43
3.1.1.	Çarpma Hızının Erozyon Oranına Etkisi.....	43
3.1.3.	Çarpma Süresinin Erozyon Oranına Etkisi.....	47
3.2.	Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Erozyon Aşınma Performansı.....	49
3.2.1.	Çarpma Hızının Erozyon Oranına Etkisi.....	49
3.2.2.	Çarpma Açısının Erozyon Oranına Etkisi.....	51
3.2.3.	Çarpma Süresinin Erozyon Oranına Etkisi.....	53
3.3.	Aşındırıcı Parçacık Boyutunun Erozyon Oranına Etkisi.....	55
3.4.	Numunelerin Aşınma Yüzeylerin SEM İncelemeleri.....	56
4.	İRDELEME.....	65
4.1.	Çarpma Hızının Erozyon Aşınmasına Etkisi.....	65
4.2.	Çarpma Açısının Erozyon Aşınmasına Etkisi.....	65
4.3.	Çarpma Süresinin Erozyon Aşınmasına Etkisi.....	67
4.4.	Toz Boyutunun Erozyon Aşınmasına Etkisi.....	68
4.5.	Aşınmış Yüzeylerin Yüzey Morfolojisi.....	68
5.	SONUÇLAR.....	70
6.	ÖNERİLER.....	71
7.	KAYNAKLAR.....	72
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DOLGU MALZEMESİ TÜRÜ VE ORANLARININ ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

Yavuz Selim KILIÇARSLAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK
2020, 79 Sayfa

Bu çalışmada, farklı tür ve oranda dolgu malzemesi içeren epoksi reçine esaslı cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin katı parçacık erozyon aşınma davranışları incelenmiştir. Dolgu malzemesi olarak silis dumanı (mikro silika, SiO₂) ve çinko oksit (ZnO) ağırlıkça %0, %8 ve %16 oranlarında kompozit malzemelere ilave edilmiştir. Kompozitler, el yatırma ve vakumlama tekniği ile üretilmiştir. Üretilen numunelerin katı parçacık erozyon performansları 20°, 30°, 45°, 60° ve 90° çarpma açılarında ve 70, 100, 150 ve 200 m/s çarpma hızlarında belirlenmiştir. Erozyon deneylerinde aşındırıcı malzemesi olarak farklı boyutlarda silisyum karbür (SiC) kullanılmış olup aşındırıcının ortalama parçacık boyutları sırasıyla 72, 175 ve 348 µm şeklindedir.

Elde edilen sonuçlardan kompozit malzemelerin erozyon aşınma değerleri artan çarpma hızı, çarpma süresi ve aşındırıcı parçacık boyutu ile arttığı tespit edilmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde artan çarpma açısıyla erozyon aşınma değerleri artmış ancak karbon elyaf takviyeli kompozitlerin erozyon değerleri 60° çarpma açısına kadar artmış bu değerlerin üzerinde bir miktar düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca, silis dumanı dolgulu kompozit malzemelerin, çinko oksit dolgulu kompozit malzemelere göre daha iyi erozyon direnci göstermiştir. Numunelerin aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiş, numune aşınma mekanizmalarının genellikle matris/elyaf ayrılması, elyaf kırılması ve kopması, matris deformasyonu ve mikro çatlak şeklinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Katı parçacık erozyon aşınması, Epoksi matris, Karbon elyaf, Cam elyaf, Çarpma açısı, Çarpma hızı, Dolgu malzemesi.

Master Thesis

SUMMARY

EFFECT OF FILLER MATERIAL TYPE AND RATIO ON EROSION WEAR BEHAVIOR OF
FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

Yavuz Selim KILIÇARSLAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgical and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK
2020, 79 Pages

In this study, solid particle erosion behavior of epoxy resin based glass and carbon fiber reinforced composite materials containing different types and ratio of fillers were investigated. Silica fume (microsilica, SiO₂) and zinc oxide (ZnO) as filler materials were added to the composite materials 0, 8 and 16 wt%. Composite materials were fabricated by using vacuum assisted hand lay-up technique. The solid particle erosion wear performances of the samples were determined at impact angles of 20°, 30°, 45°, 60° and 90° and impact velocities of 70, 100, 150 and 200 m/s. Silicon carbide (SiC) abrasive particle with an average particle diameter of 72, 175 and 348 µm, respectively, was used as erodent in erosion test.

The results show that erosion rate increased with increasing impact velocity, impact duration and abrasive particle size in all composite materials. Erosive wear values also increased with increasing impact angle in glass fiber reinforced composite materials, but erosion values increased up to 60° impact angle in carbon fiber based composites and decreased slightly above this value. Silica fume filled composite materials exhibited better erosion resistance than zinc oxide filled composites. The eroded surfaces of the composites were investigated by using scanning electron microscopy (SEM). As a result of the investigation, fiber/matrix debonding, fiber fracture, matrix deformation and microcracks were observed as wear mechanism on the composite materials.

Key Words: Solid particle erosive wear, Epoxy matrix, Carbon fiber, Glass fiber, Impact angle, Impact velocity, Filler material.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.	Kompozit malzemenin iç yapısı 10
Şekil 2.	Matris yapılarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması 11
Şekil 3.	Kompozitlerin sınıflandırılması; a) elyaf takviyeli, b) parçacık takviyeli, c) tabakalı ve d) karma (hibrid)..... 15
Şekil 4.	Parçacık takviyeli kompozit malzemeler 16
Şekil 5.	Tabakalı kompozitler..... 16
Şekil 6.	El yatırma yöntemi 19
Şekil 7.	Püskürtme yöntemi..... 20
Şekil 8.	Elyaf sarma yöntemi..... 21
Şekil 9.	Vakum torbalama yöntemi 21
Şekil 10.	Aşınmaya etki eden faktörler 23
Şekil 11.	Adezyon aşınması 24
Şekil 12.	Abrasyon aşınması 25
Şekil 13.	Korozyon aşınması..... 26
Şekil 14.	Yorulma aşınması..... 26
Şekil 15.	Erozyon aşınması 27
Şekil 16.	Erozyon aşınmasına etki eden faktörler 28
Şekil 17.	Erozyon aşınması türleri..... 28
Şekil 18.	Erozyon aşınmasında karşılaşılan mekanizmalar..... 29
Şekil 19.	Erozyon aşınması deney metotları; a) katı parçacık, b) sıvı-çamur, c) santrifüj hızlandırıcı, d) dönen kol ve e) sirkülasyon metodu..... 30
Şekil 20.	Üretimde kullanılan cam elyafın görüntüsü 33
Şekil 21.	Üretimde kullanılan karbon elyafın görüntüsü..... 34
Şekil 22.	Çinko oksit (ZnO); a) genel görüntüsü ve b) SEM görüntüsü 35
Şekil 23.	Silis dumanının (SiO ₂); a) genel görüntüsü ve b) SEM görüntüsü 35
Şekil 24.	El yatırma ve vakumlama tekniği ile üretilen elyaf takviyeli kompozit plakanın görüntüsü 36
Şekil 25.	Erozyon deneyleri için üretilen numunelerin görüntüsü; a) silis dumanı dolgulu ve b) çinko oksit dolgulu..... 37
Şekil 26.	Katı parçacık erozyon deney düzeneği..... 38
Şekil 27.	Erozyon testlerinde kullanılan nozullar..... 38

Şekil 28.	Çift disk metodu; a) şematik gösterimi ve b) imalatı yapılan çift-disk hız ölçüm sistemi.....	39
Şekil 29.	SiC tozunun genel bir görüntüsü; a) 72µm, b) 175 µm ve c)348 µm	41
Şekil 30.	SiC tozunun SEM görüntüsü; a) 72µm, b) 175 µm ve c) 348 µm	42
Şekil 31.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	42
Şekil 32.	Farklı aşındırıcı toz boyutunda cam elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma hızının erozyon oranına etkisi; a) 72 µm, b) 175 µm ve c) 348 µm	44
Şekil 33.	Farklı aşındırıcı toz boyutunda cam elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma açısının erozyon oranına etkisi; a) 72 µm, b) 175 µm ve c) 348 µm	46
Şekil 34.	Farklı aşındırıcı toz boyutunda cam elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma süresinin erozyon oranına etkisi; a) 72 µm, b) 175 µm ve c) 348 µm	48
Şekil 35.	Farklı aşındırıcı toz boyutunda karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma hızının erozyon oranına etkisi; a) 72 µm, b) 175 µm ve c) 348 µm	50
Şekil 36.	Farklı aşındırıcı toz boyutunda karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma açısının erozyon oranına etkisi; a) 72 µm, b) 175 µm ve c) 348 µm	52
Şekil 37.	Farklı aşındırıcı toz boyutunda karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma süresinin erozyon oranına etkisi; a) 72 µm, b) 175 µm ve c) 348 µm	54
Şekil 38.	Aşındırıcı parçacık boyutunun erozyon oranına etkisi.....	55
Şekil 39.	CSZ0 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) 100X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 20°)	56
Şekil 40.	CS16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) 100X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 20°)	57
Şekil 41.	CZ16 kodlu kompozitin numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) 100X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 20°)	58
Şekil 42.	CSZ0 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) kraterin genel görüntüsü ve b) kraterin iç tarafı (çarpma açısı; 90°)	59
Şekil 43.	CS16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) kraterin genel görüntüsü, b) kraterin iç tarafı (düşük büyütme) ve c) kraterin iç tarafı (yüksek büyütme) (çarpma açısı; 90°).....	60
Şekil 44.	CZ16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) kraterin genel görüntüsü, b) kraterin iç görüntüsü ve c) kraterin alt yüzeyi (çarpma açısı; 90°).....	61
Şekil 45.	KSZ0 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) 250X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 60°)	62

- Şekil 46. KS16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü;
a) 500X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 60°) 63
- Şekil 47. KZ16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü;
a) kraterin genel görüntüsü ve b) kraterin iç görüntüsü (çarpma açısı;
60°)..... 64



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Reçine Özellikleri.....	32
Tablo 2. Sertleştirici Özellikleri	32
Tablo 3. Reçine-Sertleştirici Karışım Oranları.....	33
Tablo 4. Cam Elyafın Özellikleri	33
Tablo 5. Karbon Elyafın Özellikleri	34
Tablo 6. Üretilen Kompozit Malzemelerin Ağırlıkça (%) Bileşim Oranları.....	36
Tablo 7. Aşınma Test Parametreleri	40

SEMBOLLER DİZİNİ

Semboller

S	: Erozyon izleri arası mesafe
θ	: Açısal yer değiştirme
r	: Erozyon izlerinin ortalama yarıçapı
ω	: Disklerin açısal hızı
t	: Aşındırıcıların üst diskten geçip alt diske ulaşması için geçen zaman
n	: Disklerin devir sayısı
L	: Diskler arası mesafe
V_p	: Aşındırıcı parçacıkların çarpma hızı
W_{er}	: Erozyon oranı
ΔW_s	: Numunenin ağırlık kaybı
ΔW_{ep}	: Aşındırıcı parçacıklarının toplam ağırlığı

Kısaltmalar

PEEK	: Polieter eter keton
PA	: Poliamid
UV	: Ultraviyole ışınları
DIN	: Alman Norm Enstitüsü (Deutsches Institut für Normung)
ASTM	: Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
MIL-STD	: Savunma test standardı/ katı parçacık erozyon testi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Farklı mühendislik uygulamalarında kullanılan makine ve elemanları, çok iyi tasarlansalar bile hem malzemeden hem de kullanım yerlerindeki şartlardan dolayı belirli bir süre sonra işlevlerini kaybederler. Bu durumun oluşmasındaki en önemli faktör aşınmadır. Aşınmanın pek çok tanımı olmakla birlikte ASTM G40-05 ve DIN 50320 standartlarına göre aşınma, bir malzemenin diğer bir malzeme ile (katı, sıvı ve gaz) etkileşmesi sonucunda yüzeylerinden küçük parçacıkların ayrılmasıyla oluşan yüzey bozulması olarak tarif edilmektedir.

Aşınma; malzeme, yüzeylerin şekli, biçimi, sistemde kullanılan yağlayıcılar, sisteme etki eden hız, sıcaklık, basınç, sistemin çalışma süresi, aşındırıcıların malzeme yüzeyine çarpma durumu, sertlik vb. gibi birçok değişkene bağlı karmaşık bir olaydır. Bundan dolayı aşınma alanında birçok çalışmalar yapılmış ve belirli sonuçlar kaydedilmesine rağmen bu konudaki çalışmalar hala ayrıntılı bir şekilde devam etmektedir. Malzemelerin temas yüzeyinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal etkilerin fazla olması nedeniyle pratikte malzemelerde bir aşınma türü değil birden fazla aşınma türüyle karşılaşmaktadır. Malzemelerin temas yüzeylerinde, abrazyon, adezyon, yorulma, korozyon ve erozyon aşınması en sık karşılaşılan aşınmalardır.

Bu aşınmalardan erozyon aşınması, belirli bir hız kazanmış aşındırıcı parçacıkların bir malzeme yüzeyine çarpması sonucu bu yüzeyin üst kısmından malzeme kopmasıyla oluşmaktadır. Bu malzeme kaybının devam etmesi durumunda kullanım yerlerinde ciddi hasarlar oluşmakla birlikte makine parça ve ekipmanların ömürleri azalmaktadır. Çarpma hızı, çarpma süresi, aşındırıcı parçacık şekli, tipi, sertliği, malzeme özellikleri ve çevresel faktörler erozyon aşınmasını etkileyen en önemli faktörlerdir.

Uçak motorları, helikopter pervanesi, yüksek hızlı araçlar, su-kum karışımı taşıyan borular ve rüzgâr türbinlerinde vb. gibi uygulama alanları, erozyon aşınmasının en sık görüldüğü alanlardır. Bu alanlarda aşındırıcı toz parçacıkları hareketli kanatlara, boru bağlantı yerlerine, boru dirseklerine ve diğer yüzeylere çarparak bu yüzeylerde ciddi aşınmalar meydana getirirler.

Makine parça ve ekipmanlarının erozyon aşınmasına karşı davranışları bilinirse aşınmaya maruz kalan bu parçaların ömürleri artırılabilir. Makine parça ve ekipmanların erozyon aşınmasına karşı ömürlerini uzatmada kompozit malzemeler gibi aşınmaya dirençli malzemeler kullanılabilir.

İki ya da daha fazla malzemelerin en iyi özelliklerini tek bir malzemede toplanmasıyla oluşan malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir. Kompozit malzemelerin kombinasyonu sınırsız sayıdadır ve bu da kompozit malzemelerin özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkânı sağlamaktadır. Bu özelliğinden dolayı malzemelerin yapısında istenilen yüksek mukavemet, yorulma dayanımı, hafiflik, aşınmaya karşı direnç, korozyona karşı direnç, elektrik iletkenliği ve rijitlik gibi birçok özellik verilebilmektedir.

Bu çalışmada, farklı tür ve oranda dolgu malzemesi içeren epoksi reçine esaslı karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışları incelenmiştir. Kompozit malzemelere dolgu malzemesi olarak silis dumanı (SiO_2) ve çinko oksit (ZnO) ağırlıkça %0, %8 ve %16 oranlarında katılmış olup malzemeler el yatırma ve vakumlama tekniği ile üretilmiştir. Numunelerin erozyon performansları, farklı çarpma açısı, çarpma hızı, çarpma süresi ve farklı boyutlarda silisyum karbür (SiC) aşındırıcı parçacık kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda çarpma açısının, çarpma hızının, çarpma süresinin ve aşındırıcı parçacık boyutunun numunelerin erozyon performansları incelenmiş ve etkin aşınma mekanizmaları ortaya konmuştur.

1.2. Literatür Araştırması

Literatürde kompozit malzemelerin erozyon aşınma üzerine çeşitli çalışmalar mevcut olmakla birlikte yüksek çarpma hızlarının numunelerin erozyon performansı üzerine etkisiyle ilgili çalışmaların yeterli olmadığı görülmüştür.

Arani ve arkadaşları alüminyum oksit dolgulu epoksi kompozit malzemelerin erozyon davranışlarını incelemişlerdir. Kompozit malzemeleri %0, %25, %35 ve %45 dolgu oranları ile üretmişler ve $22\ \mu\text{m}$ ' den $157\ \mu\text{m}$ ' ye değişen silisyum karbür aşındırıcı tozlar kullanarak erozyon aşınma deneyleri yapmışlardır. 30° çarpma açısında ve %0 dolgu içeren epoksi kompozitler en fazla aşınma göstermiştir [1].

Bir grup arkadaş, 2019 yılında hibrid toz dolgulu cam epoksi kompozit malzeme üretmiş ve üretilen bu kompozit malzemelere erozyon aşınma davranışı üzerinde sıcaklığın

etkisini incelemişlerdir. Deneyleri farklı çarpma açılarında, alümina aşındırıcı toz kullanarak ve 40 m/s çarpma hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Dolgu katılan kompozitler dolgusuz olanlara göre daha iyi performans sergilemiştir [2].

2018 yılında Lv ve arkadaşları, termoplastik poliüretan dolgulu cam epoksi kompozit malzemeler üretmiş ve erozyon aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deneylerini 300 µm silisyum karbür tozu kullanarak farklı çarpma açılarında yapmışlardır. Deneyler sonucunda termoplastik poliüretan dolgulu cam epoksi kompozit malzemelerin erozyona karşı %99 dan %205 e karşı dirençli olduklarını ortaya koymuşlardır [3].

Biswas ve Satapathy Taguchi deney tasarımı kullanarak, alümina dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin erozyon davranışı incelemişlerdir. Cam elyaf epoksi kompozitleri %0, %10 ve %20 alümina dolgulu olarak üretmişlerdir. Üretilen deney numunelerini 43 m/s, 54 m/s ve 65 m/s çarpma hızlarında, 30°, 60° ve 90° çarpma açılarında ve 300 µm, 450 µm ve 600 µm boyutlarında silika aşındırıcı parçacık kullanarak erozyon aşınma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Dolgusuz ve dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitler yarı sünek davranış sergilerken en yüksek aşınma değerini 60° çarpma hızlarında gerçekleştirmiş olduklarını ve dolgu oranlarının artması sonucu erozyon direncinin geliştiğinin sonuçlarını çıkarmışlardır [4].

Tek yönlü karbon elyaf takviyeli polieterimid kompozit malzemelerin, çarpma açısı, çarpma hızı ve çarpma süresine bağlı olarak düşük çarpma hızlarında hızlarda erozyon davranışını Sarı ve Sınmazçelik incelemiştir. Bu kompozit malzemelerin düşük çarpma hızlarında yarı sünek bir davranış gösterdiğini ve en fazla aşınmanın 45°-55° arasında olduğunun sonucuna varmışlardır. Ayrıca malzemenin erozyon oranları ve yüzey pürüzlülüğü, aşındırıcı parçacıkların temas açısı ve çarpma hızı ile çok yakından ilişkili olduğunun sonucuna ulaşmışlardır [5].

Ray ve çalışma arkadaşları ise granit tozu dolgulu çift yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışını Taguchi deney tasarımı kullanarak incelemişlerdir. Dolgu için ortalama 90-100 µm boyutları arasında değişen granit tozunu %0, %5, %10 ve %15 oranlarında kullanarak 4 farklı çarpma açısı ve 4 farklı çarpma hızıyla erozyon deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde 70 µm' den 130 µm' ye değişen 4 farklı silika aşındırıcı parçacık kullanmışlardır. Dolgu oranların %0' dan %10' a artmasıyla erozyon miktarında düşme olduğunu ve daha sonra %15 dolgu oranında bir miktar arttığını kaydetmişlerdir [6].

Bir grup araştırmacı, dolgusuz ve grafit dolgulu epoksi reçine esaslı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin farklı çarpma hızlarındaki erozyon aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Bu kompozit malzemelerin 45° de en yüksek aşınma oranlarıyla yarı sünek davranış gösterdiğinin sonucunu elde etmişlerdir. Ayrıca dolgu oranlarının %0' dan %4' e kadar aşınma miktarlarını arttırdığının ve %6 dolgu oranında ise azaldığının sonucuna ulaşmış olmalarına rağmen en iyi aşınma direncinin dolgusuz kompozit malzemeler olduğunu kaydetmişlerdir [7].

Bağcı ve İmrek, Taguchi deney metodu kullanarak borik asit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin katı parçacık erozyonu davranışlarını incelemişlerdir. %0, %15 ve %30 borik asit dolgulu ve 0° ile 45° yönlenmiş cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlere 23 m/s, 34 m/s ve 53 m/s çarpma hızlarında ve 30°, 60° ve 90° çarpma açılarında erozyon deneylerine tabi tutmuşlardır. 0° yönlenmiş elyaf kullanımı 45° yönlenmiş elyaf kullanımına göre daha kötü erozyon direnci gösterdiğini, aşındırıcı parçacık toz boyutu ve parçacık çarpma hızının artması da erozyon direncini kötü yönde etkilediğini kaydetmişlerdir. %30 borik asit dolgusu, %15 borik asit dolgusuna göre erozyon oranlarında iyileşme gösterdiğini bulmuşlardır [8].

2012 de ise farklı bir araştırmacı, tek yönlü karbon elyaf takviyeli polieter eter keton (PEEK) kompozitlerin erozyon aşınma özelliklerini, 200-500 µm boyutlarında açılı çelik kum aşındırıcı kullanarak farklı açılarda incelemişlerdir. Kompozit malzemeler 45°-60° çarpma açıları arasında maksimum aşınma oranlarıyla sünek ve gevrek erozyon davranışı sergilediklerinin sonucunu bulmuşlardır [9].

Cenosfer dolgulu jüt (45°-45°) ve cam (0°-90°) elyaf takviyeli kompozit malzemelerin erozyon davranışlarını Dalbehera ve Acharya incelemişlerdir. Taguchi deney tasarımı kullanarak %10, %15 ve %20 cenosfer dolgusu kompozitlerin erozyon deneylerini 48, 70 ve 82 m/s çarpma hızlarında ve 45°, 60° ve 90° çarpma açılarında yapmışlardır. Cenosfer dolgusunun erozyon direncini geliştirdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca kompozit malzemelerin maksimum aşınmasının 45° ile 60° çarpma açısında olduğunu ve aşınma davranışının yarı sünek olduğu sonucunu çıkarmışlardır [10].

Rajesh ve ekip arkadaşları, PA 6, PA 11, PA 12, PA 66, PA 66/610 ve aromatik PA gibi çeşitli poliamidlerin, 30° ve 90° çarpma açılarında, 80 m/s ve 140 m/s çarpma hızlarında ve 90-180 µm boyutları arasında silika kumu kullanarak erozyon aşınması deneylerini yapmışlardır. Bu poliamidlerin, 80 m/s hızda en az aşınmayı PA 66/610, 140 m/s çarpma hızında ise en az aşınmayı PA 11 ve her iki hızda da en fazla aşınmayı PA 12

göstermiş olduklarını bulmuşlardır. Ayrıca çarpma açısı, malzeme cinsi ve çarpma hızının erozyon aşınma davranışında önemli oldukları sonucuna varmışlardır [11].

Çimento tozu dolgulu bambu elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ve erozyon davranışını Gupta ve arkadaşları incelemişlerdir. İşlenmiş ve işlenmemiş bambu elyaflar kullanarak ve dolgu olarak da ağırlıkça %0 %10 ve %20 çimento tozu eklenmesiyle deney numuneleri üretmişlerdir. Çimento tozunun %0'dan %20'ye artması neticesinde mikro sertlik değeri, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerde iyileşmeler olduğunu ve buna bağlı olarak da erozyon direncinin arttığını kaydetmişlerdir. İşlenmiş bambu elyaflar işlenmemiş bambu elyaflara göre daha az aşınma göstermiş ve dolgu oranının artmasıyla da aşınma oranının azalmasının görüldüğünü tespit etmişlerdir. Kompozit malzemeler yarı sünek erozyon davranışı sergilerken işlenmemiş bambu elyafı olanlar 45° - 55° çarpma açıları arasında maksimum aşınmayı gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [12].

Rajesh ve Bijwe, PA 6 ve PA 12 gibi poliamidin fiziksel, kimyasal ve tribolojik özelliklerini üzerindeki su absorpsiyonu etkisini incelemişlerdir. 30° ve 90° çarpma açılarında, 80 m/s hızında ve 90-180 μm boyutları arasında silika toz aşındırıcı kullanarak erozyon aşınması deneylerini yapmışlardır. Su absorpsiyonu etkisi erozyon aşınmasını PA 6 için her iki çarpma açısında kötü yönde etkiler iken PA 12 için her iki çarpma açısında iyi yönde etkiledikleri sonucuna çıkarmışlardır [13].

Silisyum oksit (SiO_2) dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin erozyon davranışlarını Bağcı ve çalışma arkadaşları incelemişlerdir. Deneylerini %0 ve %15 SiO_2 dolgulu olarak 45° ($45/-45$) elyaf yönlenmesiyle el yatırma yöntemiyle üretmişler ve ardından 30° , 60° ve 90° çarpma açılarında, 23 m/s, 34 m/s ve 53 m/s çarpma hızlarında ve 200 ile 400 μm boyutlu iki farklı alüminyum aşındırıcı tozu kullanarak erozyon deneylerini yapmışlardır. Silisyum oksit eklenmiş kompozit malzemeler saf kompozit malzemeye göre daha iyi erozyon direnci gösterdiklerini ve erozyon oranında ise %10 ila %15 azalma meydana geldiğini kaydetmişlerdir. 45° elyaf yönlenmesi daha önceki çalışmalarındaki $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf yönlenmesine göre erozyon aşınmasına karşı daha iyi direnç gösterdiklerini vurgulamışlardır. Ayrıca 30° çarpma açılarında maksimum aşınmanın meydana gelmesini ve buna bağlı olarak da kompozit malzemenin sünek erozyon davranışı gösterdiklerinin sonucuna varmışlardır [14].

Fouad ve arkadaşları tek yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışlarını ve aşınma mekanizmalarını, yaklaşık 150 μm boyutlarında

düzensiz silika aşındırıcı parçacıkları kullanarak 30°, 60° ve 90° çarpma açılarında ve farklı çarpma basınçlarında incelemiştir. İnceleme sonucunda kompozit malzemelerin en fazla erozyon miktarı 60° çarpma açısında kaydetmişlerdir. Ayrıca aşınma mekanizmalarının çarpma açısıyla yakın ilişkili olduğunun sonucunu bulmuşlardır [15].

2008 yılında alümina (Al_2O_3) dolgulu cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin erozyon davranışlarını Patnaik ve arkadaşları Taguchi deney tasarımı kullanarak incelemiştir. %0, %10 ve %20 oranlarında dolgu kullanarak üretmiş oldukları deney numunelerine, 45°, 60° ve 90° çarpma açılarında, 32, 45 ve 58 m/s çarpma hızlarında ve 300, 500 ve 800 µm boyutlarında silika aşındırıcı parçacık kullanarak erozyon deneyleri yapmışlardır. Alümina dolgularının kompozit malzemenin çekme mukavemeti, mikro sertlik değerleri ve eğilme mukavemeti gibi mekanik özelliklerinde iyi bir sonuç alamadıklarını görmüşlerdir. Ama alümina dolgularının artmasıyla da erozyon direncinin artarak erozyon oranının azaldığını kaydetmişlerdir [16].

Rout ve arkadaşları, granit dolgulu cam elyaf takviyeli polyester esaslı hibrid kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışlarını Taguchi deney tasarımı kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarındaki deney numunelerine %0, %5, %10 ve %15 ağırlık oranlarında granit dolguları eklemişler ve 4 farklı çarpma açısı, çarpma hızı ve aşındırıcı kullanarak erozyon deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerde mikro boyutlara sahip granit parçacıkların kompozit malzemeye eklenmesi erozyon davranışını iyi yönde etkilerken gerilme ve eğilme mukavemetini azalttığını gözlemlemişlerdir. Kompozitlerin yüksek hızlarda yarı sünek erozyon davranışı sergilediğini, en fazla aşınmanın 60° çarpma hızlarında gerçekleştiğini ve ayrıca erozyon oranları üzerinde çarpma hızının, çarpma açılarının, granit yüzdesinin ve aşındırıcı parçacık boyutlarının önemli olduklarının sonucunu çıkarmışlardır [17].

Dolgunsuz ve pirinç kabuğu dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi hibrid kompozitlerinin mekanik özelliklerini ve erozyon aşınması davranışlarını Rout ve arkadaşları incelemiştir. Erozyon aşınmasını davranışlarını Taguchi deney tasarımı kullanarak belirlemişlerdir. Kompozit malzemelerin hepsi için 60° çarpma açısında en fazla aşınmanın meydana geldiğini ve yarı sünek erozyon davranış sergilediklerini bulmuşlardır. Dolgu oranın %0'dan %15'e kadar artışıyla boşlukların hacim fraksiyonu, mikro sertlik değeri ve darbe mukavemeti gibi mekanik özelliklerinde artışlar olduğu gözlemlenirken gerilme direncinde azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca dolgu oranının artışıyla erozyon

direncinin arttığını ve buna bağlı olarak da aşınmanın azaldığının sonucuna ulaşmışlardır [18].

Mahesha ve çalışma arkadaşları tek yönlü bazalt elyaf ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışlarını incelemişlerdir. 30° den 90° ye değişen farklı çarpma açılarında, 23 m/s, 40 m/s ve 61 m/s çarpma hızlarında ve 150-280 µm boyutları arasında değişen açılı silika aşındırıcı kullanarak erozyon aşınma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bazalt elyaf kompozit malzemelerin, cam elyaf kompozitlere göre daha iyi aşınma davranışı gösterdiklerini kaydetmişlerdir. Her iki kompozit malzemenin ise benzer şekilde yarı sünek erozyon davranışı sergilediklerinin ve en fazla aşınmanın 60° çarpma hızlarında olduğunun sonuçlarına ulaşmışlardır [19].

2018 yılında bir grup araştırmacı titanyum oksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) dolgulu cam elyaf takviyeli vinilester kompozitlerin mekanik özelliklerini ve erozyon aşınma davranışlarını incelemişlerdir. %0, %10 ve %20 TiO₂ ve ZnO dolgulu cam elyaf takviyeli vinilester kompozitlere 3 farklı aşındırıcı toz boyutunda, 3 farklı çarpma hızında ve 3 farklı çarpma açılarında Taguchi deneysel tasarımı kullanarak erozyon aşınması deneyleri yapmışlardır. Dolgu oranlarının %0'dan %20' ye artması sertlik, eğilme mukavemeti, çarpma mukavemeti ve kesme mukavemeti gibi mekanik özelliklerin artmasına çekme dayanımı özelliğinin azalmasına sebep olduğunu ortaya çıkarmışlardır. TiO₂ dolgusu ZnO dolgusuna göre mekanik özelliklerin gelişmesinde daha etkili olmuştur. 60° çarpma açısında en yüksek erozyon miktara geldiğini ve kompozit malzemelerin yarı sünek erozyon davranış sergilediklerini kaydetmişlerdir. Ayrıca dolgu oranının artmasıyla erozyon direncinin arttığını ve buna bağlı olarak aşınmanın azaldığının ve TiO₂ dolgusunun ZnO dolgusuna göre daha iyi erozyon direnci sağladığının sonucunu çıkarmışlardır [20].

Papadopoulos ve arkadaşları, dolgusuz ve karbon nano tüp dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeleri paralel ve dikey yönlendirme yaparak 30°, 60° ve 90° çarpma açılarında, keskin açılı yaklaşık 177-250 µm boyutlarında alüminyum oksit (Al₂O₃) aşındırıcı parçacık kullanarak ve 38 m/s çarpma hızında erozyon davranışlarını incelemişlerdir. İncelemelerinde dolgusuz karbon elyaf epoksi kompozitlerin 30° ve 60° açılarda erozyon oranları dolgulu kompozitlere göre düşük olduğunu, 90° açılarda ise erozyon oranlarının hemen hemen birbirine yakın olduğunu ve aynı zamanda da maksimum aşınmanın 60° çarpma açılarında olduğunun sonucuna ulaşmışlardır [21].

2014 yılında Kumar Padhi ve Satapathy, yüksek fırın cürufu parçacıkları ile dolgulu kısa cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin katı parçacık erozyon

davranışlarını Taguchi deney tasarımı kullanarak incelemişlerdir. Ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında yüksek fırın cürufu dolgulu kompozitlere, farklı çarpma açılarında, farklı çarpma hızlarında ve farklı test sıcaklıklarında katı parçacık erozyon deneyleri yapmışlardır. Endüstriyel bir atık olan yüksek fırın cürufunun epoksi kompozitlerin aşınmayı azaltması için kullanılabilir bir dolgu olduklarının, çarpma hızının ve dolgu oranının erozyon aşınmasında önemli olduğunun sonucunu çıkarmışlardır [22].

Rattan ve Bijwe, saf polieterimid (PEI) ve düz dokuma tipi karbon elyaf takviyeli polieterimid kompozitlerin mekanik özelliklerini ve katı parçacık erozyon davranışlarını incelemişlerdir. Deney numunelerine 26,88 m/s çarpma hızlarında, 15° den 90° ye değişen farklı çarpma açılarında ve 106-120 µm boyutlarına sahip aşındırıcıda erozyon deneyini gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda hacimce %40 karbon elyaf içeren polieterimid kompozitlerin saf PEI göre kopma uzaması haricinde diğer mekanik özelliklerinin geliştiğini kaydetmişlerdir. Ayrıca PEI malzemenin karbon elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla erozyon direncinin olumsuz olduğunun, en fazla aşınmanın 15°-30° çarpma açılarında meydana geldiğinin ve numunelerin SEM görüntülerinden hem gevrek hem de sünek kırılma davranışı sergilediklerinin sonucuna ulaşmışlardır [23].

Bağcı ve İmrek, ağırlıkça %15 oranında ve yaklaşık 150 µm boyutlarına sahip borik asit dolgulu ve 0° (0/90) ve 45° (45/-45) olarak yönlenmiş cam elyaf kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 0° ve 90° yönlenmiş kompozitlere, 200 ve 400 µm boyutlarına sahip alüminyum (Al₂O₃) aşındırıcı parçacık kullanarak 30°, 60° ve 90° çarpma açılarında, 20 m/s, 34 m/s ve 53 m/s çarpma hızlarında erozyon denelerine tabi tutmuşlardır. 450 yönlenmiş elyafa sahip olan kompozitlerin 0° yönlenmiş elyafa göre daha iyi erozyon direncine sahip olduklarını, en fazla aşınmanın 30° çarpma hızlarında gerçekleşerek sünek erozyon davranışı sergilediklerini, çarpma hızının artışı ile erozyon oranının arttığını bulmuşlardır. Ayrıca %15 borik asit dolgusunun erozyon direncini kötü yönde etkilediğinin sonucunu çıkarmışlardır [24].

2003 yılında Tewari ve çalışma arkadaşları tek yönlü karbon ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin erozyon davranışlarını araştırmışlardır. Deney numunelerini 0°, 45° ve 90° elyaf yönlenmelerinde üreterek, bu numunelere 15°'den 90° ye değişen çarpma açılarında ve 300-500 µm boyutlarına sahip çelik aşındırıcı bilyeler kullanarak 45 m/s çarpma hızında erozyon testi yapmışlardır. Yapılan deneylerde iki kompozit malzemenin yarı sünek erozyon aşınması davranışı sergilediklerini ve en fazla aşınmanın 60° çarpma açısında olduklarını kaydetmişlerdir. Elyafın yönlenmesinin erozyon

aşınmasında önemli etkisi olduğunu ve karbon elyaf kompozitlerin cam elyaf kompozitlere kıyasla daha iyi aşınma direnci sergilediklerinin sonuçlarına ulaşmışlardır [25].

Diğer bir araştırmacı grubu, PA 6, PA 11, PA 12, PA 66, PA 66/610 ve aromatik PA gibi çeşitli poliamidlerin erozif aşınma davranışını incelemişlerdir. Deneyleri 15°, 30°, 60° ve 90° çarpma açılarını, 90-180 µm toz boyutlarına sahip silika aşındırıcı parçacıklarını ve 80 m/s çarpma hızını kullanarak yapmışlardır. 30° çarpma açılarında 5 tane numune benzer özellikler gösterdiğini, maksimum aşınmayı bu çarpma açısında olduklarını ve yine aynı çarpma açısında PA 12'nin en fazla aşındığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda tüm PA çeşitleri için en az aşınmanın 90° çarpma açısında olduklarını ve PA'lerin sünek ve kauçuk erozyon davranışı sergilediklerinin sonucuna varmışlardır [26].

2008 yılında Patnaik ve diğerleri, Taguchi deney tasarımı kullanarak E-cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemelerin erozyon davranışlarını incelemişlerdir. Ağırlıkça %30, %40 ve %50 cam elyaf takviyeli polyester kompozitleri üretmişlerdir. Üretilen deney numunelerine, 3 farklı çarpma hızlarında, 3 farklı çarpma açılarında ve 3 farklı aşındırıcı boyutlarında erozyon deneyi yapmışlardır. Numunelerde sırasıyla, ağırlıkça %30'dan %50 cam elyaf eklenmesi erozyon davranışı kötü yönde etkilemiş olduklarını kaydetmişlerdir. Ayrıca polyester kompozitlerin 60° çarpma açılarında maksimum aşınmayla yarı sünek erozyon davranışı sergilediklerini sonucunu çıkarmışlardır [27].

Mohan ve arkadaşları, yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) dolgulu aramid kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına katı parçacık erozyon özelliklerini incelemişlerdir. Reçine transfer kalıplama yöntemiyle ürettikleri %0, %2 ve %4 dolgulu UHMWPE kompozitlere, ortalama 150-280 µm boyutlarına sahip silika (SiO₂) aşındırıcı parçacık kullanarak 30°, 60° ve 90° derece çarpma açılarında ve 20 m/s, 30 m/s ve 40 m/s çarpma hızlarında erozyon deneyine tabi tutmuşlardır. Dolgu oranlarının artışı kompozit malzemelerin erozyon oranlarını geliştirdiklerini görmüşlerdir. Dolgu oranlarının artışı ile erozyon oranların azaldığının, çarpma hızının artışı ile erozyon oranlarının arttığının ve en fazla aşınmanın 60° derece çarpma hızlarında gerçekleşerek kompozit malzemelerin yarı sünek davranış sergilediklerinin sonuçlarını kaydetmişlerdir [28].

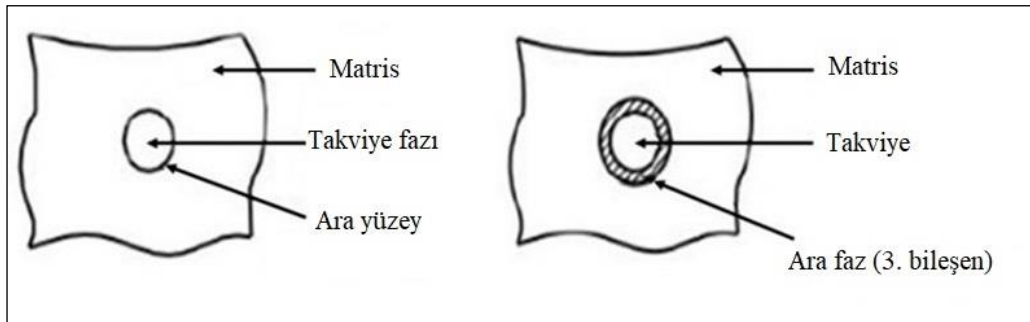
1.3. Kompozit Malzemeler

Kullanım amacına yönelik farklı özelliklerdeki birden fazla malzemenin en iyi özelliklerini, belirli koşul ve miktarlarda, makro düzeyde birleştirilerek oluşturulan yeni malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir [29-31].

Kompozit malzemelerin doğal olması, kimyasal bileşimlerinin farklı olması, birden fazla farklı malzemelerden meydana gelmesi ve bileşimindeki malzemelerin hiçbirinin özelliklerini tek başlarına taşınamaması kompozit malzemelerde istenilen koşullardır. Bu nedenle kompozit malzemeler mikroskobik olarak heterojen, makroskobik olarak ise homojen özellik sergilemektedir [29-31].

1.3.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı

Kompozit malzemeler en az bir tane ana malzeme üzerine ve yine aynı şekilde bir takviye elemanından oluşturulmak üzere imal edilirler. Kompozit malzemelerin üretimleri sırasında kullanılan yöntemlere bağlı olarak kompozit malzemeleri oluşturan ana malzeme ve takviye elemanları fiziki bir birleşim sergilemektedirler. Çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak bir araya getirilmiş olan kompozit malzeme bileşenleri, kendi özelliklerini kaybetmeden oluşturdukları ara yüzey (ara faz) bağlantıları ile biçimlerini kaybetmemektedirler [29-33]. Şekil 1’ de kompozit malzemenin iç yapısı verilmiştir.



Şekil 1. Kompozit malzemenin iç yapısı

1.3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin oluşturulmasında sonsuz sayıda malzeme kombinasyonu vardır. Bu da kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında kesin bir sınır çizilmesini mümkün kılmamakla birlikte, kompozit malzemeleri, yapılarındaki malzemeler ve yapılarındaki bileşenlerin şekline göre farklı biçimde sınıflandırılabilir [32].

1.3.2.1. Matris Yapılarına Göre Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin üretimleri genellikle, ana malzeme olarak adlandırılan matris malzemesi ile takviye elemanlarının belirli oranlarda ve mikro veya makro düzeyde karıştırılması ile yapılmaktadır. Kompozit malzemenin mukavemet değerlerini takviye elemanları belirlemektedir. Matris malzemesi ise kompozit malzemenin deformasyonu sırasında oluşabilecek çatlak ilerlemesini engelleyen görev üstlenerek kompozit malzemedeki kopmalara engel olmaktadır. Matris malzemelerin diğer bir görevi ise takviye elemanlarını bir arada tutarak kompozit malzemeye binen yükleri takviye elemanlarına homojen olarak dağıtılmasını sağlamaktadır. Şekil 2’de matris malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması verilmiştir [32, 34, 36].

Kompozit malzemelerdeki takviye elemanlarının görevlerini yerine getirmesi için matrislerin mekanik özellikleri önemli derecede rol almaktadır. Örnek vermek gerekirse matris malzemesi olmadığında yükler takviye elemanlarının birkaç tanesi ile taşınırken matrisin olması durumunda yükün yapıdaki tüm takviye elemanlarına eşit bir şekilde paylaşılmasını sağlayacaktır [34, 35].



Şekil 2. Matris yapılarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

a) Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler, iki ya da ikiden fazla metal malzemenin belirli oranlarda birleştirilmesiyle elde edilen yeni malzemelerdir. Bu kompozitler diğer alaşımlarla istenilen özelliklerin elde edilememesi üzerine üretilir. Metal matrisli kompozitlerin yapılarında metal bir matris ve bu matrisin içinde uzun veya kısa elyaf, whisker veya parçacık şeklinde takviye elemanlarını barındırır [36-38].

Metal matrisli kompozitlere bir yük uygulandığında bu yük tüm yapıya dağılır. Buda kompozitlerin kullanımının daha güvenli olmasını sağlamaktadır. Metal matrisli kompozitlerin tokluk ve mukavemet değerleri diğer gruplara göre daha iyidir bu da makine ve metalurji sektöründe bu malzemenin kullanılmasını sağlamaktadır [37].

b) Seramik Matrisli Kompozitler

Bir veya daha fazla metal ve ametalin birleştirilmesi sonucu oluşturulan ve organik olmayan yeni malzemelere seramik denilmektedir. Genellikle kil ve kaolen gibi malzemelerin yüksek sıcaklıklara sahip fırınlarda pişirilmesi sonucu oluşmak meydana gelirler. Kiremit, tuğla, porselen, nitritler, oksitler, silikatlar, boridler ve karpitler seramik grubundaki malzemeler grubuna girmektedirler. Seramik matrisli kompozit malzemeler, malzemelere yüksek sertlik, basma dayanımı, yüksek ergime sıcaklığı, iyi yalıtım özellikleri ve aşındırıcı özelliği gibi özellikler kazandırmaktadır [38-42].

Seramik matrisli kompozit malzemelerin en önemli özelliklerin başında yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve hafif olmaları gelmektedir. Ayrıca ısı şok direnci ve düşük tokluğa sahiptirler. Sertlik ve kırılma, düşük süneklik ve termal dirençlere karşı dayanıksız olmaları bu seramiklerin olumsuz yönlerindedir [32].

Seramik matrisli kompozitleri oluşturan bileşenler, üretim aşamaları, malzemenin mekanik, kimyasal ve ısı özellikleri bu kompozit malzemelerin performansını etkiler [43].

c) Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozit malzemelerin, matrisini polimer reçine ve takviye elemanını ise elyaflar oluşturmaktadır. Bu kompozit malzemeler kolay üretilmesi, düşük maliyetli olması açısından çok fazla tercih edilen kompozit malzemelerdir [38-40, 43].

Polimer kompozitler, düşük sertlik özellik sergilediklerinden dolayı oldukça zayıf kompozitlerdir. Bu kompozit malzemeleri yapısal olarak kullanılabilir duruma getirmek için iyi mekanik özellikler kazandırılması gerekmektedir. Bu mekanik özelliklerin kazandırılması için sürekli ve süreksiz elyaflar ile takviye edilerek güçlendirilmesi gerekir [36].

Polimer Kompozit malzemelerin, matris kısmını oluşturan polimerler, termoplastikler, termosetler ve elastomerler olarak üç gruba ayrılırlar [38, 39, 41, 44].

1. Termoplastik Malzemeler

Termoplastik malzemeler, ısıtıldığı zaman yumuşayıp sıvılaştıktan soğutulduğunda ise katılaşır ve sertleşen bir malzemedir. Termoplastik malzemelerde bu işlemin tekrarlanabilir olması, ısıtıldığında özelliklerini kaybetmemesinden kaynaklanır. Özelliklerini kaybetmemesinden dolayı termoplastikler tekrar tekrar işlenip şekillenme özelliklerine sahiptirler. Termal etkenlikleri metallere kıyasla düşük olmasına karşın termal genleşme katsayıları metallere göre yüksektir. Çok iyi elektrik yalıtkanlıkları, yüksek darbe dayanımları, sertlik ve rijitlik açısından düşük mukavemetli olmaları ve sünek olmaları termoplastiklerin bazı ayırt edici özelliklerindedir [39, 40, 44].

2. Termoset Malzemeler

Termoset malzemeler, termoplastiklere göre ısıtıldığı zaman tekrar tekrar şekillendirilemezler. Bu durum, termosetlerin molekül zincirlerinin çapraz bağlar ile birbirine bağlanmaları sonucu ne kadar ısıtılırsa ısıtılsın bu bağların birbiri üzerinde kayma hareketlerini yitirmemesidir. Termoset malzemeler, ısı ve basınç ile şekillenerek son halini alırlar. Termoset malzemeler kendi içinde farklı türlere ayrılmaktadır [39, 41].

Termoset malzemeler, epoksiler, polyesterler, fenolikler, silikonlar, poliamidler, poliüretanlar ve siyanet esterler olarak farklı türde sınıflandırılabilir [39, 40, 45].

Epoksiler: İyi yapışma özelliklerine sahip kimyasal bir reçinedir. Bu reçineler, sertleşme sırasında kullanılan sertleştiricinin türüne ve karıştırılma oranına göre kompozitlerin özelliklerini belirlemektedirler. Yüksek kimyasal dirençleri, iyi termik özellikleri, elyaflarla güçlü bağ oluşturmaları, iyi mekanik dayanımları, çok yüksek aşınma ve sürtünme dirençleri bu reçinelerin başlıca belirgin özellikleridir. İyi özelliklerinin yanı sıra, bu reçinelerin maliyetleri yüksek olması, UV ışınları karşısında moleküler bağlarının zayıflamaları, cilt ile uzun süreli teması durumunda alerjik etki oluşturması, göz ve solunum sistemlerini olumsuz etki etmeleri de kötü özelliklerindedir [39, 40, 45].

Polyesterler: Ekonomik (ortoftalik) ve suya karşı dayanım (izoftalik) olarak iki türe ayrılmıştır. Bu özelliklerinden dolayı denizcilik ve inşaat sektörlerinde çok fazla tercih edilirler. Polyester reçinelerin kimyasal ve mekanik dayanımları 100 °C sıcaklığın altında iyidir [37, 38]. Polyesterlerin, düşük maliyetli, kolay kullanımlı, korozyon dayanımlı, düzgün ve pürüzsüz yüzey elde edilmesi, orta mekanik özellikli, zehirli gazlar açığa

çıkarması, sertleşme sırasında fazla oranlarda kendini çekmesi ve kısa raf ömürlü olması gibi avantaj ve dezavantajları vardır [37, 39, 45].

Fenolikler: Fenol (C_6H_5OH) ve formaldehit (CH_2O) bileşiklerinden meydana gelir ve katı-sıvı formları mevcuttur. Bu reçineler, elektrikli ev aletlerinde, debriyaj/balata sistemlerinde, fren sistemlerinde ve koruyucu kaplama olarak kullanılır. Fenolik reçineli kompozitlerin en belirgin özellikleri, yüksek sıcaklıklara ve aleve karşı dayanımlarıdır [39, 40, 45].

Silikonlar: Silikon reçineler, sentetik polimerdir ve içlerinde oksijen ve hidrokarbonlar barındırırlar. Bu reçineler $250\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar sıcaklıklara karşı dayanımları, düşük sıcaklıklarda esnekliğini kaybetmemesi, mükemmel korozyona karşı dirençli olması, ortam ve hava şartlarına dayanıklı olması gibi çeşitli özellikleri vardır [39, 40, 45].

Poliamidler: Poliamid reçineler, petrolün hammaddesini oluştururlar. Çok yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Genellikle yüksek sıcaklık reçineleri olarak ve naylon olarak bilinmektedir. Zor şekilde üretilir ve maliyetleri yüksektir [39, 40, 45].

Poliüretanlar: Reaksiyon ürünü olan üretanı, izosiyonat ve hidroksil gruplarını kapsayan polimerlere 'Poliüretan' denilmektedir [37]. Bu poliüretanlar genellikle mobilya, otomotiv ve tekstil sektörlerinde, soğutma, suni deri, iyi özellikli yapıştırıcı ve ısı yalıtım gibi birçok alanda kullanılmaktadır [39, 40, 45].

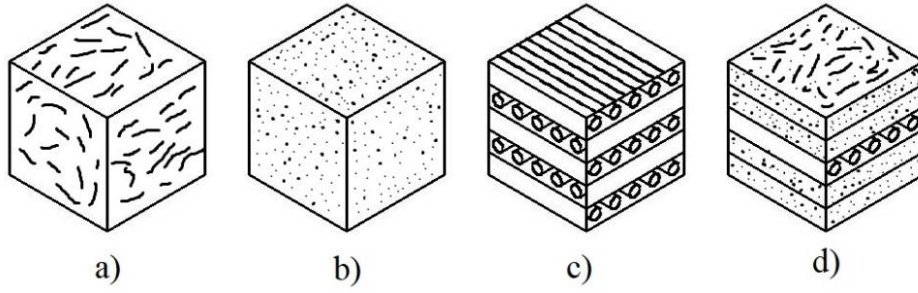
Siyanet esterler: Siyanet esterler genelde, uzay havacılık, elektronik sektörü gibi alanlarda çok fazla tercih edilirler. Bu esterler cam, metal ve karbon bazlı malzemelere çok iyi yapışma özelliği, radyasyona karşı dirençli olması, sıcaklığa ve aleve karşı iyi direnç göstermesi gibi üstün yanları vardır [39, 40, 45].

3. Elastomer Malzemeler

Elastomer malzemeler bir çekme kuvvetine maruz kaldığında %500 gibi uzama sergileyen ve bu kuvvetin geri bırakılması sonucu eski haline tekrar gelebilen çapraz bağlı ve ağsı bir yapıya sahiptir. Yaygın olarak bilinen doğal ve sentetik kauçuk gibi iki çeşit elastomer vardır [39, 40, 45].

1.3.2.2. Takviye Elemanlarına Göre Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, takviye elemanın matristeki şekline ve yerleşimine göre 4 gruba ayrılabilir. Bunlar Şekil 3'de görüldüğü gibi elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve hibrid kompozitler olarak ayrılabilir [32, 35, 42].



Şekil 3. Kompozitlerin sınıflandırılması; a) elyaf takviyeli, b) parçacık takviyeli, c) tabakalı ve d) karma (hibrid)

a) Elyaf Takviyeli Kompozitler

Bu kompozit malzemeler matris yapısı içine elyaflar eklenerek oluşturulmuştur. Takviye elemanının elyaf olmaması durumunda basma dayanımları iyi olmasına rağmen çentik darbe, çekme ve eğilme dayanımları gibi mekanik özellikleri kötüdür. Bu özellikleri iyi seviyelere taşımak amacıyla matris içerisinde elyaflar kullanılır. Elyaf takviyeli kompozitlerde matris, elyafları bir arada tutarak rijitlik ve kompozit malzemeye gelen yükü homojen bir şekilde tüm elyaflara dağılmasını sağlamaktadır. Kompozit malzemelerdeki matris ve elyaf oranları, mekanik özellik açısından çok önemlidir. Elyafların matris içerisindeki oranları belli seviyede arttığında kompozit malzemelerin mukavemet değerleri artmaktadır ama bu seviyenin daha fazla üzerine çıktığında ise matrisin elyafları tam bağlamayacağından, mukavemet değeri düşmektedir [32, 33, 37, 43, 44].

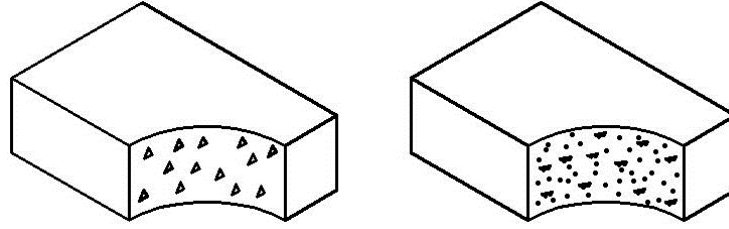
Elyafların çapları, kompozit malzemelerin mukavemetine etki yapan diğer bir özelliktir. Elyafların çapları küçüldükçe, matrisin elyafları bağlaması güçlenerek mukavemet değerleri artar tam tersi durumda ise mukavemet değerleri azalır [33, 34, 37, 44].

Elyafların matris içerisindeki dağılımı, yine mukavemet özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Elyafların matris içerisinde birbirine paralel olarak yerleştirilmeleri, elyaflar yönünde yüksek mukavemet sağlarken, dik doğrultuda yerleştirilmeleri ise düşük mukavemet sağlamaktadır. Ayrıca elyafların uzunluk/çap değerleri artarken matris tarafından elyaflara binen yük miktarı da artmaktadır [34, 35, 37].

b) Parçacık Takviyeli Kompozitler

Kompozit malzemenin matrisi içerisindeki diğer bileşenin yapıda parçacık halinde bulunması sonucu elde edilmişlerdir. Bu kompozit malzemelerin mukavemet özellikleri yapı içerisindeki parçacıklarının sertlik değerlerine bağlıdır. Parçacık takviyeli kompozit

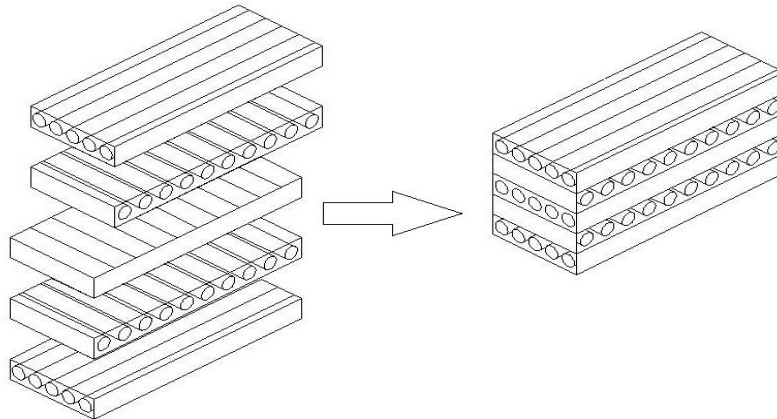
malzemelerin en yaygın tipi, plastik bir matris içinde metal parçacıkların yer almasıdır. Yapı içerisindeki metal parçacıklar kompozit malzemeye ısı ve elektrik iletkenlik kazandırır. Metal bir yapı içerisindeki seramik parçacıklar ise kompozit malzemelere sertlik ve yüksek sıcaklık dayanımı kazandırmaktadır [46-48].



Şekil 4. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

c) Tabakalı Kompozitler

En eski ve yaygın olarak kullanılan tabakalı kompozitler, farklı elyaf yönlenmelerine sahiptir. Bu elyaf yönlenmeleri tabakanın bileşimine göre kompozit malzemelere mukavemet değerleri vermektedir. Tabakaların levhalar ve ince filimler şeklinde olması kompozit malzemelerin farklı yön ve özellikte elde edilmesine imkân tanır. Korozyon direnci kötü olan metallere, korozyon direnci yüksek olan plastik ve metal ile kaplanarak korozyon dirençleri artırılır. Yumuşak malzemeler ise sert malzemelerle birleştirilerek sertlik, yük taşıma özelliği ve aşınma özelliği artırılabilir [43-49].



Şekil 5. Tabakalı kompozitler

d) Karma (hibrid) Kompozitler

En az iki veya daha fazla farklı türde elyaf kullanılarak elde edilen kompozitlere karma (hibrid) kompozitler denilmektedir. Hibrid kompozit malzemelerle, belirli türdeki elyafların farklı fiziksel, kimyasal ve mekaniksel olarak sahip olduğu en iyi özellikleri diğer üstün özellikli elyaflara aktararak, tek bir elyaftan elde edilemeyen üstün özellikli ürünler elde edilebilir [46].

1.3.3. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk sertlik, termal özellikleri ve aşınmaya karşı dayanım vb. gibi birçok özellik avantaj sağlamaktadır [50]. Kompozit malzemelerin metal malzemeler ile kıyaslandığında çok sayıda malzeme kombinasyonunun olması bu malzemelere üstün özellik vermektedir. Kompozit malzemeler genellikle düşük ağırlık ve yüksek mukavemet aranan özellikleri karşılamak için tasarlanır. Kompozit malzemelerin metal ve diğer malzemelere göre birçok avantaj ve dezavantajları vardır ve şu şekilde sıralanır [51, 52].

a) Avantajları

- Üretilmesi mümkün olmayan karmaşık şekillere sahip metal malzemeler kaynak veya perçinleme yöntemi kullanılmadan tek parça halinde kompozit olarak üretilebilir.
- Kompozit malzemeler, alüminyum ve çelik malzemelere kıyasla yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen düşük yoğunluklara sahiptir.
- Yorulma dayanımları oldukça iyidirler.
- Darbelere karşı dayanımları oldukça gelişmiştir.
- Metallere göre ses ve titreşim dayanımları oldukça üstündür.
- Kompozitlerin antikorozyon özelliği, diğer malzemelerden üstündür

b) Dezavantajları

- Üretim maliyetlerinin yüksek olması,
- Yüzey pürüzlülüğünün iyi olmaması
- Geri dönüşümlerinde zorlukların olması,
- Üretimlerinin zahmetli olması
- İşletme maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

1.3.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Farklı ihtiyaçları karşılamak amacıyla kompozitlerin birçok farklı üretim sistemleri vardır. Bu üretim yöntemlerinin her birinin farklı avantajları vardır. Bu nedenle istenilen şekil, kaliteye ulaşmak için belirli üretim yöntemleri uygulamak gerekir.

Bu üretim yöntemleri matris malzemesine göre metal ve polimer matrisli kompozitler olarak iki grupta toplanabilir [38, 53].

a) Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri

- Sıcak presleme
- Toz metalurjisi
- Sıvı metal emdirme
- Buhar çöktürme
- Elektroliz yöntemi
- Haddeme

b) Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri

Polimer matrisli kompozit malzemeler reçine türlerine göre termoset ve termoplastik reçine olarak tipe ayrılır. Bunlardan termoset reçineli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri aşağıdaki gibidir.

- El yatırma yöntemi
- Püskürtme yöntemi
- Reçine Transfer kalıplama yöntemi
- Elyaf sarma yöntemi
- Vakum torbalama yöntemi
- Otoklav bağlama yöntemi

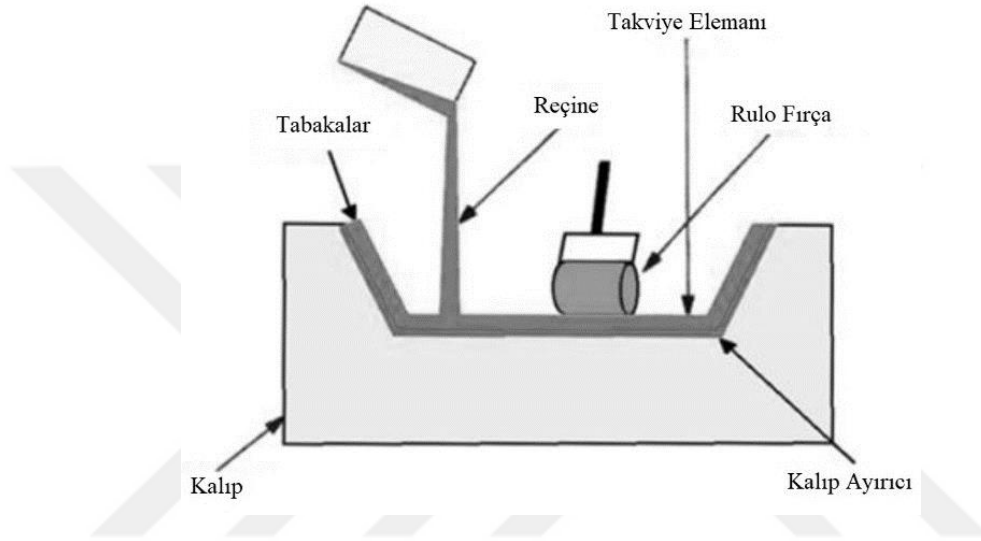
El Yatırma Yöntemi

El yatırma yöntemi, genellikle cam elyaf takviyeli kompozitlerin üretilmesinde tercih edilirler. Bu yöntem ile kamyon, otomobil, tekne gibi araçların gövdelerindeki panellerin, havalandırma sistemindeki kanalların, depoların gövdeleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır [38, 39, 53]. Bu üretim yöntemi polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir kaplama yöntemidir. El yatırma yönteminin ucuz olması, bu yöntemde kullanılan aletlerin uygun olmasından kaynaklanır [38, 39, 54].

El yatırma yönteminde, kalıp maliyetinin ucuz olması, üretilecek malzemelerinin boyutlarında sınırlandırılma getirilmemesi, farklı geometrilerde kalıp tasarımı

yapılabilmesi gibi birçok avantajları vardır. Bu avantajlarının yanında, kompozit malzemenin kalitesini üreten kişinin becerisi sergilemektedir [51, 52, 54].

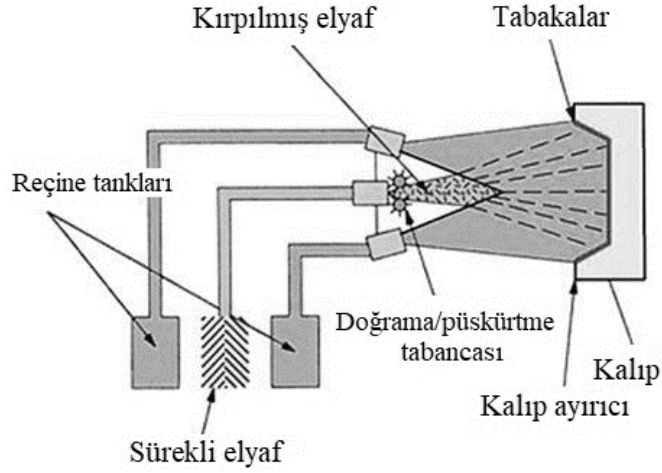
Bu yöntem Şekil 6.' de görüldüğü gibi bir kalıba, kalıp ayırıcı sürülerek ve daha sonrada elyaflar serilerek üzerine bir rulo fırça yardımıyla reçine sürülmesiyle şeklinde uygulanan bir yöntemdir. İstenilen malzeme kalınlığı elde edilinceye kadar devam ederek işlemin sonlandırılır [38, 44, 53-57].



Şekil 6. El yatırma yöntemi

Püskürtme Yöntemi

Bu yöntem genel olarak el yatırma yöntemine benzemektedir. Ancak, bu yöntemde kullanılan takviye elemanları kırılmış olarak kullanılmaktadır. Püskürme yöntemi en çok kayık, tekne, araba kaportası ve tank gibi alanlarda tercih edilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi bir tabancaya gelen sürekli elyaflar kırılarak belirli bir hızda reçine ile karıştırarak bir kalıba püskürtülmesi şeklinde uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde istenilen kalınlık elde edilmesi sonucu püskürtme sonlandırılır. Kullanılan araç ve gereçlerin maliyetlerinin düşük olması, üretilen parça boyutlarının sınırlandırılmaması ve karmaşık şekilli parça üretiminin kolay olması yönünden avantajlı bir yöntemdir [40, 44, 53, 54, 57].



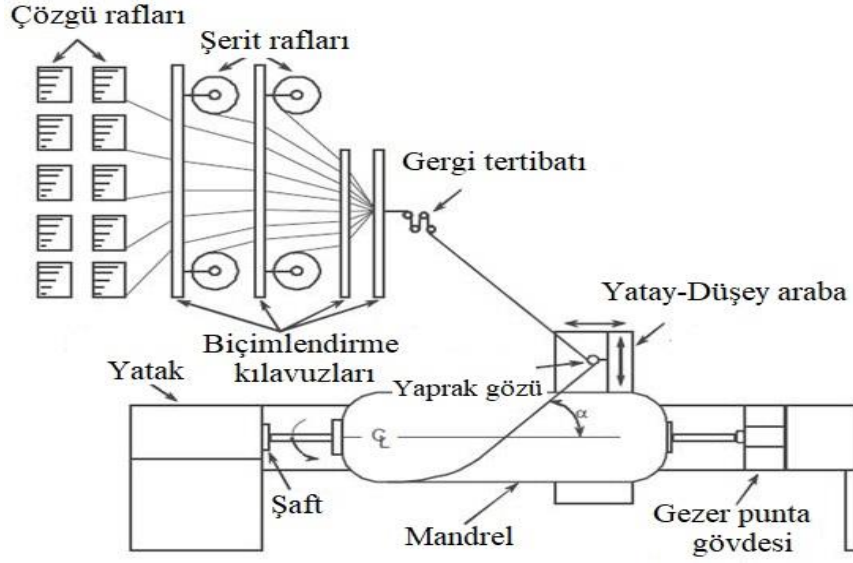
Şekil 7. Püskürtme yöntemi

Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM)

Bu üretim yöntemi, el yatırma yöntemine kıyasla daha hızlı ve uzun ömürlüdür. Bu yöntemde üretim yapılması için iki farklı kalıp kullanmak gerekir. Kalıpların kompozit malzemeler ile yapılması çeliklere göre daha düşük maliyetlidir. Reçine transfer yöntemi, iki yüzeylerin de düzgün olması istenilen durumlarda jelkotlu veya jelkotsuz olarak kullanılır. Bu yöntemde takviye elemanları kalıp içerisine önceden yerleştirilir ardından reçine uygulanarak işlem sonlandırılır [40, 44, 48].

Elyaf Sarma Yöntemi

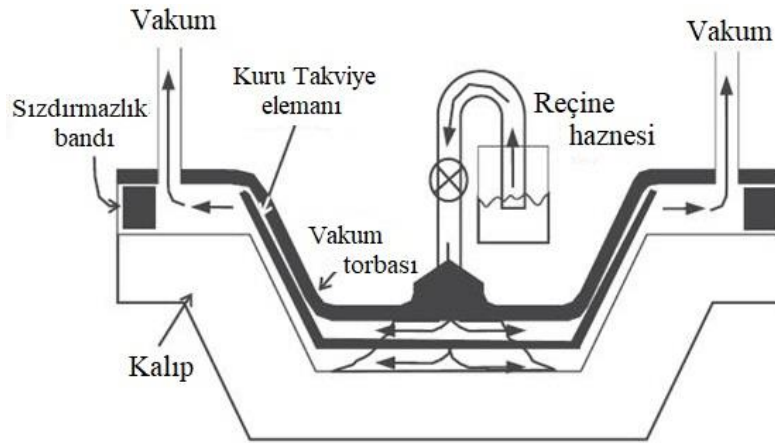
Elyaf sarma yöntemleriyle genellikle boru, basınçlı tank ve roket gövdesi gibi silindirik parçaların üretilmesinde kullanılan açık kalıplama yöntemidir. Bu yöntemde kalıplama için silindirik miller veya özel olarak şişirilip üretim sonlanınca tekrar sönen miller kullanılmaktadır. Elyaf sarma yöntemi Şekil 8.'deki gibi elyafların bir reçine dolu hazne içerisinden geçirilerek miller üzerine belirli açılarda sarılarak, milin ileri ve geri hareketi ile istenilen gerginlik ve kalınlıkta sarılmasıyla sonlanmaktadır [40, 44, 45, 56].



Şekil 8. Elyaf sarma yöntemi

Vakum Torbalama Yöntemi

Bu üretim yöntemi Şekil 9.'da görüldüğü gibi takviye elemanlarının bir kalıba yerleştirilmesi ve daha sonra kalıbın üzeri bir vakum torbası ile kapatılarak vakuma alınması olaylarını içermektedir. Bu yöntemde, diğer yöntemlere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip ürünler elde edilmektedir [39, 54, 56, 58, 59].



Şekil 9. Vakum torbalama yöntemi

Otoklav Bağlama Yöntemi

Kompozit malzemelerin, elyaf/hacim oranlarını artırılması ve malzeme içerisinde oluşan hava kabarcıklarının alınmasıyla performansları artırılabilir. Bunun

sağlanması için malzemelere yüksek sıcaklık ve basınç uygulamak gereklidir. Otoklav bağlama yöntemi, vakum bağlama gibi malzemeye sızdırmaz bir torba ile basınç uygulamaktır. Ama bu basınç için ısı ve vakumun kontrol edilebildiği kaplar kullanılmaktadır. Vakum bağlaması yöntemine benzemektedir ancak burada otoklav tankı, vakum bağlama yöntemindeki fırınlar yerine kullanılır. Bu şekilde, özel amaçlar ve yüksek kalitede kompozit malzemelerin üretimi için kür şartları çok rahat kontrol edilir. Bu yöntem diğer yöntemlere nispeten uzun sürelerde üretimin gerçekleşmesinden ötürü pahalı bir sistemdir [44, 47, 48].

1.4. Aşınma

Günümüzde aşınma, tribolojik sistemlerde çok sık karşılaşılan büyük bir problemdir. Aşınma genel olarak, malzemelerin yüzeylerinden fiziksel, kimyasal ve mekanik etkiler ile istenmeyen malzeme kaybı olarak ifade edilir. ASTM G4093 ve DIN 50320 standartlarında ise aşınma, kullanılan malzemelerin farklı bir malzemeyle (katı, sıvı ve gaz) çeşitli etkenlerle teması sonucu bu malzemenin yüzeyinden ufak parçacıkların kopması sonucu oluşan yüzey bozulması olarak tanımlanmaktadır [60].

Malzemelerdeki yıpranma ve yüzey bozulması gibi olaylarının bir aşınma olarak nitelendirilmesi için aşağıdaki gibi şartları sağlaması gereklidir [61].

- Mekanik, fiziksel ve kimyasal bir etkinin olması,
- Sürtünme olması,
- Yavaş ve sürekli olması,
- Malzeme yüzeylerinde farklılık oluşturması,
- İstemsizce meydana gelmesi,

Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Aşınmayı etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörleri Şekil 10' daki gibi sınıflandırılabiliriz [61, 62].



Şekil 10. Aşınmaya etki eden faktörler

Malzemelerin kristal yapısı, sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve boyutu gibi faktörler malzemeye bağlı koşullar olarak değerlendirilir. Aşınma sistemindeki sıcaklık, nem ve atmosfer gibi faktörler aşınmanın ortamdaki kaynaklandığını ve sistemindeki basınç, hız ve kayma yolu gibi faktörler ise aşınmanın servis koşullarından kaynaklandığını göstermektedir [62].

1.4.1. Aşınma Türleri

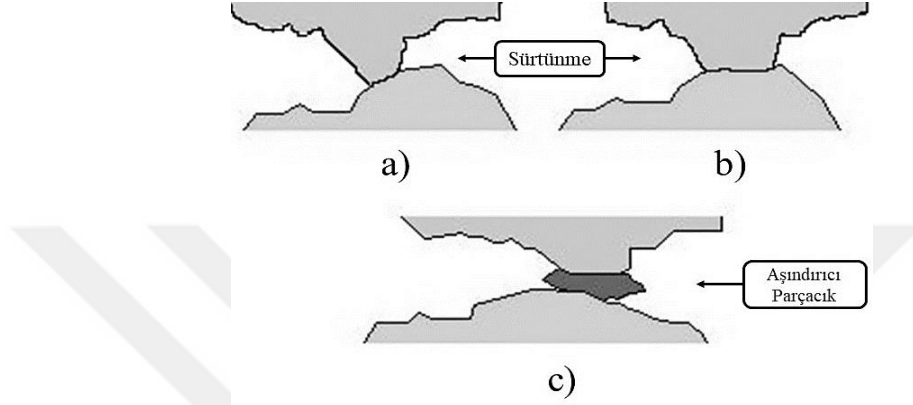
Tribolojik sistemde aşınmanın oluşması ve sürekliliğinin devam etmesi için fiziksel, kimyasal ve mekanik etkilerinin iletildiği şekline göre farklı mekanizmalar vardır. Günümüzde en sık karşılaşılan aşınma mekanizmaları aşağıdaki gibidir [59-63].

- Adezyon aşınma
- Abrazyon aşınma
- Korozyon aşınma
- Yorulma aşınma
- Erozyon aşınma

1.4.1.1. Adezyon Aşınması

En sık karşılaşılan aşınma türleri arasında adezyon (adezif) aşınmasıdır. Bu aşınma türünün teorisi kaynak bağı olarak ifade edilmektedir. Adezyon aşınma, malzemenin kayma sürtünmesi sonucu birbirlerine kaynaklaşarak yüzeylerinden ufak parçacıkların taşınmasıdır [64].

Birbirlerine kristal kafes yapısı bakımından benzeyen malzemelerde adhezif aşınma çok sık karşılaşılr. Bu malzemelerin hareket ve sürtünmelerinden açığa çıkan ısının artması ile yüzeylerindeki kaynama çok daha kolay olmaktadır. Buradaki kaynama olayındaki amaç yüksek sıcaklıktan kaynaklanan yüzeylerin birbiriyle bağ kurmasıdır. Şekil 11’de adhezif aşınmanın şematik resmi görülmektedir [65].



Şekil 11. Adezyon aşınması

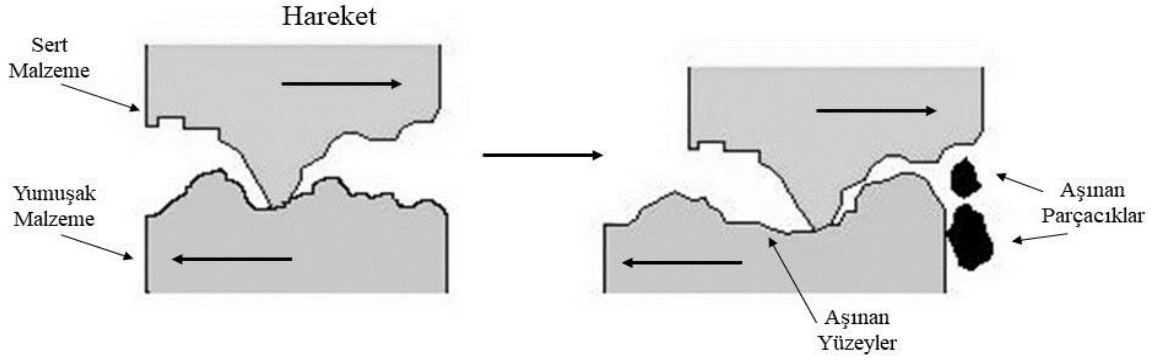
Adezyon aşınmasının önlemesi için [48];

- Kullanılan malzemelerin kolay alaşım yapan ve benzer malzeme seçilmemesi,
- Malzeme yüzeylerinde kimyasal kaplamaların oluşturulması,
- Birbiri arasında çözünmeyen iki metal kullanılması,
- Sistemde iyi yağlama metotları kullanması,
- Isı oluşmasının engellenmesi veya sıcaklığı azaltması,

1.4.1.2. Abrazyon Aşınması

Abrazif ya da abrazyon aşınması, çizilme veya yırtılma aşınması olarak da tanımlanmaktadır. Bu aşınma, sert ve keskin köşelere sahip parçacıkların karşı malzeme yüzeyinden küçük parçacıkları kalmasıyla oluşmaktadır. Bu sert ve keskin köşeli parçacıklar, malzemenin yüzeylerinde talaş kaldırma etkileri meydana getirirler. Bu şekilde aşınmış yüzeylerde, çizikler, kesikler ve yırtıklar oluşur. Metal şekillendirmede kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinin temeli bu aşınmaya dayanır [62]. Tarım alanında kullanılan

pulluklar ve kazı yapmak için kullanılan iş makinası bıçakları gibi parçalarda abrazyon aşınmaya çok sık karşılaşılmaktadır [66, 67].



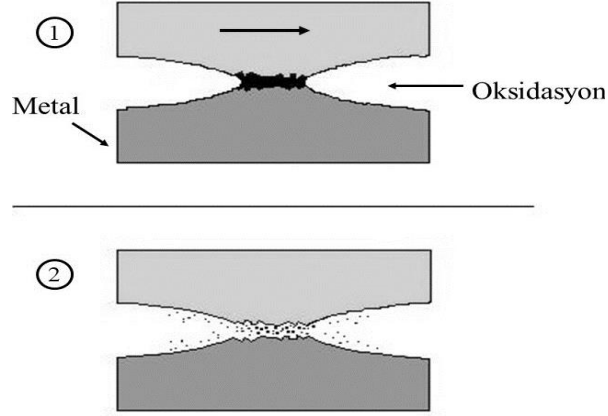
Şekil 12. Abrazyon aşınması

Abrazyon aşınmasının önlenmesi veya etkisinin azaltılması için [48];

- Yüzeyle ısı işlem veya sert kaplamalar yapılmalıdır. Bu yöntem abrazyon aşınmanın önlenmesinde etkilidir ancak bu yöntem malzemeleri gevrekleştirerek kırılma risklerini ortaya çıkaracaktır.
- Malzeme yüzeylerinin arasına dışarıdan gelebilecek sert parçacıkların engellenmesi sağlanmalıdır. Bunun için kullanılan hava, su ve yağlayıcı sistemleri bir filtreden geçirilerek kullanılmalıdır.
- Tasarımlarda aşınmaya maruz kalan parçaların değiştirilmesi kolay olacak tasarımlar yapılmalıdır. Bu şekilde yapılan tasarımlar bu aşınmayı azaltmaktadır.

1.4.1.3. Korozyon Aşınması

Malzeme yüzeyleri, bulunduğu ortamla reaksiyona girerek yüzeylerinde oksit ve diğer tabakaları meydana getirir. Özellikle, kimyasal maddelere maruz kalan makine parçalarının yüzeyleri bu kimyasallar ile reaksiyona girerek parçalarının yüzeylerinde sert tabakalar oluşur. Malzemeler değişen yükler altına olduğunda bu tabakalar zamanla kırılır. Kırılan bu parçacıklar yüzeyden ayrılarak aşınma parçacıklarını meydana getirirler. Temiz kalan yüzeylerde yeniden reaksiyon kaynaklı bir tabaka oluşur ve bu tabakalar yük altında tekrardan kırılır ve bu şekilde süren olaya korozyon ya da korozyon aşınması adı verilir. Şekil 13’de korozyon aşınma görülmektedir [48].

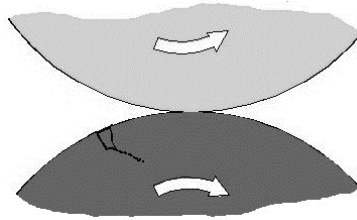


Şekil 13. Korozyon aşınması

Korozif aşınmanın oluşmasındaki en büyük nedenlerden bir tanesi pasır. Pas ise malzeme yüzeylerinde okside sebep olmaktadır. Yüzeylerin fosfat veya sülfid ile kaplanması, yağlayıcıların kullanılması ve birbirleriyle reaksiyon oluşturmayacak alaşım elementlerinin seçilmesi bu aşınma türünün önlenmesinde etkilidir [48].

1.4.1.4. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, dişli çarklar, kam milleri, krank milleri ve rulmanlı yataklar gibi makine elemanlarında çok sık karşılaşılmaktadır. Makine sistem ve parçalarında, değişen ve tekrar eden yükler sonucuyla yorulma aşınması meydana gelmektedir. Bu yükler parçaların yüzeylerinde çok küçük çatlaklar oluşturur ve oluşan çatlaklar zamanla ilerleyerek küçük parçacıkların kopmasına neden olur [68-70]. Şekil 14'de yorulma aşınmasına ait şematik görüntü verilmiştir [71].

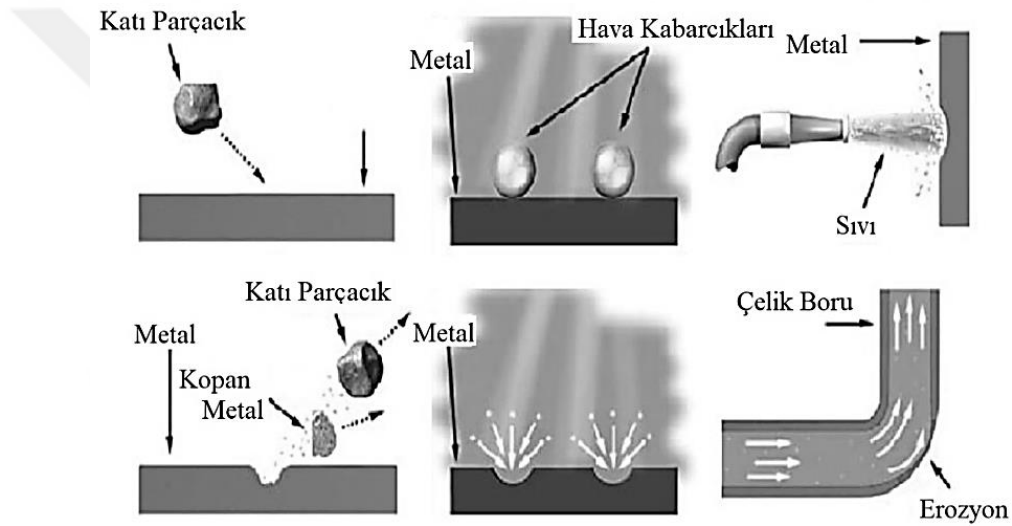


Şekil 14. Yorulma aşınması

1.4.1.5. Erozyon Aşınması

Erozyon aşınması, katı ve sıvı gibi taşıyıcıların içerisindeki parçacıkların bir malzeme yüzeyine çarpması ve bu yüzeyden parçacık koparması ile oluşan aşınma türü olarak tanımlanır [62]. ASTM G76-95 standardında ise bu aşınma belirli bir ivmeye sahip aşındırıcı partiküllerin, bir yüzeye temas etmesi neticesinde bu yüzeyden malzeme kaybı ile sonuçlanmış olay olarak ifade edilmektedir [48].

Erozyon aşınması bir miktar abrazif aşınması türüne benzer ama bu aşınma türünde deformasyon ve kırılma birlikte oluşmaktadır. Şekil 15’de erozyon aşınması gösterilmiştir.



Şekil 15. Erozyon aşınması

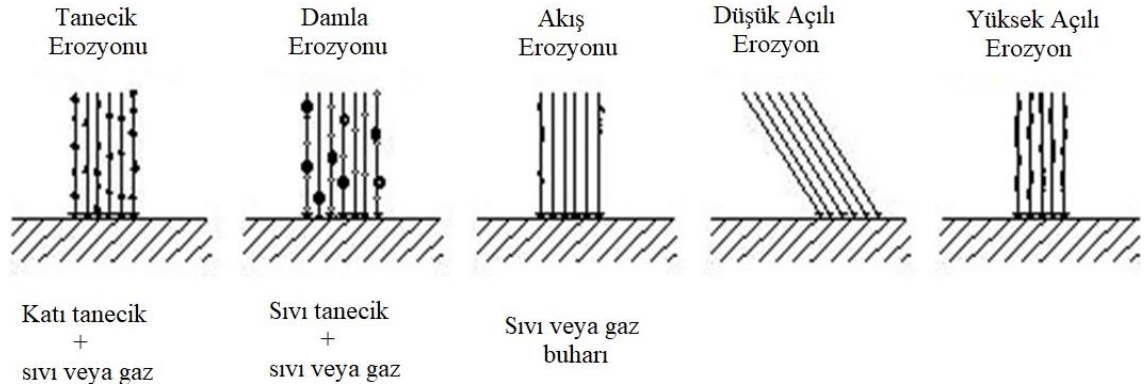
1.4.2. Erozyon Aşınmasına Etki Eden Faktörler

Katı, sıvı ve gaz gibi taşıyıcılar sonucunda makine parçalarının yüzeylerinde oluşan çatlak, çizik, çukurcuk ve oyuk şeklinde görülen problemler erozyon aşınması için büyük öneme sahiptir. Yüzeylerdeki bu problemlerin oluşumunda malzeme özellikleri, aşındırıcı özellikleri, çalışma koşulları ve çevresel koşullar büyük etki yapmaktadır. Erozyon aşınmasını Şekil 16’deki gibi birçok faktör etkilemektedir [72].



Şekil 16. Erozyon aşınmasına etki eden faktörler

Bu aşınma faktörleri tüm malzeme için aynı etkiyi yaratmamaktadır. Çünkü günlük hayatta bu faktörlerin farklı varyasyonları sonucu çeşitli erozyon aşınma türleri ortaya çıkmaktadır. Bu durumdan dolayı erozyon aşınmasının seyri farklılık göstermektedir. Şekil 17’de en çok karşılaşılan erozyon aşınma türleri verilmiştir [48].



Şekil 17. Erozyon aşınması türleri

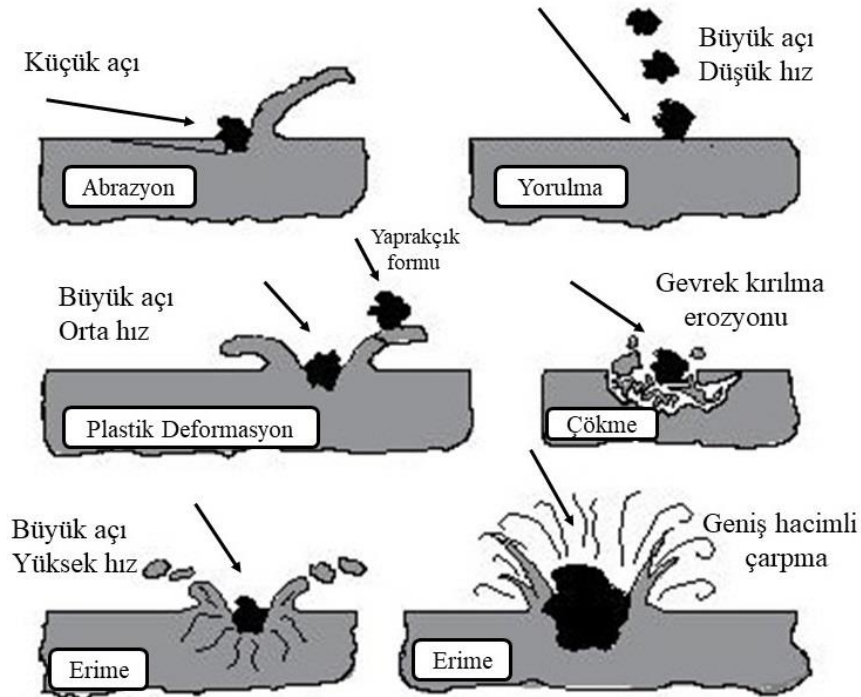
Erozyon aşınması türleri arasında en fazla karşılaşılan tür, katı parçacıkların bir malzemeye ye etkimesi ve bu malzemenin yüzeyinden küçük parçacıkların koparması ile oluşan aşınma türüdür.

1.4.3. Erozyon Aşınma Mekanizmaları

Erozyon aşınmasında genel olarak tekli çarpma durumun gerçekleştiği görülmesinin yanında birçok çoklu çarpma durumu da görülmektedir. Bu çoklu çarpmalar sonucu aşındırıcıların hedef malzeme yüzeyi ile etkileşimi ve bu etkileşim sonrası malzeme yüzeyinde değişimler meydana getirir. Bu değişimler beraberinde daha kompleks olayları da getirmektedir.

Yüksek hızlardaki aşındırıcı parçacıklar, kinetik bir enerji meydana getirerek bir malzeme yüzeyine çarpması durumunda bu yüzeyde değişiklik oluştururlar. Bu değişimler ana malzemede adhezif ve abrazyif etki oluşturmakta ve bu da malzeme yüzeyinde plastik deformasyonlar meydana getirmektedir. Bu şekilde erozyon aşınmasında artış görülmektedir.

Malzeme yüzeylerinde tekli ve çoklu çarpmalar neticesinde bu yüzeylerde mikro çatlama, çizilme ve kesilme gibi birçok olay oluşmaktadır. Bununla birlikte malzeme yüzeyinde ve bu yüzeyin altında darbeler etkisiyle yorulma çatlakları meydana gelmektedir. Yorulma çatlaklarının ilerlemesi sonucu bu yüzeyde çukurlar ve oyuklar oluşur. Şekil 18'deki şematik gösterim bu durumu açıklamaktadır [73].

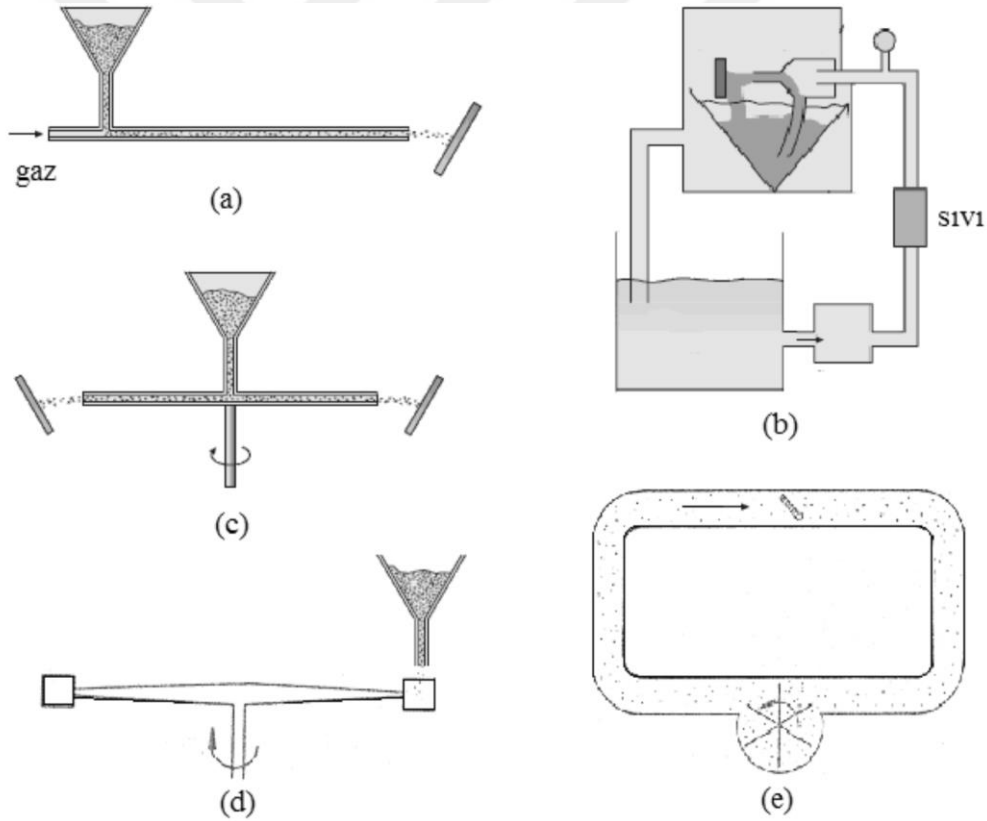


Şekil 18. Erozyon aşınmasında karşılaşılan mekanizmalar

1.4.4. Erozyon Aşınması Deney Metotları

Laboratuvar tipi erozyon aşınma cihazları, belirli aşınma oranları hakkında veri elde edilmesi, teorideki modellerin gerçekliğinin araştırılması ve aşınma mekanizmalarının incelemesi için kullanılmaktadır. Bir deney çıktısının doğru olması için aşındırıcı parçacıkların hızı, debisi ve çarpma açısı gibi değerlerin belirlenmesi ve deneyi yapılan malzeme ve aşındırıcılar çok iyi karakterize edilmektedir [48].

Laboratuvarlarda en yaygın kullanılan erozyon deney düzenekler, aşındırıcıların bir sıvı veya hava akıntısında hızlandırıldığı düzenekler ve aşındırıcıların çarpma hızı kazanmasını sağladığı daimî bir hareketin kullanıldığı düzenekler olarak sınıflandırılabilir. Bu deney düzenekleri Şekil 19’de verilmektedir [48].



Şekil 19. Erozyon aşınması deney metotları; a) katı parçacık, b) sıvı-çamur, c) santrifüj hızlandırıcı, d) dönen kol ve e) sirkülasyon metodu

Şekil 19 (a) ve (b)'de aşındırıcılara paralel kenara sahip bir nozul aracılığı ile sıvı veya gaz akıntısında hız kazandırılır. Hız kazanan bu aşındırıcılar daha sonra nozul

sonunda bulunan numunelere çarparak aşınma meydana getirir. Şekil 19 (c)' de gösterilen yöntem açık merkezli hızlandırıcı olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemde parçacıkların sirküler akışını elde etmek için dairesel bir hareket kullanılır. Genelde bu yöntem hava veya vakum alınarak kullanılır. Aşındırıcılar test düzeneğinin üstünden alınır ve radyal kanallar vasıtasıyla dışarı doğru hızlanırlar. Şekil 19 (d)' de sabitlenmiş bir rotor vardır. Bu rotora deney numuneleri bağlanır ve çevresel bir hızda aşındırıcıların akış yoluna doğru hareket ettirilerek yüksek hızlar elde edilir. Bu test metodu genellikle rotorları döndürmek için gerekli enerjiyi azaltmak adına vakum altında yapılır. Bu yöntem çimento tesislerinde tercih edilmektedir. Şekil 19 (e)' de ise test metodunda bir pompa kullanılmaktadır. Bu metot hidrolik ve pnömatik sistemlerin valflerinin aşınma oranlarını ölçmek için tercih edilir [48].



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelere farklı tür ve oranlarda dolgu malzemeleri eklenerek numuneler üretilmiş ve üretilen numunelerin erozyon davranışları incelenmiştir. Dolgu malzemesi olarak silis dumanı (SiO₂) ve çinko oksit (ZnO) kullanılmıştır. Numuneler epoksi reçine esaslı cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler olmak üzere iki grupta üretilmiştir. Numune üretiminde kullanılan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir

2.1. Kullanılan Malzemeler

Reçine ve Sertleştirici: Kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak Dost Kimya firmasından temin edilen Hexion Resin MGS LR285 epoksi reçinesi ve reçine sertleştiricisi olarak MGS LH285 kullanılmıştır.

Reçine ve sertleştiricinin özellikleri ve karışım oranları Tablo 1-3' de verilmiştir.

Tablo 1. Reçine Özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³)	1,18 – 1,23
Viskozite (mPas)	600 – 900
Epoksi eşdeğeri gr/eşdeğer	155 – 170
Epoksi değeri eşdeğer/100gr	0,59 – 0,65
Çalışma Sıcaklığı	-60 °C / +50 °C Isıl işlem uygulanmadan -60 °C / +80 °C Isıl işlem uygulanarak
Proses Sıcaklığı	+10 °C / +50 °C
Özellikleri	Çok üst düzey uyumluluk Çok iyi mekanik ve ısıl özellikler 45 dk.'dan 4 saate kadar çalışma süresi

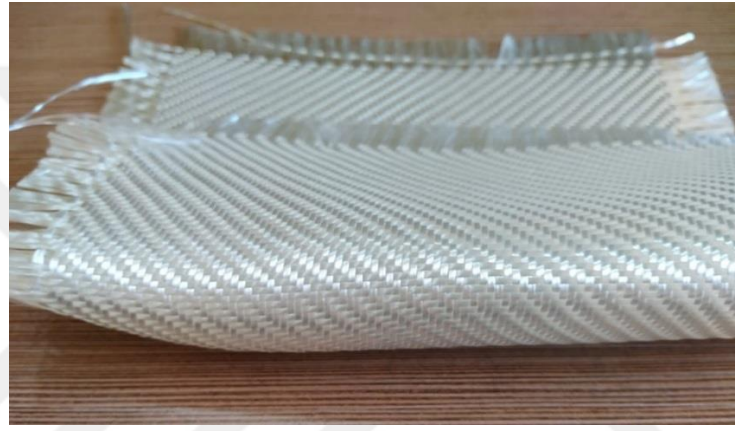
Tablo 2. Sertleştirici Özellikleri

Yoğunluk (g/ cm ³)	0,94 – 0,97
Viskozite (mPas)	50 – 100
Amin Değeri (mg KOH/g)	480 – 550

Tablo 3. Reçine-Sertleştirici Karışım Oranları

Laminasyon Reçinesi L285 – Sertleştirici H285	
Ağırlıkça	100: 40±2
Hacimce	100: 50±2

Cam Elyaf (E-camı elyafı): Numune üretiminde takviye malzemesi olarak twill örgülü kumaş halinde Dost Kimya firmasından temin edilen cam elyaflar kullanılmıştır. Cam elyafın fotoğraf görüntüsü Şekil 20’ de özellikleri ise Tablo 4’ de verilmiştir.

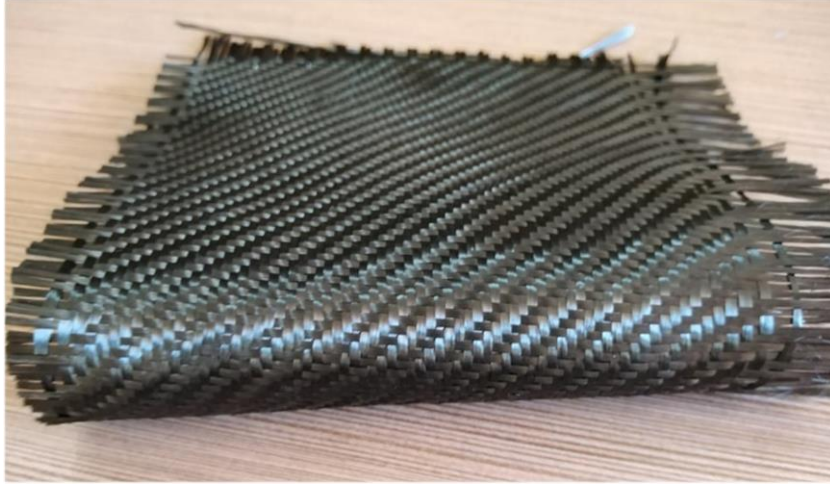


Şekil 20. Üretimde kullanılan cam elyafın görüntüsü

Tablo 4. Cam Elyafın Özellikleri

Cam Elyaf Kumaş	
Elyaf Çapı (μm)	6 – 9
Yoğunluk (g/cm^3)	2,54
Birim Ağırlık (g/m^2)	300
Örgü	Twill
Çekme Dayanımı (MPa)	3450
Elastisite Modülü (GPa)	72,4
Kopmadaki Birim Boy Değişimi (%)	2,8

Karbon Elyaf: Numune üretiminde takviye elemanı olarak kullanılmıştır. 3K Twill örgülü kumaş halinde Dost Kimya firmasından temin edilmiştir. Karbon elyafın fotoğraf görüntüsü Şekil 21 de özellikleri ise Tablo 5’ de verilmiştir.



Şekil 21. Üretimde kullanılan karbon elyafın görüntüsü

Tablo 5. Karbon Elyafın Özellikleri

Karbon Elyaf Kumaş	
Elyaf Çapı (μm)	7 – 10
Yoğunluk (g/cm^3)	1,76
Birim Ağırlık (g/m^2)	245
Örgü	3k Twill
Çekme Dayanımı (MPa)	3950
Elastisite Modülü (GPa)	238
Kopmadaki Birim Boy Değişimi (%)	1,7

Dolgu malzemeleri: Çalışmada dolgu malzemesi olarak silis dumanı (mikrosilika, SiO_2) ve çinko oksit (ZnO) kullanılmıştır.

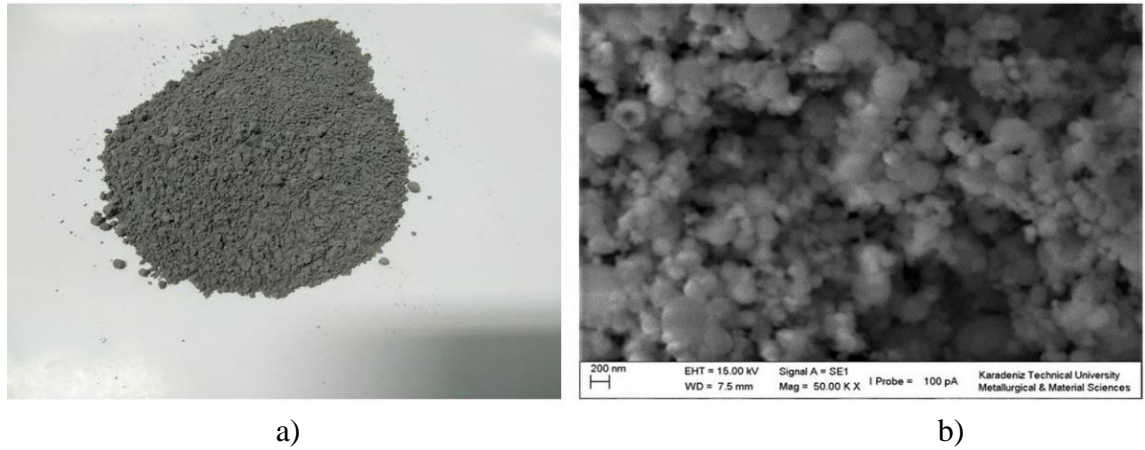
Silis dumanı (SiO_2); mikrosilika olarak da bilinen silis dumanı, silikon dioksitin amorf (kristal olmayan) bir polimorfudur. Silis dumanı, silisyum ve ferrosilikon alaşımı üretiminin bir yan ürünü olarak toplanan ultra ince bir tozdur ve ortalama parçacık çapı 150 nm olan küresel parçacıklardan oluşur. Yoğunluğu $2,36 \text{ g}/\text{cm}^3$ dür. Hazır betonlarda ve harçlarda, refrakter endüstrisinde, deniz yapılarında, baraj, tünel, köprü ve yollarda ve endüstriyel zeminlerde uygulama alanı bulur. Uygulandığı alana mükemmel aşınma ve sürtünme mukavemeti kazandırır.

Çinko oksit (ZnO); bir inorganik bileşiktir. Suda çözünmeyen özelliğe ve beyaz renge sahiptir. Plastik, seramik, cam, çimento ve kaplama endüstrisi gibi çok çeşitli alanlarda hammadde olarak kullanılır. Yoğunluğu $2,22 \text{ g}/\text{cm}^3$ dür.

Kompozit numunelerin üretimlerinde kullanılan dolgu malzemelerinin genel ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 22 ve Şekil 23’ de verilmiştir.



Şekil 22. Çinko oksitinin (ZnO); a) genel görüntüsü ve b) SEM görüntüsü



Şekil 23. Silis dumanının (SiO₂); a) genel görüntüsü ve b) SEM görüntüsü

2.2. Numune Üretimi

Numuneler, dolgu malzemesi içermeyen (dolgusuz) ve dolgu malzemesi içerecek (dolgulu) şekilde el yatırma ve vakumla tekniği ile üretilmiştir. Üretilen numunelerin kodları ve bileşim oranları Tablo 6’ da verilmiştir.

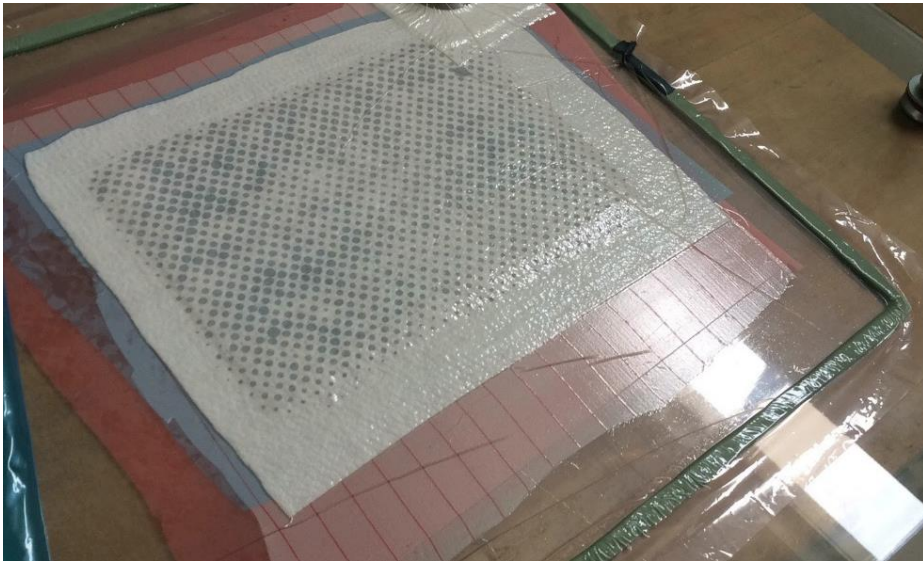
Tablo 6. Üretilen Kompozit Malzemelerin Ağırlıkça (%) Bileşim Oranları

Bileşenler	CSZ0	CZ8	CZ16	CS8	CS16	KSZ0	KZ8	KZ16	KS8	KS16
Epoksi Reçine	45	37	29	37	29	45	37	29	37	29
Cam Elyaf	55	55	55	55	55	—	—	—	—	—
Karbon Elyaf	—	—	—	—	—	55	55	55	55	55
Çinko Oksit	—	8	16	—	—	—	8	16	—	—
Silis Dumanı	—	—	—	8	16	—	—	—	8	16

Numune üretiminin ilk aşamasını farklı oranlarda (ağırlıkça %0-16) dolgu malzemelerinin epoksi reçineye eklenmesi oluşturur. Dolgu malzemesinin matris fazda iyi dağılımının sağlanması amacıyla matris/dolgu karışımı mekanik bir karıştırıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra karışıma sertleştirici ilave edilerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Karışım elyaflara uygulanmadan önce mevcut hava kabarcıklarının giderilmesi için karışım oda sıcaklığında vakum altına alınmıştır.

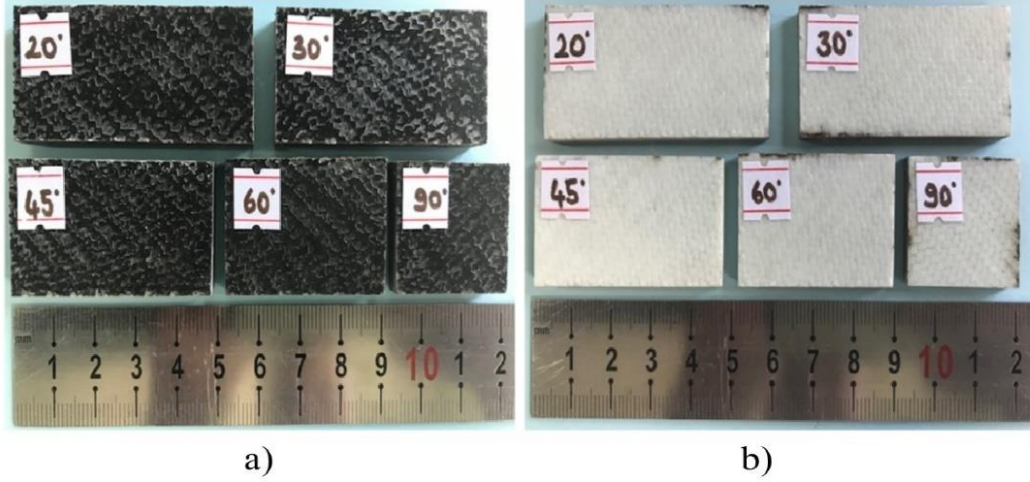
Daha sonra 300x300 mm boyutlarında kesilmiş elyafların (çift yönlü kumaş formunda) her bir katmanına bir rulo fırça yardımıyla epoksi reçine uygulanmış toplam 20 katman ve (0/90°) katman dizilimi ile döşenmiştir. Son aşamada reçine uygulanmış elyaflar üzerine sırasıyla peel ply, delikli naylon, vakum battaniyesi konulmuş ve vakuma alınarak numune üretimi tamamlanmıştır.

Şekil 24'de el yatırma ve vakumlama tekniği ile üretilmiş bir numunenin vakuma alınmış görüntüsü görülmektedir.



Şekil 24. El yatırma ve vakumlama tekniği ile üretilen elyaf takviyeli kompozit plakanın görüntüsü

Üretimi yapılan kompozit plakalar daha sonra erozyon deneyleri için farklı boyutlarda kesilerek deneylere hazır hale getirilmiştir. Kesme işlemi sonrası farklı erozyon açıları için deney numunelerine ait resimler Şekil 25’de verilmiştir.



Şekil 25. Erozyon deneyleri için üretilen numunelerin görüntüsü; a) silis dumanı dolgulu ve b) çinko oksit dolgulu

2.3. Katı Parçacık Erozyon Aşınma Testleri için Kullanılan Deney Düzeneği

Numunelerin katı parçacık erozyon performanslarını belirlemek için kullanılan deney düzeneği Şekil 26’ da verilmiştir. Mevcut test düzeneğinde ASTM G76, ASTM F864 ve MIL-STD-3033 standartlarına uygun olarak testler yapılabilmektedir. Test düzeneği her biri farklı özelliklere sahip sistemlerin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur.

Aşındırıcı toz parçacıklarının deney numunesine yüksek hızlarda çarpabilmesi için 40 bar basınç kapasiteli pistonlu hava kompresörü kullanılmıştır. Kompresörün çıkışına toz parçacıklarının koşullandırılmasını (neminin alınması) sağlamak amacıyla bir basınçlı hava kurutucu eklenmiştir. Erozyon testleri için aşındırıcı parçacıklar bir karışım odasında basınçlı hava ile karıştırılır. Bunun sonucunda da basınçlandırılmış aşındırıcı parçacıklar özel tasarlanmış nozul (lüle) ile birlikte kilitleme olmadan hızları 250 m/s ye kadar çıkabilmektedir.

Aşındırıcı parçacıkların hangi basınç değerinde hangi hız değerlerine çıkabildiği ise katı parçacık hız ölçüm sistemi olan çift disk yöntemi ile basınç-hız grafiği oluşturularak belirlenmiştir. Basınçlı odadaki aşındırıcı parçacıkların debisi, aşındırıcı toz/hava

karıştırma haznesi içine yerleştirilen elektromanyetik bir besleyici ile oldukça hassas bir şekilde ± 0.2 g/dk olarak ayarlanabilmektedir. Aşındırıcı parçacıkların hedef numuneye (parçaya) çarptırılmasında nozul (lüle) kullanılmıştır. Kullanılan nozul 3,2 mm çapında ve 50 mm uzunluğundadır (Şekil 27). Hedef numune hem sabit hem de 2 boyutta hareketli (düşey ve yatay) eksenlerde belirli hızlarla hareket edebilmektedir. Deney düzeneğini oluşturan her bir ünite ise istenen koşullara göre bir kontrol paneli ile ayarlanabilmektedir.



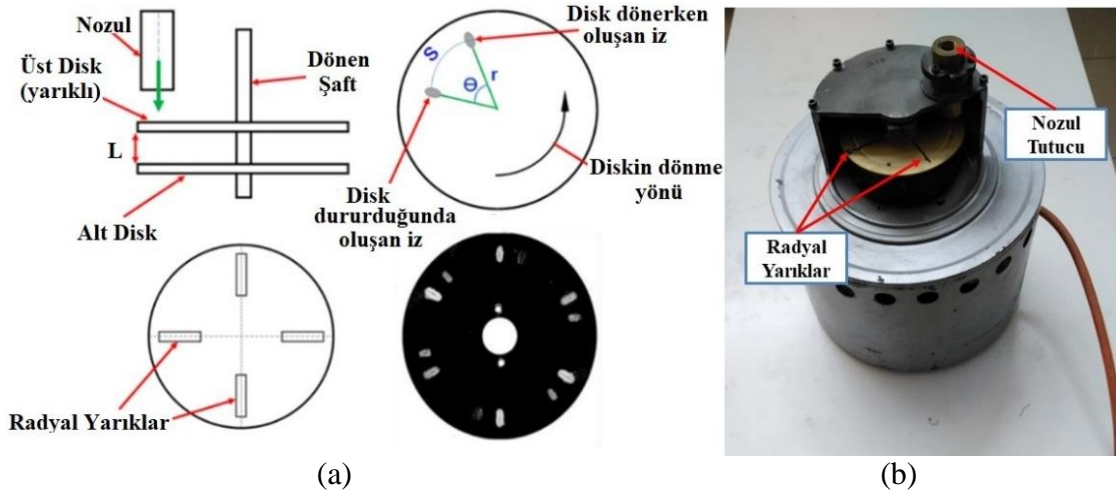
Şekil 26. Katı parçacık erozyon deney düzeneği



Şekil 27. Erozyon testlerinde kullanılan nozullar

2.4. Aşındırıcı Parçacıkların Çarpma Hızlarının Belirlenmesi

Erozyon aşınmasında önemli bir yere sahip olan aşındırıcı parçacık çarpma hızının belirlenmesinde yüksek hızda fotoğraflama [74], lazer doppler anemometresi [75] ve çift disk metodu [76] standartça kabul gören hız ölçüm teknikleridir. Bunlar arasında daha ekonomik ve basit oluşu sebebi ile en yaygın kullanılanı çift disk metodudur ve deneysel çalışmada bu metot kullanılmıştır. Şekil 28a’ da çift disk yönteminin şematik gösterimi ve Şekil 28b’ de imalatı yapılan çift-disk hız ölçüm sistemi görülmektedir.



Şekil 28. Çift disk metodu; a) şematik gösterimi ve b) imalatı yapılan çift-disk hız ölçüm sistemi

Sistem aynı açısal hızla dönen iki diskten oluşmaktadır. Birinci diskin üzerinde hızı ölçülecek olan parçacığın ikinci diske nüfuz etmesine ve bir darbe (iz) oluşturmasına müsaade eden yarıklar bulunmaktadır. Diskin boyutlarının ve açısal hızın bilinmesi sayesinde, parçacıkların ortalama hızı, ikinci diskteki referans ize göre belirli bir mesafede (s) bulunan çarpan parçacıkların oluşturduğu iz tarafından belirlenebilmektedir.

Şekil 28a’da görüldüğü gibi referans olarak oluşturulan iz geometrisi ve disklerin dönüşü sırasında çarpan parçacıkların oluşturdukları iz arasındaki mesafe hem doğrusal hem de açısal olarak ölçülebilmektedir. Bu durumda S ile gösterilen iki iz arasındaki lineer mesafe ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla elde edilmektedir:

$$V_p = L/t \quad (1)$$

$$S = \theta * r = (\omega * t) * r \quad (2)$$

İzler arası lineer S mesafesi kullanılarak parçacık hızını belirlemek için Ruff ve Yves tarafından ampirik bağıntı (Denklem 3) öne sürülmüştür ve literatürde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.

$$V_p = (2 * \pi * n * r * L) / (60 * S) \quad (3)$$

Burada;

S: Erozyon izleri arası mesafe

θ : Açısal yer değiştirme

r: Erozyon izlerinin ortalama yarıçapı

ω : Disklerin açısal hızı

t: Aşındırıcı parçacıkların üst diskten geçip alt diske ulaşması için geçen zaman

n: Disklerin devir sayısı

L: Diskler arası mesafe

V_p : Aşındırıcı parçacıkların çarpma hızı

2.5. Katı Parçacık Erozyon Deneylerinin Yapılışı

Erozyon deneyleri, numunelerin yüzeyine aşındırıcı toz parçacıklarının çarptırılması esasına dayanarak yapılır. Deney parametreleri Tablo 7'de belirtilen şartlarda erozyon aşınmasına tabi tutulmuştur.

Tablo 7. Aşınma Test Parametreleri

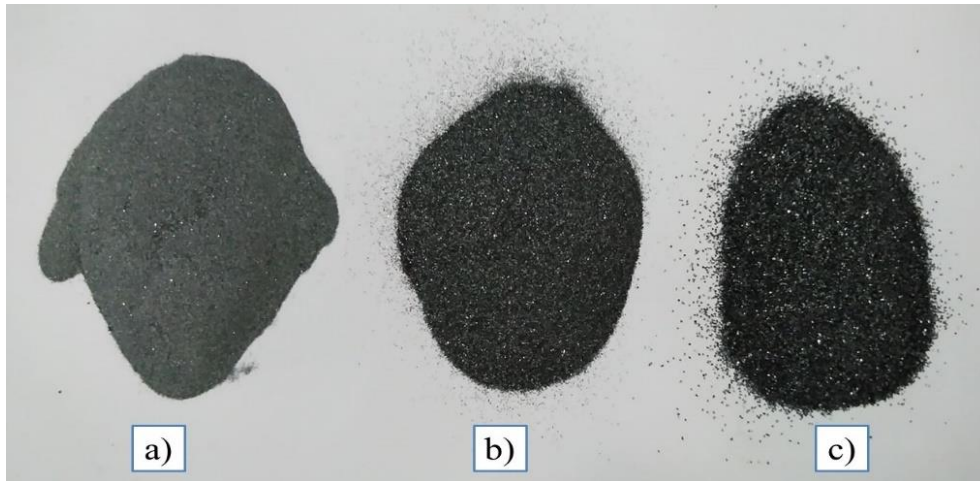
Aşındırıcı Türü	Silisyum Karbür (SiC)
Aşındırıcı Toz Boyutu (μm)	72, 175, 348
Aşındırıcı Şekli	Keskin Köşeli
Aşındırıcı Besleme Oranı (gr/dk)	2,5
Çarpma Açısı (α , $^\circ$)	20, 30, 45, 60, 90
Çarpma Hızı (m/s)	70, 100, 150, 200
Çarpma Süresi (s)	60, 120, 180
Nozul ile Numune Arası Mesafe (mm)	10
Nozul Çapı (mm)	3,2
Nozul Uzunluğu (mm)	50
Test Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Oda Sıcaklığı

Erozyon aşınma deneyleri, beş farklı çarpma açısı, dört farklı çarpma hızı ve üç farklı toz boyutu kullanılarak yapılmıştır. Deney numunesi belirlenmiş olan açı, hız ve toz boyutu seçilerek ve aşındırıcı toz besleme ise 2,5 g/dk ayarlanarak 60 saniye aralıklarla toplam 180 saniye süreyle aşınmaya maruz bırakılmıştır. Erozyon miktarı deney esnasında numunedeki ağırlık kayıplarının ölçülmesiyle belirlendi. Numuneler deney öncesi ve deney sonrası 0,1 mg hassasiyetli elektronik terazide tartıldı. Erozyon miktarları (W_{er}) aşağıda verilen formülle hesaplandı.

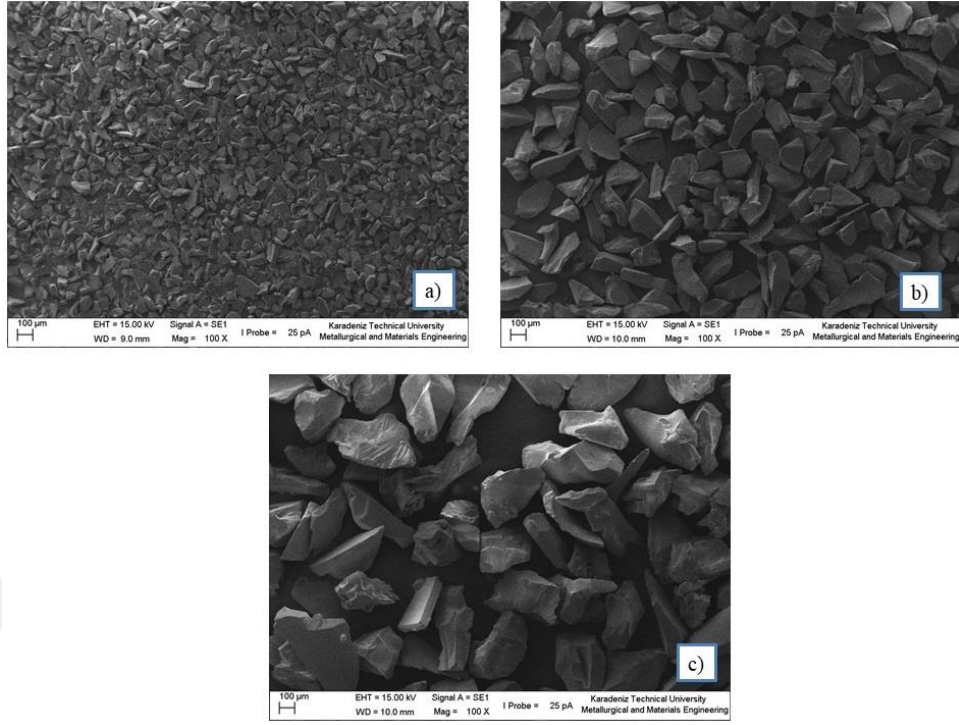
$$W_{er} = \Delta W_s / \Delta W_{ep} \quad (4)$$

Burada ΔW_s numunenin ağırlık kaybı ve ΔW_{ep} kullanılan aşındırıcı toz parçacıkların toplam ağırlığıdır.

Erozyon deneylerinde aşındırıcı olarak yüksek aşınma direncine sahip ve ortalama 72 μm , 175 μm ve 348 μm boyutlarında silisyum karbür (SiC) tozu kullanılmıştır. Farklı boyutlardaki SiC tozunun genel ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 29 ve Şekil 30' da verilmiştir.



Şekil 29. SiC tozunun genel bir görüntüsü; a) 72 μm , b) 175 μm ve c)348 μm



Şekil 30. SiC tozunun SEM görüntüsü; a) 72 μ m, b) 175 μ m ve c) 348 μ m

2.6. SEM İncelemeleri

Numunelerin aşınma yüzeyleri Zeiss EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Numunelerin yüzeyleri SEM de görüntülenmeden önce altın ile kaplanmıştır. Çalışmada kullanılan taramalı elektron mikroskobunun resmi Şekil 31’de verilmiştir.



Şekil 31. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

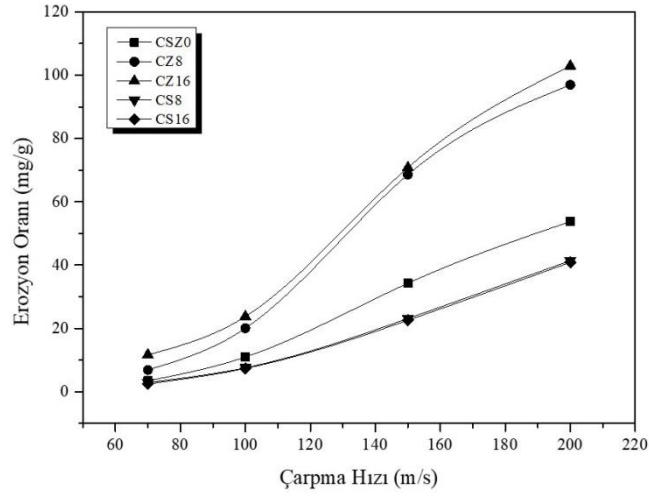
3. BULGULAR

3.1. Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Erozyon Aşınma Performansı

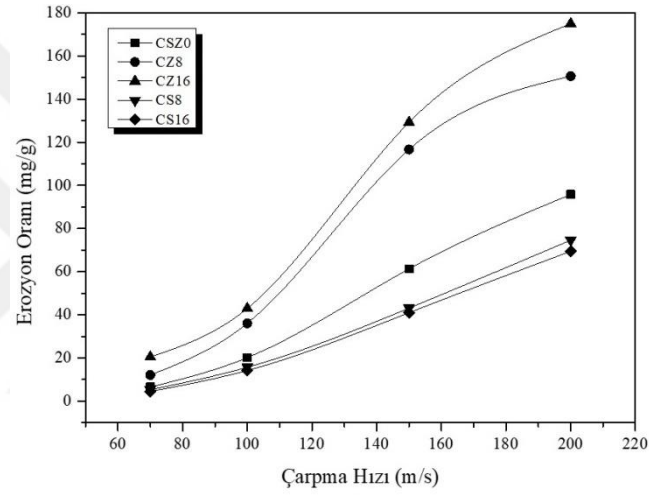
Cam elyaf takviyeli kompozit numuneler (CSZ0, CZ8, CZ16, CS8 ve CS16), dört farklı çarpma hızında (70, 100, 150 ve 200 m/s), beş farklı çarpma açısında (20°, 30°, 45°, 60° ve 90°), üç farklı çarpma süresinde (60, 120 ve 180 s) ve üç farklı aşındırıcı toz boyutunda (72, 175 ve 348 µm) erozyon aşınması deneylerine tabi tutulmuştur.

3.1.1. Çarpma Hızının Erozyon Oranına Etkisi

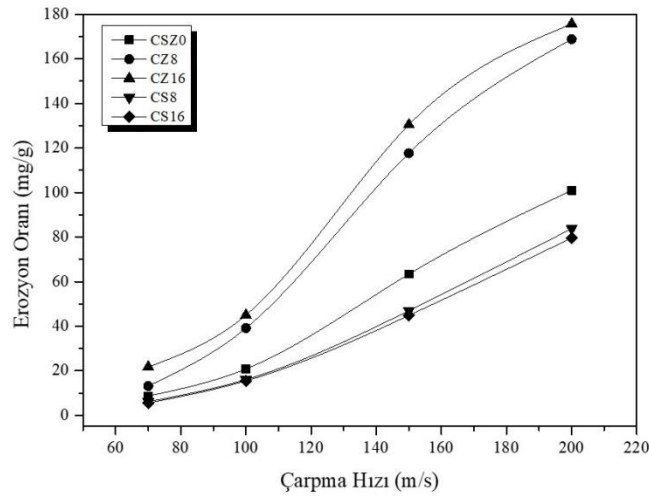
Şekil 32 (a-c)'de farklı çarpma hızlarının ve aşındırıcı parçacık boyutunun numunelerin erozyon performanslarına etkisi verilmiştir. Burada çarpma açısı 90° ve çarpma süresi 180 saniyedir.



(a)



(b)



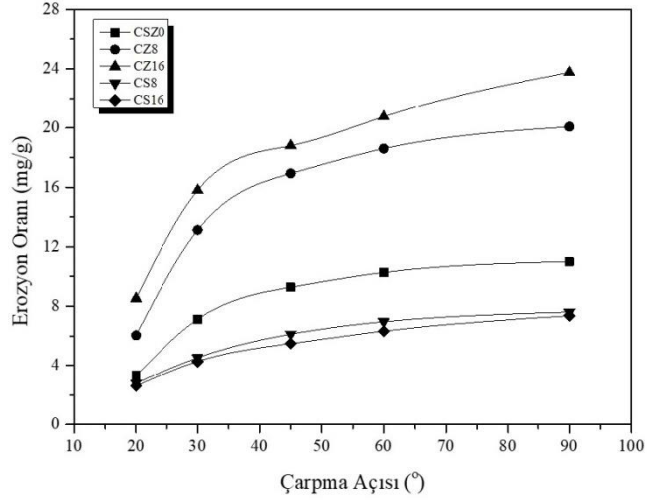
(c)

Şekil 32. Farklı aşındırıcı toz boyutunda cam elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma hızının erozyon oranına etkisi; a) 72 μm , b) 175 μm ve c) 348 μm

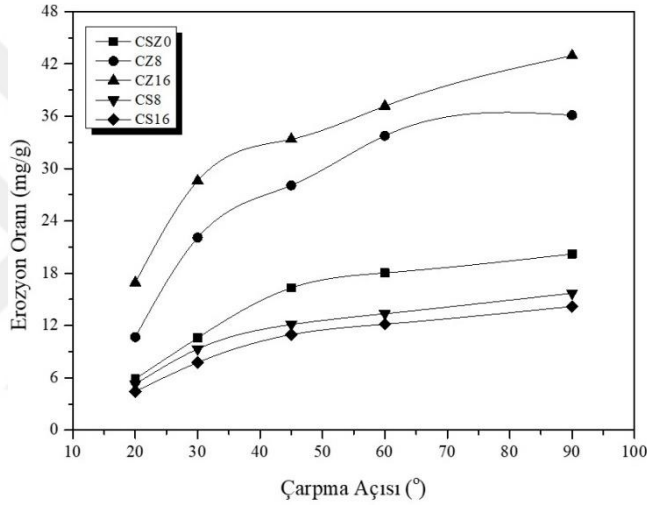
Şekillerden görüldüğü gibi hem dolgu malzemesi içermeyen hem de farklı oranlarda silis dumanı ve çinko oksit dolgu malzemesi içeren numunelerin erozyon aşınma oranları artan çarpma hızıyla artmıştır. En düşük ve en yüksek erozyon oranları sırasıyla %16 silis dumanı ve %16 çinko oksit içeren CS16 ve CZ16 kodlu numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca artan aşındırıcı toz boyutuyla bütün numunelerin aşınma değerleri de artmıştır. 72 µm toz boyutunda 70 m/s çarpma hızında CS16 kodlu numunenin aşınma değeri 2,52 mg/g iken bu değer CZ16 kodlu numunede 11,68 mg/g bulunmuştur. Bu değerler hızın 200 m/s çıkmasıyla sırasıyla 40,88 mg/g ve 102,92 mg/g olarak bulunmuştur.

3.1.2. Çarpma Açısının Erozyon Oranına Etkisi

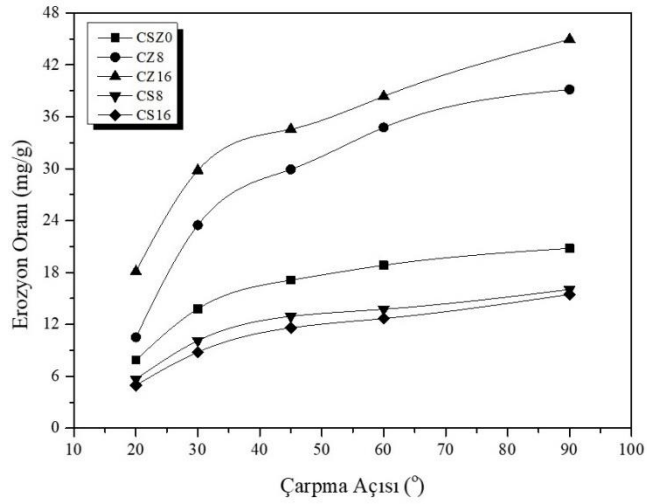
Farklı çarpma açılarının numunelerin erozyon oranlarına etkisi Şekil 33 (a-c) de gösterilmiştir. Burada çarpma hızı 100 m/s ve aşındırıcı toz boyutları sırasıyla 72, 175 ve 348 µm dur.



(a)



(b)



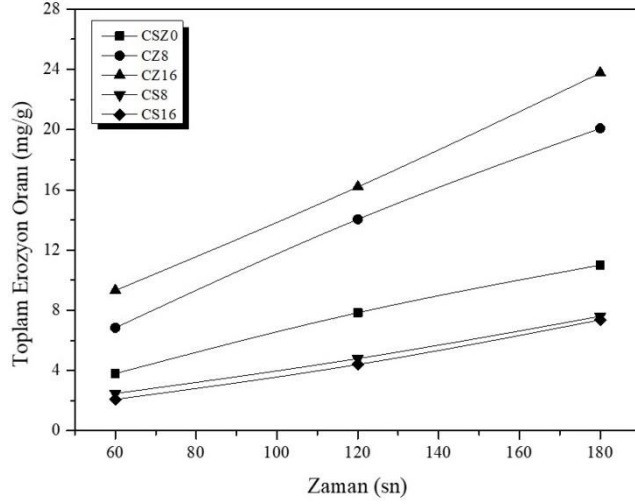
(c)

Şekil 33. Farklı aşındırıcı toz boyutunda cam elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma açısının erozyon oranına etkisi; a) 72 µm, b) 175 µm ve c) 348 µm

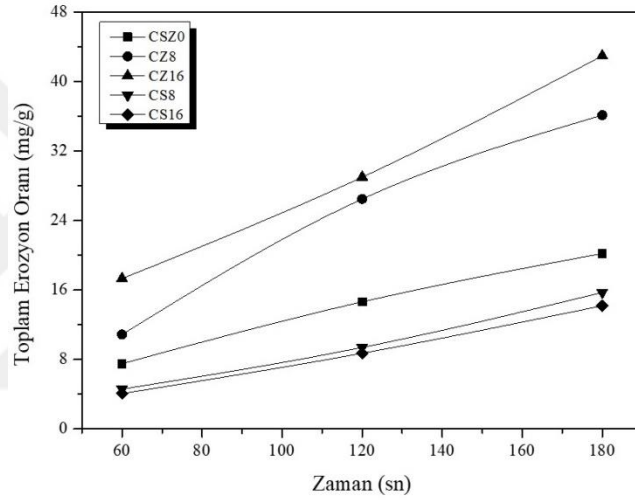
Grafikler incelendiğinde çarpma açısının artışıyla hem farklı tür ve oranda dolgu içeren hem de dolgu içermeyen numunelerin erozyon oranları artmıştır. En düşük ve en yüksek erozyon miktarları sırasıyla 20° ve 90° çarpma açılarında CS16 ve CZ16 kodlu numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca aşındırıcı toz boyutunun artmasıyla tüm deney numunelerinde erozyon miktarları artmıştır. 72 µm aşındırıcı toz boyutunda, 180 s çarpma süresinde ve 100 m/s çarpma hızında, CS16 kodlu numunenin en düşük ve en yüksek aşınma miktarları sırasıyla 2,6 ve 7,36 mg/g iken CZ16 kodlu numunenin aşınma miktarı 8,52 ve 23,76 mg/g değerinde bulunmuştur. Dolgu malzemesi içeren ve içermeyen deney numuneleri kıyaslandığında, çinko oksit dolgu malzemesi içeren numuneler en düşük erozyon direnci sergilemiştir.

3.1.3. Çarpma Süresinin Erozyon Oranına Etkisi

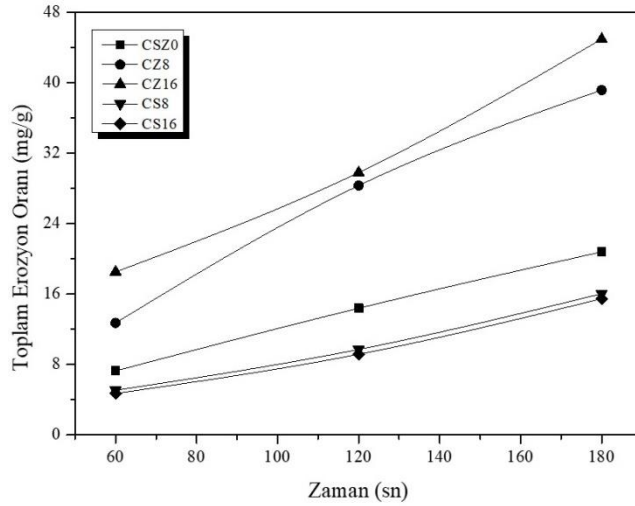
Şekil 34 (a-c)' de üç farklı çarpma süresinde kompozit deney numunelerin erozyon aşınma değişimleri verilmiştir. Numunelerin erozyon aşınma değerleri 90°' lik çarpma açısında ve 100 m/s çarpma hızında belirlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 34. Farklı aşındırıcı toz boyutunda cam elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma süresinin erozyon oranına etkisi; a) 72 μm, b) 175 μm ve c) 348 μm

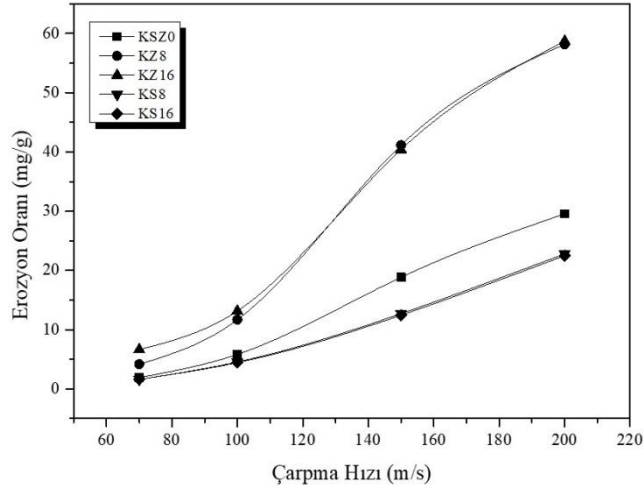
Çarpma süresinin artışıyla tüm deney numunelerinin erozyon aşınma oranlarının arttığı grafiklerden anlaşılmaktadır. CS16, CS8, CSZ0, CZ8 ve CZ16 kodlu deney numuneleri en az aşınmadan en fazla aşınmaya doğru sıralanmıştır. Bu deney numunelerinin aşınma değerleri 72 µm toz boyutunda ve 180 s süre sonunda 7,36, 7,60, 23,76, 20,08 ve 11,0 mg/g olarak sıralanabilir. Ayrıca aşındırıcı parçacık boyutlarının 72 µm'den 348 µm'e değişmesiyle erozyon oranı artmıştır.

3.2. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Erozyon Aşınma Performansı

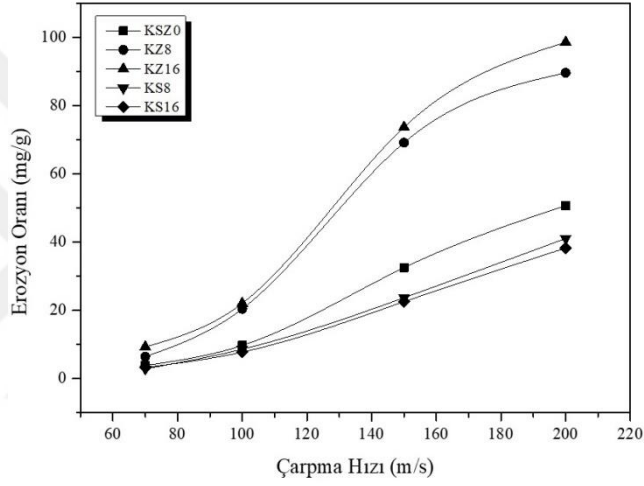
Dolgusuz ve dolgulu epoksi reçine esaslı örgülü karbon elyaf içeren numuneler, farklı çarpma hızlarında (70, 100, 150 ve 200 m/s), farklı çarpma açılarında (20°, 30°, 45°, 60° ve 90°), farklı çarpma sürelerinde (60, 120 ve 180 s) ve farklı aşındırıcı toz boyutlarında (72, 175 ve 348 µm) erozyon aşınmasına maruz bırakılmıştır.

3.2.1. Çarpma Hızının Erozyon Oranına Etkisi

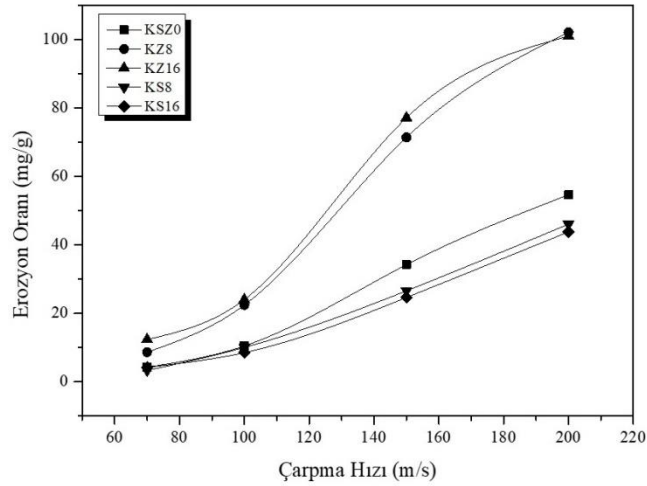
Şekil 35 (a-c)'de çarpma hızlarının epoksi esaslı karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin erozyon aşınma performansına etkileri gösterilmiştir. Erozyon aşınma değerleri 90°'lik çarpma açısında ve 180 s çarpma süresi sonunda belirlenmiştir.



(a)



(b)



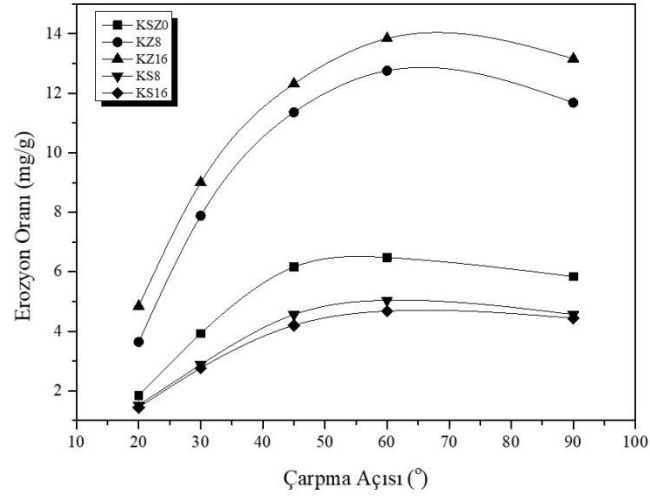
(c)

Şekil 35. Farklı aşındırıcı toz boyutunda karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma hızının erozyon oranına etkisi; a) 72 μm, b) 175 μm ve c) 348 μm

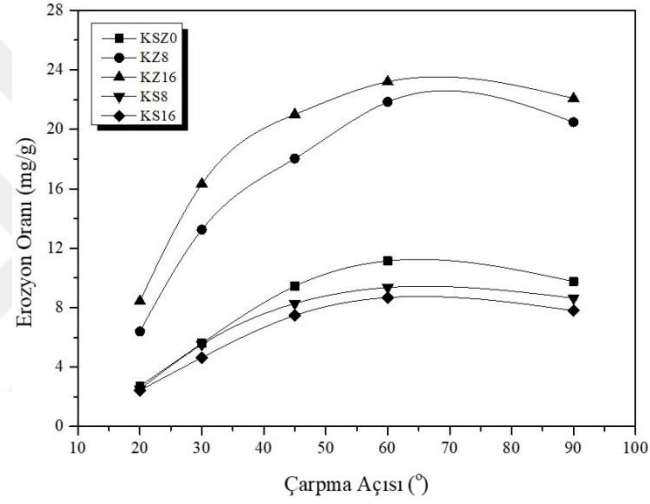
Grafikler incelendiğinde, çarpma hızlarının artmasıyla hem dolgu malzemesi içeren hem de dolgu malzemesi içermeyen tüm numunelerde erozyon aşınma oranları artmıştır. %16 silis dumanı ve %16 çinko oksit dolgu malzemesi içeren KS16 ve KZ16 kodlu malzemeler sırasıyla en düşük ve en yüksek aşınma oranları sergilemiştir. 72 µm aşındırıcı toz boyutunda yapılan erozyon aşınmasında, KZ8 ve KZ16 kodlu deney numuneleri birbirine yakın sonuçlar sergilemiş (Şekil 35a) ve toz boyutunun artmasıyla KZ16 kodlu deney numunesi daha fazla aşınma sergilemiştir. %8 ve %16 silis dumanı içeren KS8 ve KS16 kodlu numunelerin aşınma miktarları hemen hemen birbirine yakın değer göstermiş ve diğer numunelere kıyasla daha az aşınma meydana gelmiştir.

3.2.2. Çarpma Açısının Erozyon Oranına Etkisi

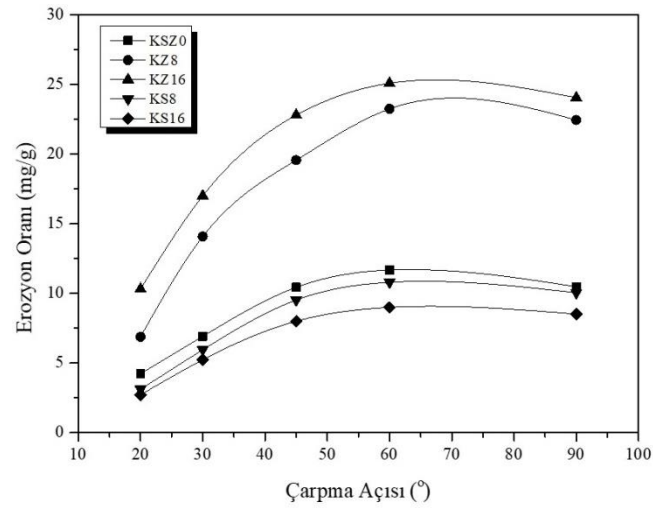
Farklı çarpma açılarının kompozit deney numunelerinin erozyon aşınma performansına etkisi Şekil 36 (a-c)' da gösterilmiştir. Erozyon aşınma değerleri 100 m/s çarpma hızında ve 180 s çarpma süresi sonunda belirlenmiştir.



(a)



(b)



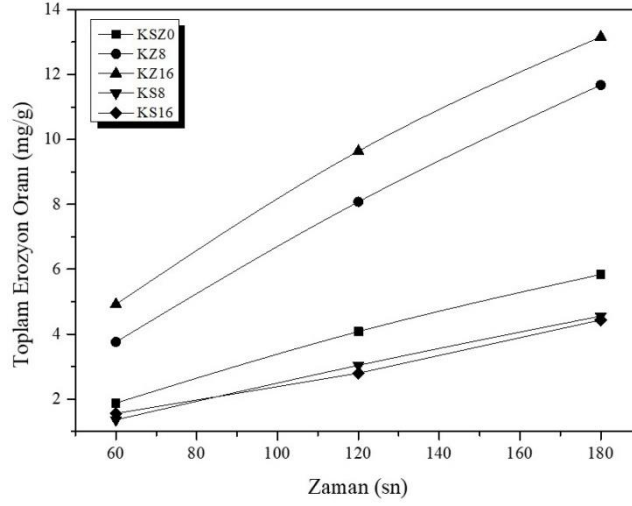
(c)

Şekil 36. Farklı aşındırıcı toz boyutunda karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma açısının erozyon oranına etkisi; a) 72 μm, b) 175 μm ve c) 348 μm

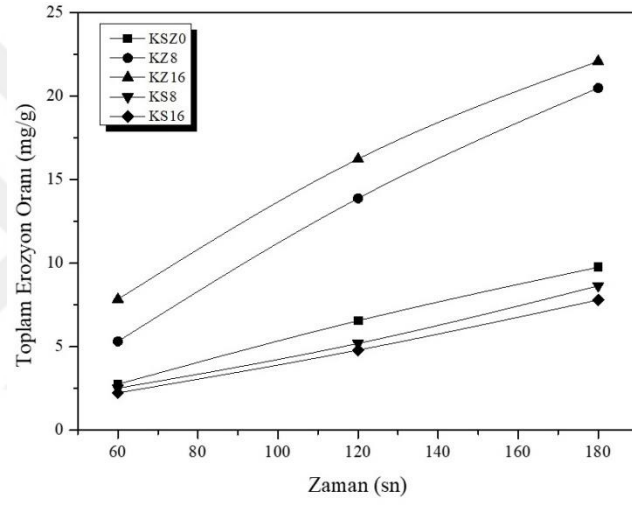
Numunelerin erozyon aşınma değerleri çarpma açısının artması ile 60° ye kadar artmış olup bu değerlerin üzerinde azda olsa bir düşme görülmüştür. 72 µm aşındırıcı toz boyutunda (Şekil 36a) KS16 kodlu numunenin en düşük ve en yüksek aşınma değerleri sırasıyla 1,44 ve 4,68 mg/g iken KZ16 kodlu numunenin aşınma değerleri 4,84 ve 13,16 mg/g olarak bulunmuştur. Şekil 36a'dan Şekil 36c'ye aşındırıcı toz boyutunun artmasıyla erozyon oranında artış görülmektedir. Ancak bu artış Şekil 36b ve Şekil 36c de yaklaşık birbirlerine benzer sonuçlar bulunmuştur.

3.2.3. Çarpma Süresinin Erozyon Oranına Etkisi

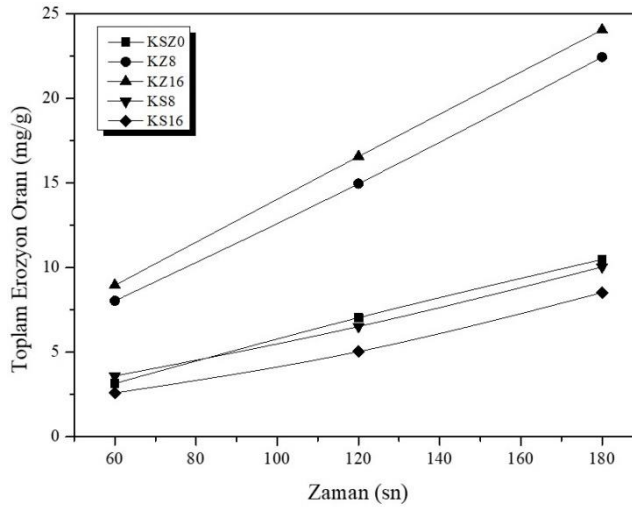
Şekil 37 (a-c)'de üç farklı çarpma süresinde ve üç farklı aşındırıcı toz boyutunda kompozit deney numunelerinin erozyon aşınma grafikleri verilmiştir. Erozyon aşınma değerleri 90° lik çarpma açısında ve 100 m/s çarpma hızında belirlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 37. Farklı aşındırıcı toz boyutunda karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma süresinin erozyon oranına etkisi; a) 72 μm, b) 175 μm ve c) 348 μm

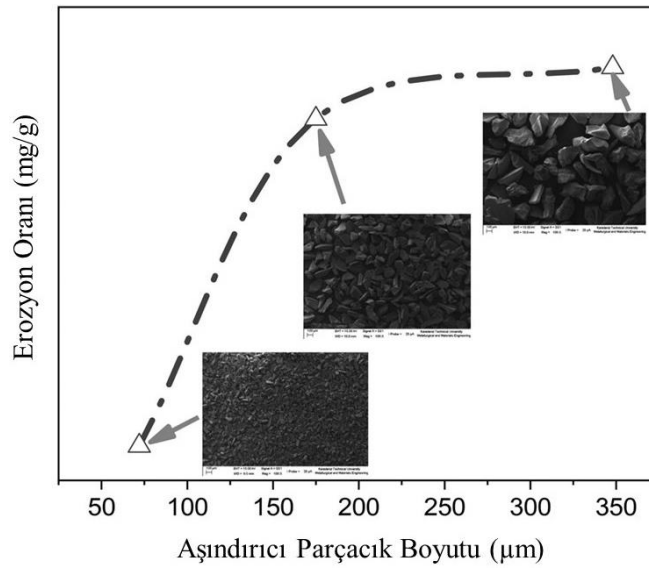
Bu grafikler incelendiğinde çarpma süresi ve aşındırıcı parçacık boyutlarının artmasıyla erozyon oranlarının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin yapılarına katılan dolgu maddeleri deney numunelerinin erozyon oranlarını olumlu ve olumsuz etkilemiştir. %16 silis dumanı (mikro silika) dolgulu KS16 kodlu numune en iyi erozyon direncini sergilerken, %16 çinko oksit dolgulu KZ16 kodlu numune en kötü erozyon direnci sergilemiştir.

3.3. Aşındırıcı Parçacık Boyutunun Erozyon Oranına Etkisi

Erozyon aşınması testlerinde, 72, 175 ve 348 μm boyutlarında olan silisyum karbür (SiC) tozları kullanılmıştır. Erozyon aşınmasında aşındırıcı parçacıkların boyutu, türü, şekli, fiziksel ve kimyasal özellikleri numunelerin aşınması üzerine etkilidir [77].

Şekil 38’ de aşındırıcı parçacık boyutunun artmasıyla hem E-cam elyaf hem de karbon elyaf takviyeli kompozitlerin erozyon oranının değişimi şematik olarak verilmiştir.

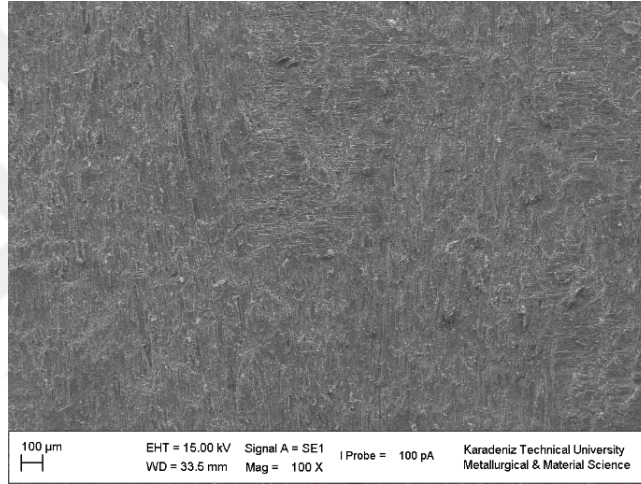
Kompozit numunelerin erozyon aşınmasında, aşındırıcı toz boyutunun 72 μm den 175 μm artmasıyla erozyon oranında ani bir artış olmuş ancak toz boyutunun 175 μm ye 348 μm çıkarılmasıyla aşınma oranında belirgin belirli bir artış olmamış yaklaşık olarak sabit kalmıştır.



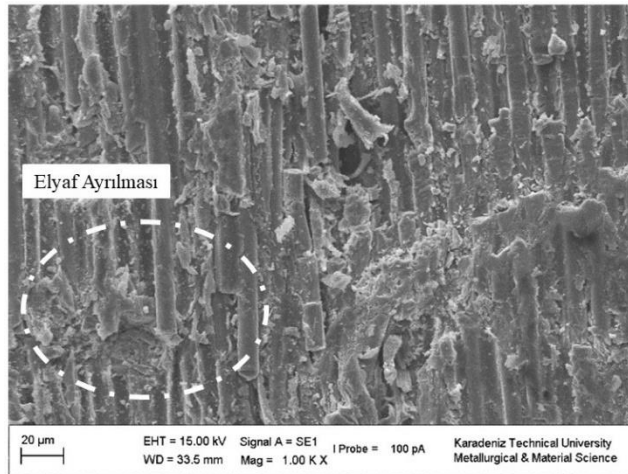
Şekil 38. Aşındırıcı parçacık boyutunun erozyon oranına etkisi

3.4. Numunelerin Aşınma Yüzeylerin SEM İncelemeleri

Erozyon testlerine tabi tutulmuş numune yüzeylerindeki aşınma mekanizmalarını ortaya koymak amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak aşınma görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 39-44 dolgu malzemesi içermeyen (CSZ0) ve %16 silis dumanı ve %16 dolgu malzemesi içeren epoksi reçine esaslı E-camı elyafı takviyeli içeren kompozit numunelere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Burada aşındırıcı toz boyutu 175 mikron ve çarpma hızı 100 m/s olup Şekil 39-41’de çarpma açısı 20 derece, Şekil 42-44’ de bu açı 90 derecedir.

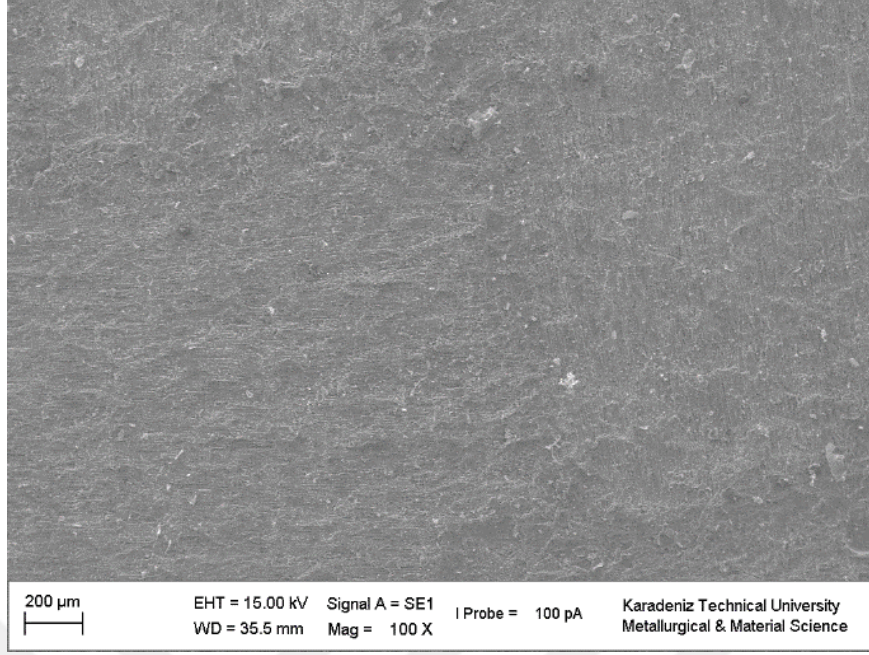


(a)

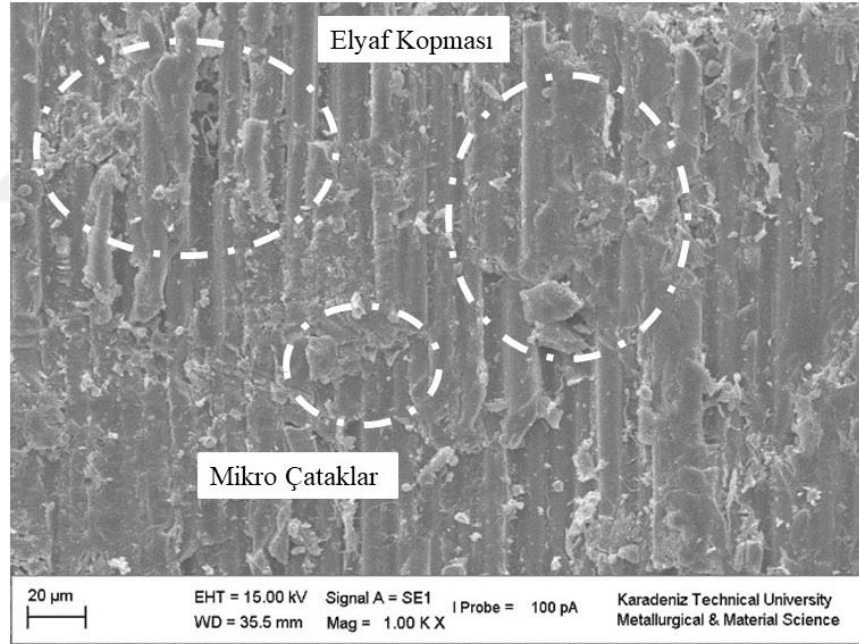


(b)

Şekil 39. CSZ0 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) 100X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 20°)

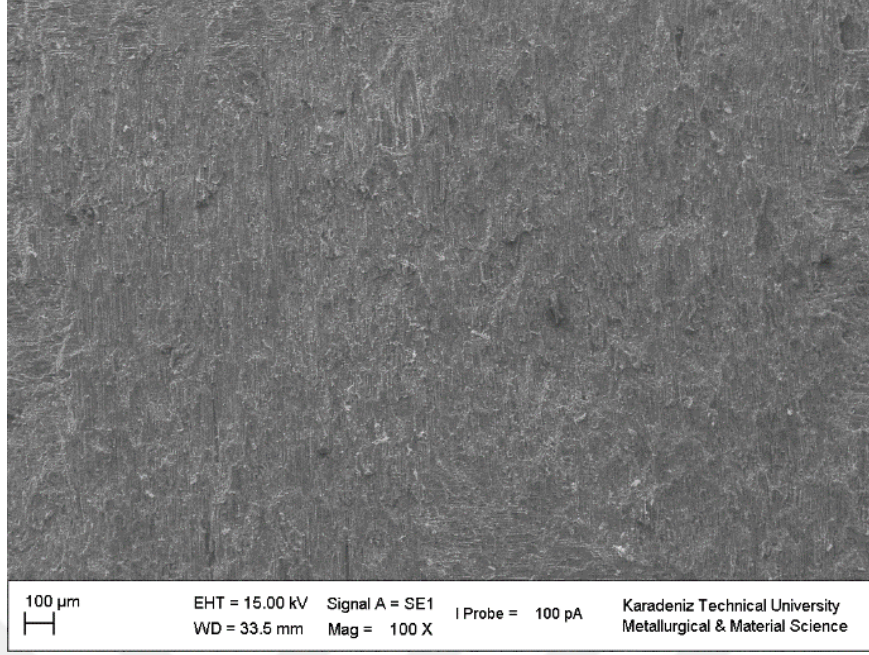


(a)

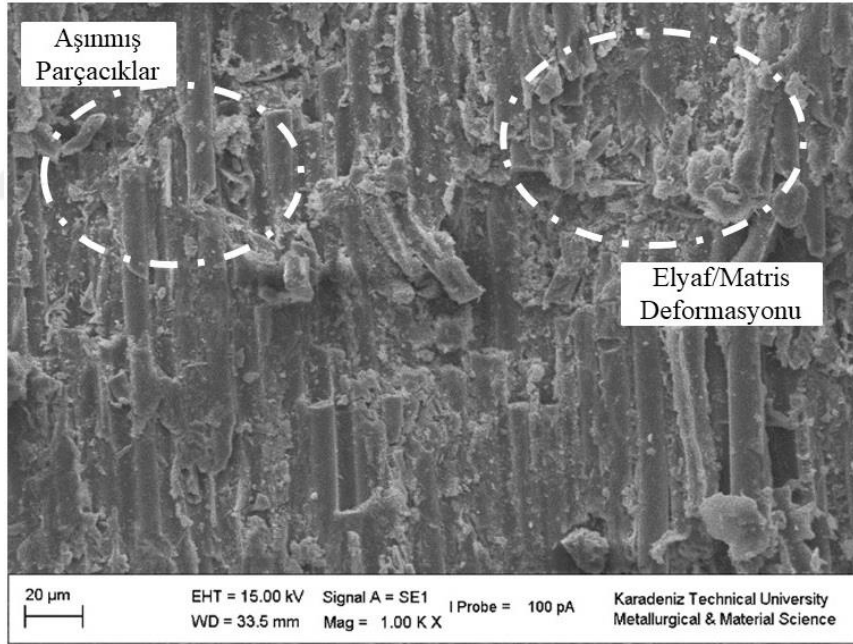


(b)

Şekil 40. CS16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü;
a) 100X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 20°)

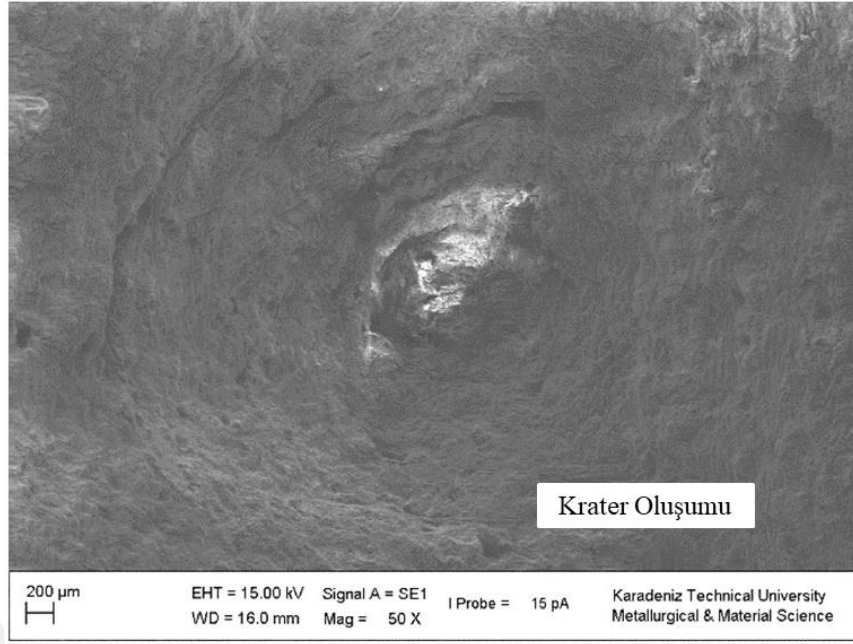


(a)

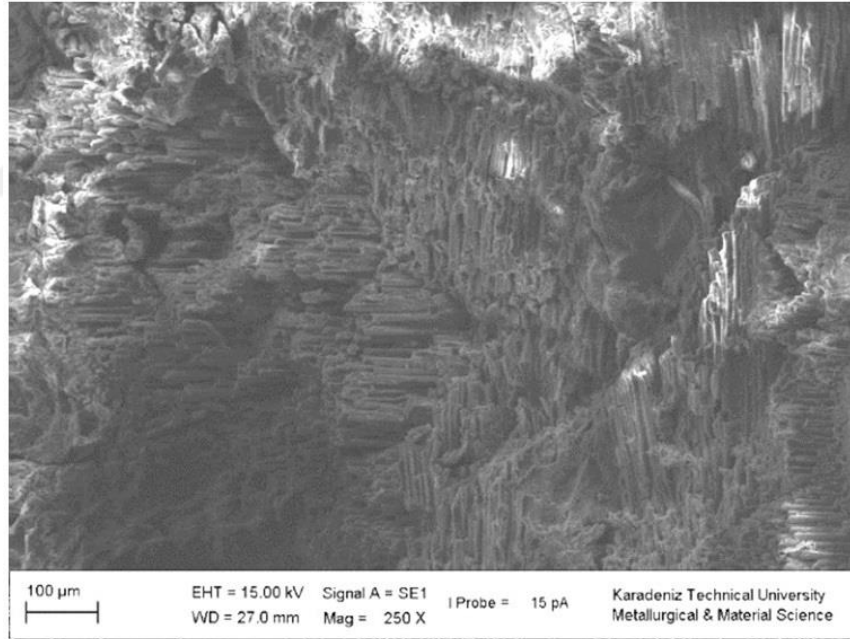


(b)

Şekil 41. CZ16 kodlu kompozitin numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) 100X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 20°)

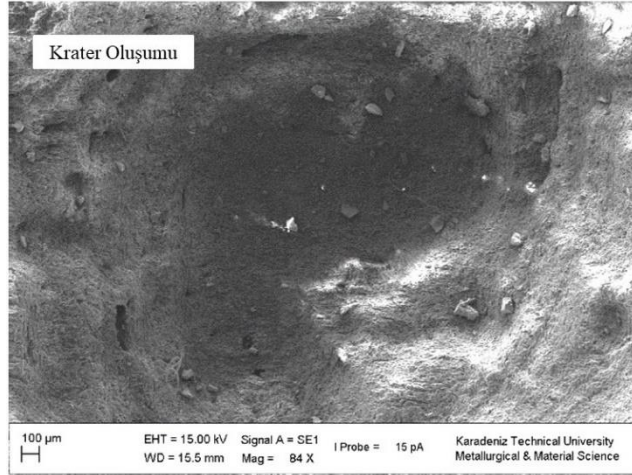


(a)

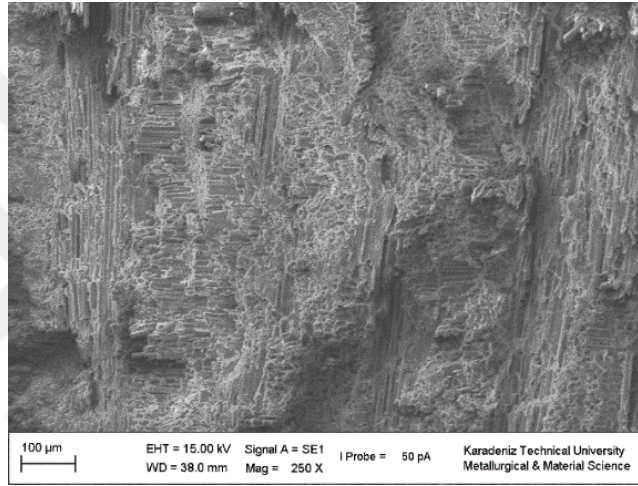


(b)

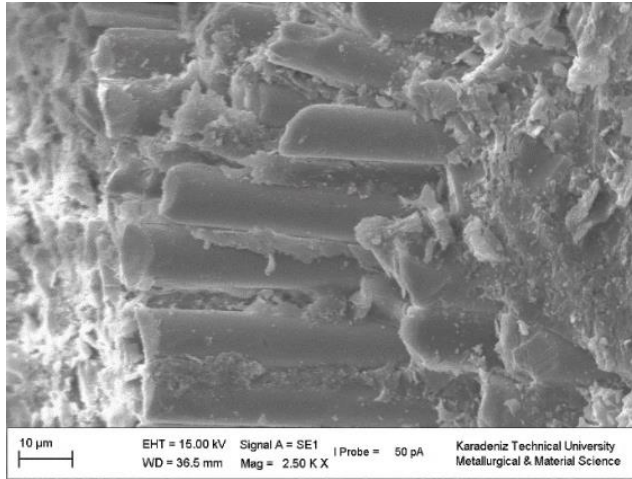
Şekil 42. CSZ0 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü;
a) kraterin genel görüntüsü ve b) kraterin iç tarafı (çarpma açısı; 90°)



(a)

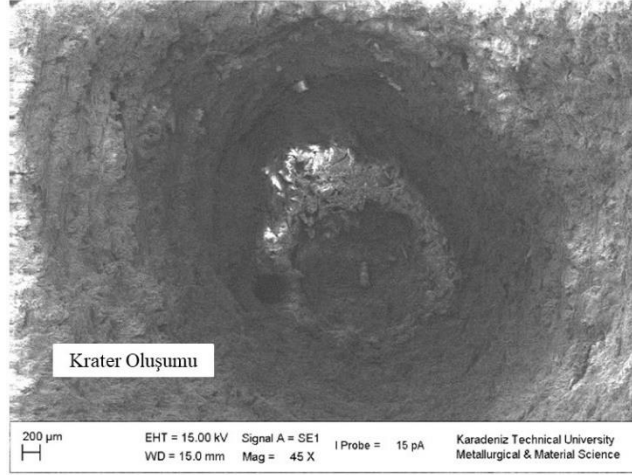


(b)

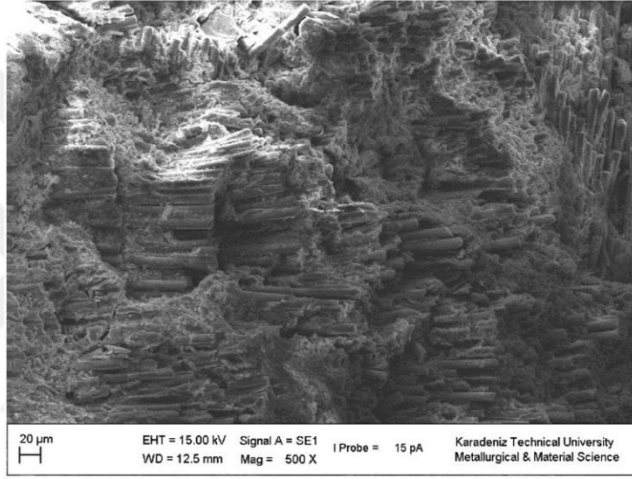


(c)

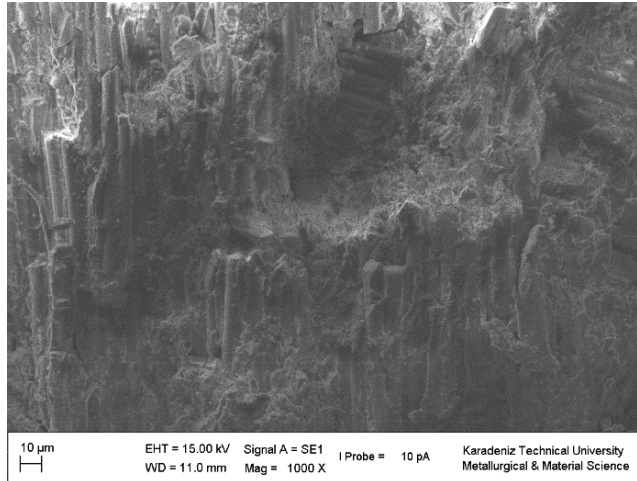
Şekil 43. CS16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) kraterin genel görüntüsü, b) kraterin iç tarafı (düşük büyütme) ve c) kraterin iç tarafı (yüksek büyütme) (çarpma açısı; 90°)



(a)



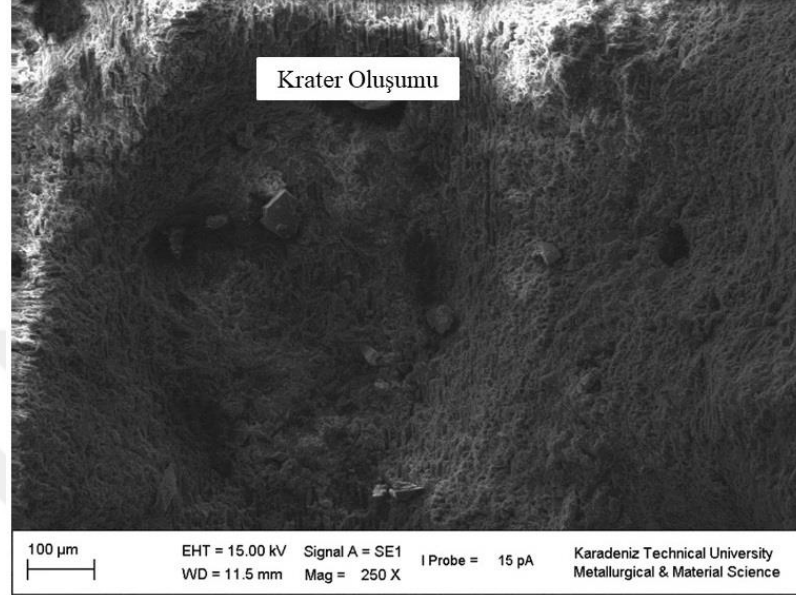
(b)



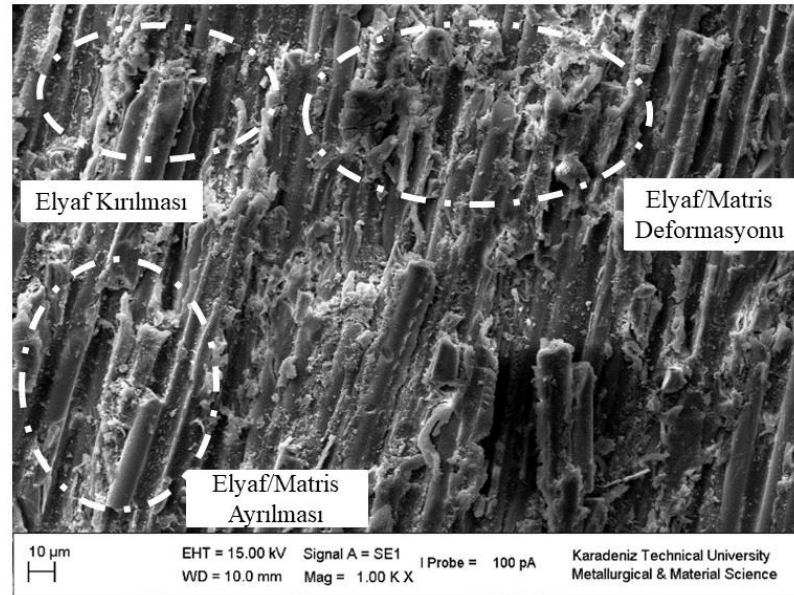
(c)

Şekil 44. CZ16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) kraterin genel görüntüsü, b) kraterin iç görüntüsü ve c) kraterin alt yüzeyi (çarpma açısı; 90°)

Şekil 45-47' de dolgunsuz (KSZ0) ve dolgulu (KS16 ve KZ16) epoksi reçine esaslı karbon elyaf takviyeli kompozit numunelere ait sem görüntüleri verilmiştir. Burada aşındırıcı toz boyutları 175 μm , çarpma hızı 100 m/s ve çarpma açısı 60°dir.

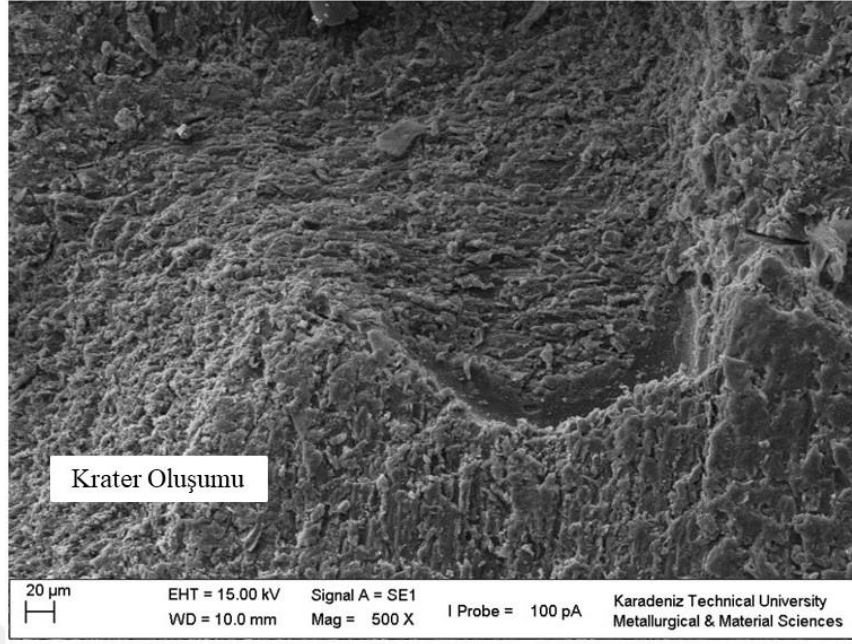


(a)

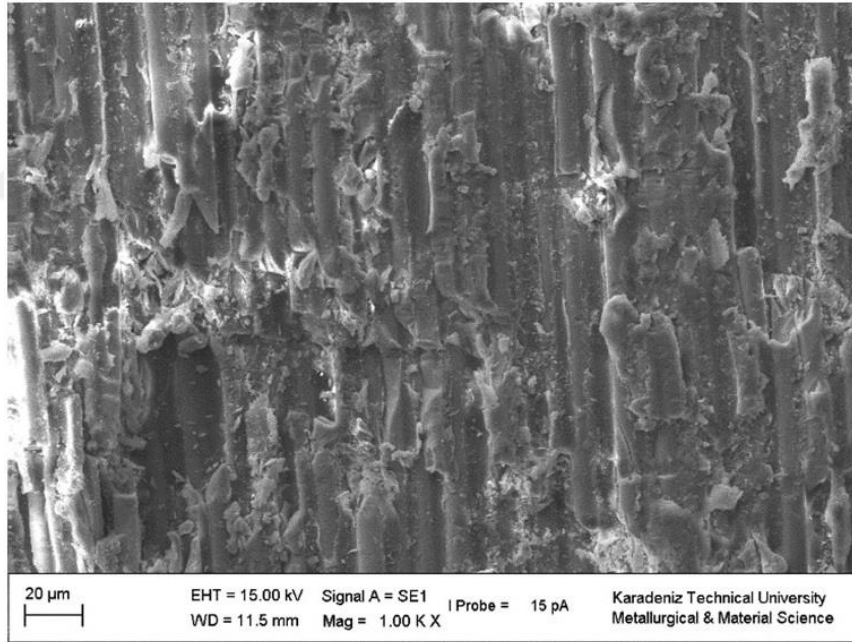


(b)

Şekil 45. KSZ0 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) 250X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 60°)

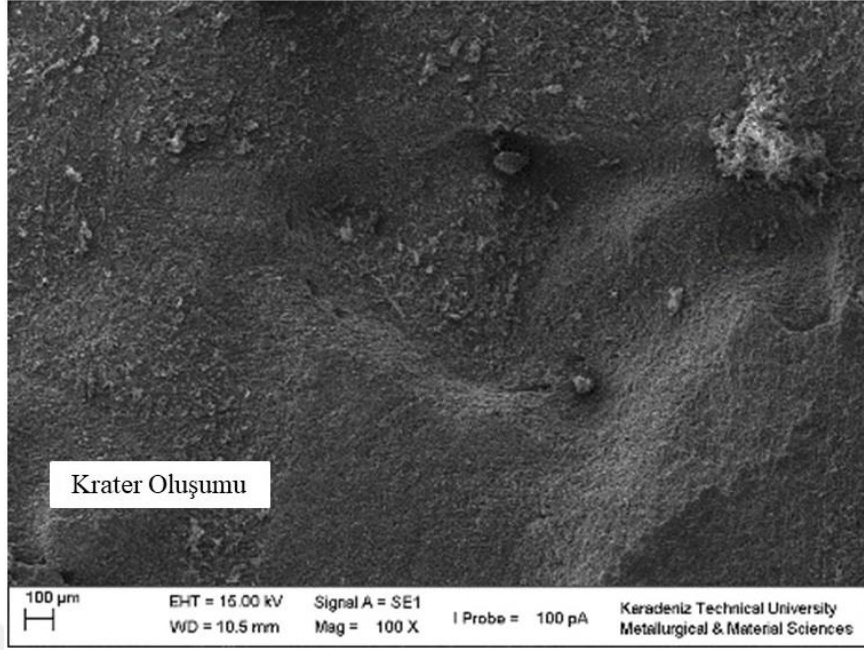


(a)

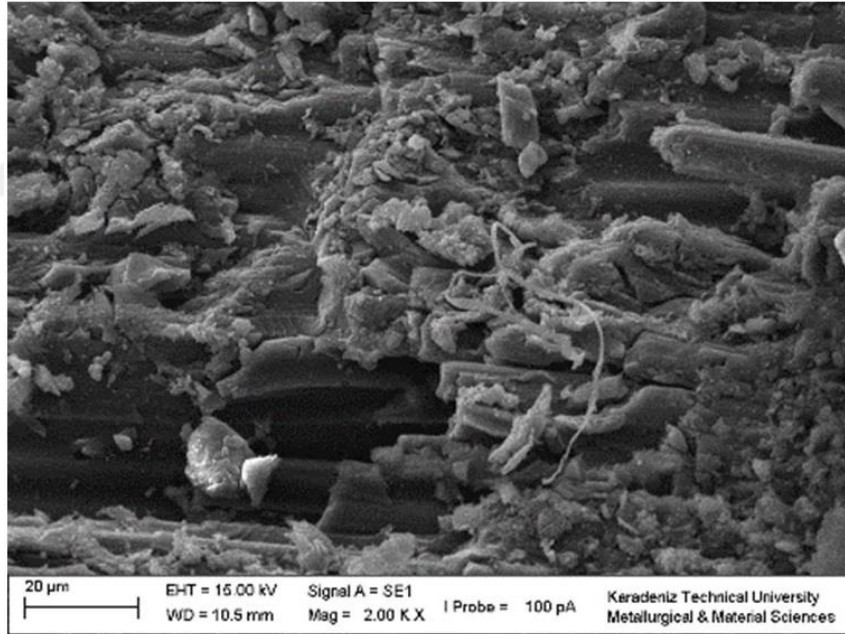


(b)

Şekil 46. KS16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü;
a) 500X ve b) 1000X büyütme (çarpma açısı; 60°)



(a)



(b)

Şekil 47. KZ16 kodlu kompozit numunenin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüsü; a) kraterin genel görüntüsü ve b) kraterin iç görüntüsü (çarpma açısı; 60°)

4. İRDELEME

4.1. Çarpma Hızının Erozyon Aşınmasına Etkisi

Aşınma olayında, hedef malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı parçacıkların hızı çok büyük bir etkiye sahiptir [4, 77]. Literatürde, kompozit malzemelerin erozyon performansı üzerinde yapılmış olan çalışmaların çoğu düşük ve orta çarpma hızlarını kapsamaktadır [25, 78-84].

Kompozit numunelerde parçacık çarpma hızının erozyon oranları üzerindeki etkisi Şekil 32 (a-c) ve Şekil 35 (a-c)' de gösterilmiştir. Çarpma hızlarındaki artışla birlikte kompozit numunelerin erozyon oranlarının arttığı şekillerden açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar literatür bulgularıyla uyum sağlamaktadır [85-89]. Şekillerden, CSZ0, CS16, CZ16 ve KSZ0, KS16 ve KZ16 kodlu numunelerin 72 µm aşındırıcı toz boyutunda, 200 m/s çarpma hızları için aşınma değerleri sırasıyla 17,24, 11,28, 36,72 ve 9,48, 6,6 ve 20,68 mg/g olarak elde edilmiştir. Ayrıca, numunelerin erozyon aşınma performansları karşılaştırıldığında silis dumanı içeren numunelerin, dolgusuz ve çinko oksit dolgulu numunelere göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Çarpma hızının artmasıyla aşındırıcı parçacıkların kinetik enerjilerinin artacağı ve bunun sonucunda da malzeme yüzeyinden daha fazla malzemeyi aşındıracağı açıktır. Ayrıca hızdaki artış sadece kinetik enerjiyi arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda aşındırıcı parçacıkların hedef yüzeye vurma süresi arasındaki farkı da azaltacaktır. Bu da yüksek hızlarda daha fazla malzeme aşındırarak aşınmanın artmasına sebep olacaktır [90].

Aşındırıcı toz boyutunun 72 µm' den 175 µm'ye artması, kompozit malzemelerin erozyon oranları belirgin bir şekilde artmıştır. Diğer yandan, aşındırıcı toz boyutunun 175 µm ile 348 µm arasında olması Şekil 32 (a-c) ve Şekil 35 (a-c)'de görüldüğü gibi çok fazla bir değişim olmamıştır.

4.2. Çarpma Açısının Erozyon Aşınmasına Etkisi

Erozyon aşınmasındaki çarpma açısı genellikle aşındırıcı parçacıkların yörüngesindeki açı olarak tanımlanır. Çarpma açısı, malzemelerin erozyon aşınması

olayında geniş çaplı olarak çalışılan konulardan en önemlisidir [91]. Genellikle, çarpma açısına (α) bağlı olarak erozyon oranının değişmesi, malzemelerin sünek ve gevrek davranış aralığında sınıflandırılmaya yol açmıştır [92]. Bu sınıflandırmada, Sünek malzemeler düşük çarpma açılarında (15° - 30°), gevrek malzemeler ise yüksek çarpma açılarında (90°) maksimum aşınma davranışı gösteriler [15, 23, 91]. 45° - 60° çarpma açılarında, maksimum aşınma göstermesi durumunda yarı gevrek malzeme olarak sınıflandırılır [25].

Aşındırıcı parçacıklar malzeme yüzeylerine çarptıkları anda, çarpma kuvveti ikiye ayrılır. Bunlardan birisi malzeme yüzeyine paralel olan (F_p), diğeri ise dikey olan (F_v) kuvvetidir. (F_p) paralel kuvvet aşındırıcılar tarafından kontrol edilirken, (F_v) dikey kuvvet ise aşınma olayı tarafından kontrol edilmektedir. Çarpma açısı 90° ye doğru çıkarıldığı zaman paralel kuvvetin (F_p) etkisi azalır. Mikro çatlak ile ilerleyen Normal aşınma olayında tüm enerji miktarı, (F_v) dikey kuvvetten dolayı düşük açılarda hasarın mikro kesilme ve mikro çökme ile meydana geldiği görülmektedir [3, 15, 92-95].

Şekil 33 (a-c) ve Şekil 36 (a-c)'de, çarpma açısı ve aşındırıcı toz boyutunun dolgusuz ve silis dumanı ve çinko oksit dolgulu kompozit malzemelerin erozyon oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu şekillerden, dolgusuz ve dolgulu epoksi reçine esaslı E-cam elyaf takviyeli kompozitlerin erozyon oranları, çarpma açılarının artmasıyla birlikte arttığı ve maksimum aşınma oranının 90° çarpma açısında meydana geldiği belirlenmektedir. Benzer şekilde, Lv ve arkadaşları [3] çalışmalarında numunelerin maksimum erozyon oranlarını 90° çarpma açısında bulmuşlardır. Karbon kompozitlerde ise maksimum aşınma Şekil 36 (a-c)' de görüldüğü gibi 45° - 60° çarpma açısında meydana gelmiştir. Pei [9] ve Tewari [25] çalışmalarında benzer şekilde maksimum aşınmayı 45° - 60° çarpma açısında bulmuştur.

Çarpma açısı, çarpma hızı ve aşındırıcı parçacık özellikleri gibi birçok parametreye bağlı olarak erozyon şartları değişmektedir. Bu değişim neticesinde malzemeler sünek ve gevrek davranış sergilemektedir [72]. Buna göre, dolgusuz ve dolgulu karbon kompozit numuneler yarı sünek erozyon davranışı gösterirken, dolgusuz ve dolgulu cam kompozit numuneler gevrek erozyon davranışı göstermiştir.

%16 silis dumanı içeren CS16 kodlu cam elyaf takviyeli ve KS16 kodlu karbon elyaf takviyeli numuneler en iyi erozyon direnci göstermişlerdir. En kötü erozyon direncini ise CZ16 (%16 çinko oksit dolgulu ve cam elyaf takviyeli) ve KZ16 (%16 çinko oksit dolgulu ve karbon elyaf takviyeli) kompozit numuneler sergilemişlerdir. Silis dumanı dolgusu,

seçilen çarpma açılarında kompozit numunelerin erozyon oranlarını geliştirirken, çinko oksit dolguları kötüleştirmiştir. Silis dumanı dolgu içeriğinin artmasıyla birlikte erozyon oranındaki azalmanın nedeni dolgu malzemesinin aşındırıcı parçacıkların sahip olduğu kinetik enerjilerini iyi bir şekilde absorbe etmesinden kaynaklanır [3].

Kompozit malzemelerin erozyon aşınma karakteristiklerini aşındırıcı parçacık boyutu da etkiler. Şekil 33 (a-c) ve Şekil 36 (a-c)'de aşındırıcıların boyutları 72 µm den 348 µm'ye artması kompozit numunelerin erozyon oranlarını arttırmıştır. Aynı çarpma açısında, aşındırıcı boyutlarının 72 µm'den 175 µm'ye artması sonucu erozyon oranındaki değişim, aynı numune için aşındırıcının 175 µm'den 348 µm'ye artmasına göre daha belirgin olmuştur. Sınmazçelik ve Sarı [84], polifenilen sülfid kompozit malzemelerin erozyon dirençlerindeki toz boyut (45-75 µm, 150-212 µm ve 300-425 µm) etkisini incelemişlerdir. Toz boyutlarının artmasıyla erozyon oranlarının arttığı ve maksimum erozyon oranının, 45°-60° çarpma açılarında ve 300-425 µm toz boyutu arasında gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

4.3. Çarpma Süresinin Erozyon Aşınmasına Etkisi

Çarpma süresi, erozyona ya da aşınmaya maruz kalma süresinin toplamının bir ölçüsü olarak tanımlanır. Gevrek ve yarı gevrek malzemelerde, aşınma süresinin artmasıyla malzemenin aşınma oranı zamanla lineer olarak artar, sünek malzemelerde aşındırıcı parçacıklar hedef malzeme yüzeyine gömülerek malzemede ağırlık artışına neden olurlar. Genellikle bu süre, kuluçka süresi olarak bilinir ve bu süre sonunda malzemelerin aşınma oranı sabit bir şekilde ilerler [3, 92-95].

Şekil 34 (a-c) ve Şekil 37 (a-c)'de farklı aşındırıcı toz boyutunda elyaf takviyeli kompozitlerin çarpma süresinin erozyon aşınmasına etkisi gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde erozyon süresi artışıyla erozyon oranı lineer olarak artmış ve kuluçka süresi görülmemiştir. Benzer sonuçlar Sınmazçelik ve arkadaşları [96], Fouad ve arkadaşları [15] ve Lv [3] tarafından da bulunmuş olup, erozyon süresinin artmasıyla erozyon oranının arttığı görülmüştür. En yüksek ve en düşük aşınma sergileyen kompozit malzemeler sırasıyla, cam kompozit için CZ16 ve CS16 karbon kompozit için KZ16 ve KS16 olarak gösterilmektedir. Ayrıca toz boyutunun artmasıyla ilk olarak kompozit numunelerdeki erozyon aşınması artmış ve daha sonra neredeyse sabit denecek şekilde kalmıştır (Şekil 34 (a-c) ve Şekil 37 (a-c)).

4.4. Toz Boyutunun Erozyon Aşınmasına Etkisi

Aşındırıcı parçacıkların tür ve fiziksel özellikleri, erozyon aşınma karakteristiği için çok önemli bir olaydır. Aşındırıcı parçacık özellikleri, şekli ve boyutu, polimer kompozit malzemelerin erozyon aşınması üzerinde önemli değişikliğe yol açabilir [77].

Farklı çarpma hızlarında, açılarında ve sürelerinde, kompozit malzemelerin erozyon aşınması üzerindeki toz boyut etkisi Şekil 38’de şematik olarak görülmektedir. Şekilde aşındırıcı toz boyutunun 175 μm ’ye artmasıyla erozyon aşınma oranı artmış ve sonrasında erozyon oranlarında önemli derecede bir artış olmamıştır.

Kompozitlerin erozyon oranları, aşındırıcı toz boyutlarının belirli bir aralıkta artmasıyla artmaktadır. Ama bu artış, aşındırıcı parçacıkların kritik bir değere (d_c) ulaştığında neredeyse sabit kalır ve bu olay “toz boyut etkisi” olarak bilinir ve d_c değeri, erozyon şartlarına ve malzemeye göre değişiklik gösterir [94]. Bir grup araştırmacı, kompozit malzemelerin erozyon oranının kritik bir değerden sonra toz boyutundan bağımsız olduğunu belirtmişlerdir [77, 97, 98]. Bu kritik değer, 100 μm ile 200 μm arasında belirlenmiştir. Ancak bu değer aşındırıcı ile hedef malzeme etkileşimine ve test koşullarına bağlıdır [77, 99]. Aşındırıcı parçacık boyutu arttıkça parçacıkların kinetik enerjisi artar ve bunun sonucunda parçacıklar numune yüzeyinden daha derin bölgelere nüfuz eder, bunun sonucunda numunelerde aşınma krater derinliği artarak daha fazla aşınma miktarı ortaya çıkar [80, 100].

4.5. Aşınmış Yüzeylerin Yüzey Morfolojisi

Numunelerden malzeme kaldırma durumunu belirlemek için, kompozitlerin aşınmış yüzeylerinin morfolojileri taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenir. SEM, kompozitlerin aşınma mekanizmalarını incelemek için çok etkili bir yöntemdir. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde erozyon aşınması yüzey mikro çatlakları, matris ayrılması, elyaf/matris bağının çözülmesi ve elyafların kırılması ve ayrılması şeklinde gelişir [101, 102].

Şekil 39-44’de, 20° ve 90° çarpma açılarında, 100 m/s çarpma hızı ve 175 μm SiC aşındırıcı toz boyutuyla aşındırılmış CSZ0 (dolgunsuz), CS16 (%16 silis dumanı dolgulu) ve CZ16 (%16 çinko oksit dolgulu) kompozitlerin yüzey morfolojileri görülmektedir. CSZ0 ve CS16 kompozitlerin aşınmış yüzeyleri (Şekil 39-41), 20° çarpma açısında

yüzeylerinde biraz çatlaklar, küçük elyaf kırılmaları ve parçalanmış aşınma kalıntıları gibi neredeyse benzer özellikler gösteriyor. CS16 kompozit, CSZ0 ile kıyaslandığında silisyum dumanı dolgusu ve epoksi matris arasındaki daha iyi yapışmadan dolayı daha az elyaf/matris ayrışması ve elyaf hasarı görülebilir. Diğer yandan, Şekil 41 (a-b)'de görüldüğü gibi CZ16 kompozit nispeten daha fazla hasara uğramıştır. Yüzeye etki eden aşındırıcı parçacıklardan dolayı, elyafları kaplayan matris tabakası elyafları erozyon ortamına bırakarak, paralel kuvvetin (F_p) varlığından dolayı kolayca kopar. Bu bağların bozulmasına ve elyafların kırılmasına neden olur.

Şekil 42-44'deki 90° çarpma açılarında, aşındırıcı parçacıkların çarpma durumu maksimum kinetik enerji üretir [3, 92, 101-103]. Aşındırıcı parçacıkların tüm kinetik enerjileri, mikro çatlak, mikro kesme, elyafların kırılması ve matrisin plastik deformasyon olarak dağılır. Sert aşındırıcı parçacıkların kompozit malzemelere sürekli olarak çarpması, malzemelerde zamanla krater oluşturur. Şekil 42a- 44a'da kompozitlerde oluşmuş bir krater görülmektedir. Şekillerden, CZ16 kompozit malzemede CSZ0 ve CS16 kompozitlere ya kıyasla daha derin ve daha büyük krater görülmektedir. Şekil 42b, 43b ve 44b'de sırasıyla CSZ0, CS16 ve CZ16 kompozitlerin düşük oranda büyütülmüş SEM resimleri görülmektedir. Şekil 43c'de CS16 kompozitdeki kraterin daha fazla büyütülmüş SEM resmi verilmiştir. Elyafların kesme olayından dolayı tamamen kırılması, elyafların matristen ayrılması ve toz haline gelmiş aşınma kalıntıları SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Şekil 44c' deki SEM grafiğinde CZ16 kompozit malzemedeki kraterin alt tarafı verilmiştir. Şekil 44c' deki gösterilmiş grafik, Şekil 42b'deki aşınmış yüzeyin benzer özelliklerini sergilemektedir ve ayrıca daha derin oluk ve boşluklar görülmüştür.

Şekil 45-47'de, 60° çarpma açılarında, 100 m/s çarpma hızı ve 175 μm SiC aşındırıcı toz boyutuyla aşındırılmış KSZ0 (dolgusuz), KS16 (%16 silis dumanı dolgulu) ve KZ16 (%16 çinko oksit dolgulu) karbon elyaftakviyeli kompozitlerin yüzey morfolojileri görülmektedir. Yüzey morfolojileri incelendiğinde elyaf kırılmaları, elyaf kopmaları ve matris deformasyonu görülmektedir. KS16 kodlu kompozit malzeme (Şekil 46) KSZ0 kodlu kompozit malzeme (Şekil 47) ile kıyaslandığında daha az elyaf/matris deformasyonu görülmektedir. Bunun nedeni matris içerisine eklenen silisyum dolgu parçacıklarıdır. Şekil 47'de diğer şekillere kıyasla (Şekil 45 ve Şekil 46) elyaf/matris kırılması, şiddetli deformasyonlar, mikro çatlak ve oyuklar daha fazla görülmektedir. Bunun sebebi yapıya eklenen çinko oksit dolgularının erozyon direncini kötü etkilemesi ve aşındırıcı parçacıkların sahip olduğu kinetik enerjiyi absorbe edememesidir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, epoksi reçine esaslı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışları ve ayrıca saf yapıya eklenen silis dumanı ve çinko oksit dolgu malzemelerinin erozyon davranışına etkisi incelendi. Bu deneysel çalışmada aşağıdaki sonuçlar çıkabilir:

1. Cam ve karbon elyaf içeren kompozit numuneler kıyaslandığında karbon elyaf içeren numuneler, cam elyaf içeren numunelere göre daha iyi aşınma performansı göstermiştir.
2. Çarpma hızının artmasıyla numunelerin erozyon aşınma oranları değişmiş olup en düşük aşınma 70 m/s çarpma hızında, en yüksek aşınma ise 200 m/s çarpma hızında elde edilmiştir.
3. Çarpma açısının 20°' den 90°' ye çıkarılmasıyla cam elyaf takviyeli kompozitlerde artan çarpma açısıyla erozyon aşınma değerleri artmış ve 90° çarpma açısında en yüksek erozyon oranı elde edilmiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde ise en yüksek aşınma 60° çarpma açısında de elde edilmiş bu değer üzerinde aşınma oranlarında bir miktar düşme olmuştur.
4. Cam elyaf takviyeli kompozit numuneler gevrek, karbon elyaf takviyeli numuneler ise yarı-gevrek erozyon davranışı sergilemiştir.
5. Artan çarpma süresiyle kompozit numunelerin toplam (kümülatif) erozyon oranları artmıştır.
6. Kompozit numunelerin erozyon davranışında en kötü erozyon direnci %16 çinko oksit dolgulu numune gösterirken en iyi erozyon direncini %16 silis dumanı içeren numuneler sergilemiştir.
7. Aşındırıcı toz boyutunun artması erozyon oranını arttırmıştır. Aşındırıcı toz boyutunun 72 µm' den 175 µm' ye artmasıyla erozyon oranında belirgin bir artış meydana gelmiş olup bu artış toz boyutunun 348 µm değerine çıkmasıyla yaklaşık olarak sabit kalmıştır.
8. Aşınmış yüzeylerin SEM bulgularından etkin aşınma mekanizmaları genellikle matris/elyaf kırılması, elyaf kopması, matris deformasyonu ve mikro çatlak şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

6. ÖNERİLER

1. Kompozit malzemelerin üretimleri için farklı üretim yöntemleri kullanılarak erozyon aşınma performansları incelenebilir.
2. Farklı sıcaklık şartları altında kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışları belirlenebilir.
3. Sıvı çamur gibi farklı aşındırıcı ortamları seçilerek erozyon aşınma deneyleri yapılabilir.
4. Erozyon testlerinde farklı tür ve şekile sahip aşındırıcı parçacıklar kullanılarak kompozitlerin erozyon performansları belirlenebilir.
5. Kompozit malzeme üretiminde farklı oranlarda farklı dolgular kullanılarak numunelerin erozyon dirençleri iyileştirilebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Arani, N. H., Rabba, W. and Papini, M., Solid Particle Erosion of Epoxy Matrix Composites Reinforced by Al₂O₃ Spheres, Tribology International, 136 (2019) 432-445.
2. Rani, P. U., Rajaprakash, B. M., Mohan, N. and Prasad, M. A., Study on Thermal and Erosive Wear Behaviour of Hard Powders Filled Glass-Epoxy Composite, Materials Today: Proceedings, 19 (2019) 1172-1178.
3. Lv, G., Zhang, N., Huang, M., Shen, C., Castro, J., Tan, K. and Liu, C., The Remarkably Enhanced Particle Erosion Resistance and Toughness Properties of Glass Fiber/Epoxy Composites via Thermoplastic Polyurethane Nonwoven Fabric, Polymer Testing, 69 (2018) 470-477.
4. Biswas, S. and Satapathy, A., A Study on Tribological Behavior of Alumina-Filled Glass-Epoxy Composites Using Taguchi Experimental Design, Tribology Transactions, 53, 4 (2010) 520-532.
5. Sari, N. and Sımmazçelik, T., Erosive Wear Behaviour of Carbon Fibre/Polyetherimide Composites Under Low Particle Speed, Materials & Design, 28, 1 (2007) 351-355.
6. Ray, S., Rout, A. K. and Kushoo, A., A Study on Tribological Behavior of Glass-Epoxy Composite Filled with Granite Dust, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 225, 1 (2017) 12097.
7. Rao, K. S., Varadarajan, Y. S. and Rajendra, N., Erosive Wear Behaviour of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composite, Materials Today: Proceedings, 2, 4-5 (2015) 2975-2983.
8. Bagci, M. and Imrek, H., Application of Taguchi Method on Optimization of Testing Parameters for Erosion of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite Materials, Materials & Design, 46 (2013) 706-712.
9. Pei, X. and Friedrich, K., Erosive Wear Properties of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced PEEK Composites, Tribology International, 55 (2012) 135-140.
10. Dalbehera, S. and Acharya, S. K., Effect of Cenosphere Addition on Erosive Wear Behaviour of Jute-Glass Reinforced Composite Using Taguchi Experimental Design, Materials Today: Proceedings, 2, 4-5 (2015) 2389-2398.
11. Rajesh, J. J., Bijwe, J., Venkataraman, B. and Tewari, U. S., Effect of Impinging Velocity on The Erosive Wear Behaviour of Polyamides, Tribology International, 37, 3 (2004) 219-226.

12. Gupta, A., Kumar, A., Patnaik, A. and Biswas, S., Effect of Filler Content and Alkalization on Mechanical and Erosion Wear Behavior of CBPD Filled Bamboo Fiber Composites, Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 2, 3 (2012) 149-157.
13. Rajesh, J. J., Bijwe, J., Venkataraman, B. and Tewari, U. S., Effect of Water Absorption on Erosive Wear Behaviour of Polyamides, Journal of Materials Science, 37, 23 (2002) 5107-5113.
14. Bagci, M., Imrek, H. and Omari, M. K., Effects of Silicon Oxide Filler Material and Fibre Orientation on Erosive Wear of GF/EP Composites, World Academy of Science, Engineering and Technology, 54 (2011) 976-980.
15. Fouad, Y., El-Meniawi, M. and Afifi, A., Erosion Behaviour of Epoxy Based Unidirectional (GFRP) Composite Materials, Alexandria Engineering Journal, 50, 1 (2011) 29-34.
16. Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S. and Dash, R. R., Parametric Optimization Erosion Wear of Polyester-GF-Alumina Hybrid Composites Using The Taguchi Method, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27, 10 (2008) 1039-1058.
17. Rout, A., Satapathy, A., Mantry, S., Sahoo, A. and Mohanty, T., Erosion Wear Performance Analysis of Polyester-GF-Granite Hybrid Composites Using The Taguchi Method, Procedia Engineering, 38 (2012) 1863-1882.
18. Rout, A. K. and Satapathy, A., Study on Mechanical and Tribo-Performance of Rice-Husk Filled Glass-Epoxy Hybrid Composites, Materials & Design, 41 (2012) 131-141.
19. Mahesha, C. R., Shivarudraiah, N. M. and Suprabha, R., Solid Particle Erosion of Basalt Fiber and Glass Fiber-Epoxy Composite, Int. J. Mech. Prod. Eng., 2 (2014) 30-34.
20. Singh, A. K., Gupta, P. and Singh, P. K., Evaluation of Mechanical and Erosive Wear Characteristics of TiO₂ and ZnO Filled Bi-Directional E-Glass Fiber Based Vinyl Ester Composites, Silicon, 10, 2 (2018) 309-327.
21. Papadopoulos, A., Gkikas, G., Paipetis, A. S. and Barkoula, N. M., Effect of CNTs Addition on The Erosive Wear Response of Epoxy Resin and Carbon Fibre Composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 84 (2016) 299-307.
22. Kumar Padhi, P. and Satapathy, A., Solid Particle Erosion Behavior of BFS-Filled Epoxy-SGF Composites Using Taguchi's Experimental Design and ANN, Tribology Transactions, 57, 3 (2014) 396-407.

23. Rattan, R. and Bijwe, J., Influence of Impingement Angle on Solid Particle Erosion of Carbon Fabric Reinforced Polyetherimide Composite, Wear, 262, 5-6 (2007) 568-574.
24. Bagci, M. and Imrek, H., Solid Particle Erosion Behaviour of Glass Fibre Reinforced Boric Acid Filled Epoxy Resin Composites, Tribology International, 44, 12 (2011) 1704-1710.
25. Tewari, U. S., Harsha, A. P., Häger, A. M. and Friedrich, K., Solid Particle Erosion of Carbon Fibre–And Glass Fibre–Epoxy Composites. Composites Science and Technology, 63, 3-4 (2003) 549-557.
26. Rajesh, J. J., Bijwe, J., Tewari, U. S. and Venkataraman, B., Erosive Wear Behavior of Various Polyamides, Wear, 249, 8 (2001) 702-714.
27. Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S. and Dash, R. R., A Taguchi Approach for Investigation of Erosion of Glass Fiber—Polyester Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27, 8 (2008) 871-888.
28. Mohan, N., Natarajan, S., Kumaresh Babu, S. P., Siddaramaiah, S. and Lee, J. H., Studies on Erosive Wear Behavior of UHMWPE-Filled Aramid–Epoxy Hybrid Composites, Materials and Manufacturing Processes, 27, 4 (2012) 430-435.
29. Daniel, I. M., Ishai, O., Daniel, I. M. and Daniel, I., Engineering Mechanics of Composite Materials, 3, 256-256, Oxford University Press, New York, 1994.
30. Yıldız, H. and Sarıkanat, M., Finite-Element Analysis of Thick Composite Beams and Plates, Composites Science and Technology, 61, 12 (2001) 1723-1727.
31. Askeland, D. R., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, (Çev. Mehmet Erdoğan), Nobel Yayınları, Ankara, 1998.
32. Sur, G., Karma Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
33. Kumral, C., Sıkıştırma Döküm ile Üretilmiş Al₂O₃ Takviyeli AA6110 Kompozit Malzemesinin Mekanik Özellikleri ve Isıl İşlem Davranışlarının Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
34. Tanır O., Termoplastik Kompozitlerin İmali ve Mekanik Özelliklerinin Bulunması, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İzmir, 1997.
35. Sorucu, A., Orthotropic Malzemelerde Çatlak İlerlemesi ve Kırılma Tokluğu Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007.

36. Department of Defense Handbook, Composite Materials Handbook, Volume 5, Ceramic Matrix Composites, 2002.
37. Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, 1-88, Gazi Kitapevi, Ankara, 2000.
38. Deniz, M. E., Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşleme Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzenegın Tasarım ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2005, 32-47.
39. Barut, C., Aramid Esaslı Kompozit Malzemelerin Balistik Performanslarının ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 2015.
40. Karşlı, M., Hafif Silahlar İçin Polimer Kompozit Malzeme Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
41. Tekmen Ç., Metal Matriksli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
42. Warren, R., Ceramic-Matrix Composites, Springer Science & Business Media, 1991.
43. Bakkal M., Kompozitler, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, (Çev. Kenan Genel), Nobel Yayınevi, Türkiye, 2011.
44. Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, 2. Baskı, Seçkin Yayınevi, Ankara, 2006.
45. Mazumdar, S., Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering, CRC Press, London, 2001,
46. Ayas, E., Al₂O₃-TiC/TiCN Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2003.
47. Strategic Study, The Worldwide Composite Industry Jec Composites 2010
48. Bağcı, M., Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010.
49. Kurt, H., Alüminyum-Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
50. Arıcasoy, O., Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası, 2006, 4-34.
51. Mazumdar, S.K., Composites Manufacturing, CRC Press, USA, 2002.

52. Gay, D., Composite Materials Design and Applications, CRC Press, USA, 2003.
53. Özer, H., Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2015.
54. İnançer, G., Farklı Takviye Malzemeli Plastik Kompozitlerin Darbe Davranışına Çevrenin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015.
55. Mıstık, S.Ü., Bor Lifi Takviyesinin Polimer Esaslı Kompozit Yüzeylerin Mekanik Özelliklerine Etkileri, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
56. Barbero, E. J., Introduction to Composite Materials Design, Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2018.
57. Chawla, K.K., Composite Materials Science and Engineering, Third Edition, Springer, New York, USA, 2011.
58. Strong, A. B., Composites Manufacturing Fundamentals of Materials, Methods, and Applications, Second Edition, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 2008.
59. Chang, F. K., Choi, H. Y. and Jeng, S. T., Study on Impact Damage in Laminated Composites, Mechanics of Materials, 10, 1-2 (1990) 83-95.
60. Yılmaz, F., Sürtünme ve Aşınma, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 1997, İstanbul, 229-247.
61. Gök, M. S. (2008). Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine TIG Kaynak Metoduyla Kaplanan Ostenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2008.
62. Ulutan, M., AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.
63. Ludema, K. C. and Ajayi, L., Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology, CRC Press, 2018.
64. Gürleyik, M. Y., Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları, Mühendis ve Makine, 27, 323 (1986) 3-14.
65. Kılınç, Y., Yağlı Sürtünme Şartlarında Çelik İnce Zırh Yataklarında Üretim Tekniklerinin Aşınma Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1-25, 1993.

66. Develi, F., Plazma Nitritleme ve Borlama ile Çift Yüzey İşlem Uygulanmış AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2010.
67. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, Second Edition, Wiley-Interscience Publication, Printed in the USA., 1995.
68. Kayalı, Y., Plazma Pasta Borlama Yöntemiyle Borlanmış AISI D2 Çeliğinin Aşınma ve Elektrokimyasal Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19, 1 (2019) 177-185.
69. Barut, N., Yavuz, D. ve Kayalı, Y. Borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 Çeliklerinin Difüzyon ve Adhezyon Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14, 1 (2014) 1-8.
70. Büyükkelleci, Ü., Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2008.
71. Kato, K. and Adachi, K. Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook, Edited by Bharat Bhushan, Vol. 1, 273-300, CRC Press, 2001.
72. Hutchings, I. M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, CRC Press, Boca Raton, 1992.
73. Zum Gahr, K. H., Microstructure and Wear of Materials, Vol. 10, Elsevier, North Holland, 1987.
74. Finnie, I., Wolak, J. and Kabil, Y., 1967. Erosion of Metals by Solid Particles, Journal of Materials, 2 682–700.
75. Barkalow, R. H., Goebel, J.A. and Pettit, F.S., 1979. Erosion-Corrosion of Coatings and Superalloys in High-Velocity Hot Gases, Erosion: Prevention and Useful Applications, ASTM STP 664, W.F. Adler (ed.), 163–192.
76. Ruff, A.W. and Ives, L.K., 1975. Measurement of Solid Particle Velocity in Erosive Wear, Wear, 35 195–199.
77. Kaundal, R., Role of Process Variables on The Solid Particle Erosion of Polymer Composites: A Critical Review, Silicon, 6, 1 (2014) 5-20.
78. Zhang, Y., Zhang, H., Yang, J. and Geng, G., Erosion Resistance and Interface Properties of Epoxy Composite Filled with Graded Silicon Carbide, Polymers and Polymer Composites, 24, 2 (2016) 161-166.
79. Singh, A. K., Gupta, P. and Singh, P. K., Evaluation of Mechanical and Erosive Wear Characteristics of TiO₂ and ZnO Filled Bi-Directional E-Glass Fiber Based Vinyl Ester Composites. Silicon, 10, 2 (2018) 309-327.

80. Deliwala, A. A., Peter, M. R. and Yerramalli, C. S., A Multiple Particle Impact Model for Prediction of Erosion in Carbon-Fiber Reinforced Composites. Wear, 406 (2018) 185-193.
81. Papadopoulos, A., Gkikas, G., Paipetis, A. S. and Barkoula, N. M., Effect of CNTs Addition on The Erosive Wear Response of Epoxy Resin and Carbon Fibre Composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 84 (2016) 299-307.
82. Srivastava, V. K. and Pawar, A. G., Solid Particle Erosion of Glass Fibre Reinforced Flyash Filled Epoxy Resin Composites, Composites Science and Technology, 66, 15 (2006) 3021-3028.
83. Mahesha, C. R., Shivarudraiah, N. M. and Suprabha, R., Solid Particle Erosion of Basalt Fiber and Glass Fiber-Epoxy Composite, Int. J. Mech. Prod. Eng., 2 (2014) 30-34.
84. Sınmazçelik, T. and Taşkiran, İ., Erosive Wear Behaviour of Polyphenylenesulphide (PPS) Composites, Materials & Design, 28, 9 (2007) 2471-2477.
85. Mohan, N., Mahesha, C. R. and Rajaprakash, B. M., Erosive Wear Behaviour of WC Filled Glass Epoxy Composites, Procedia Engineering, 68 (2013) 694-702.
86. Choudhary, M., Singh, T., Dwivedi, M. and Patnaik, A., Waste Marble Dust-Filled Glass Fiber-Reinforced Polymer Composite Part I: Physical, Thermomechanical, and Erosive Wear Properties. Polymer Composites, 40, 10 (2019) 4113-4124.
87. Kaundal, R., Utilization of Flyash as Filler Material in Hybrid Polyester Composites for Improved Thermo-Mechanical and Erosion Wear Behavior, Silicon, 10, 6 (2018) 2439-2452.
88. Kaundal, R., Patnaik, A. and Satapathy, A., Effect of SiC Particulate on Short Glass Fiber Reinforced Polyester Composite in Erosive Wear Environment, Walailak Journal of Science and Technology (WJST), 9, 1 (2012) 49-64.
89. Y. Singh, D. Kumar, J., A Study on Mechanical Characterization and Solid Particle Erosion Response of Glass Fiber Epoxy Based Composite with Filler SiC, Journal of Basic and Applied Engineering Research, 4, 2 (2017) 145-156.
90. Pethuraj, M., Uthayakumar, M., Rajakarunakaran, S. and Rajesh, S., Solid Particle Erosive Behaviour of Sillimanite Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites, Materials Research Express, 5, 6 (2018) 066514.
91. Arjula, S., Harsha, A. P. and Ghosh, M. K., Solid-Particle Erosion Behavior of High-Performance Thermoplastic Polymers, Journal of Materials Science, 43, 6 (2008) 1757-1768.

92. Tsiang, T. H., Sand Erosion of Fiber Composites: Testing and Evaluation, in Test Methods and Design Allowables for Fibrous Composites: 2nd Volume, (ed. C. Chamis), ASTM International, 1989.
93. Babu, B. G., Karthikeyan, P. N., Siva, K. and Sabarinathan, C., Study of Erosion Characteristics of MWCNT's-Alumina Hybrid Epoxy Nanocomposites Under The Influence of Solid Particles, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 11, 4 (2016) 1367-1373.
94. Harsha, A. P., Tewari, U. S. and Venkatraman, B., Solid Particle Erosion Behaviour of Various Polyaryletherketone Composites, Wear, 254, 7-8 (2003) 693-712.
95. Pawar, M. J., Patnaik, A. and Nagar, R., Numerical Simulation and Experimental Validation of Granite Powder Filled Jute Epoxy Composite for Slurry Jet Erosive Wear, International Polymer Processing, 31, 1 (2016) 37-50.
96. Sinmazcelik, T. and Sari, N. Y., Erodent Size Effect on The Erosion of Polyphenylene Sulfide Composite, Polymer Composites, 31, 6 (2010) 985-994.
97. Kaundal, R., Role of Process Variables on The Solid Particle Erosion of Polymer Composites: A Critical Review, Silicon, 6, 1 (2014) 5-20.
98. Nee, A. Y., Song, B. and Ong, S. K. (Eds.), Re-Engineering Manufacturing for Sustainability: Proceedings of The 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Singapore April, 2013, Springer Science & Business Media.
99. Hutchings, I. M., Ductile-Brittle Transitions and Wear Maps for The Erosion and Abrasion of Brittle Materials, Journal of Physics D: Applied Physics, 25, 1A (1992) A212.
100. Stack, M. M. and Pungwiwat, N., Slurry Erosion of Metallics, Polymers and Ceramics: Particle Size Effects, Materials Science and Technology, 15, 3 (1999) 337-344.
101. Suresh, A., Harsha, A. P. and Ghosh, M. K., Solid Particle Erosion of Unidirectional Fibre Reinforced Thermoplastic Composites, Wear, 267, 9-10 (2009) 1516-1524.
102. Kaundal, R., Patnaik, A. and Satapathy, A., Solid Particle Erosion of Short Glass Fiber Reinforced Polyester Composite, American Journal of Materials Science, 2, 2 (2012) 22-27.
103. Singh, T., Tejyan, S., Patnaik, A., Singh, V., Zsoldos, I. and Fekete, G., Fabrication of Waste Bagasse Fiber-Reinforced Epoxy Composites: Study of Physical, Mechanical and Erosion Properties, Polymer Composites, 40, 9 (2019) 3777-3786.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Osmaniye’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimi Osmaniye’de tamamladı. 2007 yılında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Makine bölümünden mezun oldu. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2015 yılında mezun oldu. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı. Yüksek lisans eğitimi süresince sempozyumlarda sunulmuş 2 adet bildirisi ve uluslararası yayınlanmış 1 adet makalesi bulunmaktadır. Yavuz Selim KILIÇARSLAN iyi derecede İngilizce bilmektedir.