

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÖRGÜ YAPILI SÜREKLİ KARBON FİBER TAKVİYELİ
POLİMER KOMPOZİTİN KATI PARTİKÜL EROZYONU**

HİLAL BIKMAZ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖRGÜ YAPILI SÜREKLİ KARBON FİBER TAKVİYELİ
POLİMER KOMPOZİTİN KATI PARTİKÜL EROZYONU

HİLAL BIKMAZ

Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Sinan FİDAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Ekrem ALTUNCU
Jüri Üyesi, Sakarya Uyg. Bil. Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 15.01.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde teknolojik ve endüstriyel gelişmelerin artmasıyla geleneksel malzemeler yetersiz kalmaya başlamış ve kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç artmıştır. Kompozit malzemeler içerisinde düşük yoğunluk ve yüksek özgül özellikleri nedeniyle polimer matrisli kompozitler tercih edilmektedir. Polimer matris malzemesi olarak genellikle epoksi reçineler kullanılmaktadır. Tek başına epoksi matrisli kompozitler yetersiz kalmaktadır bu sebeple karbon fiberler takviye edilerek olağanüstü dayanıklılık ve rijitlik elde edilmektedir. Bu kompozit malzemeler havacılık, uzay, otomotiv ve savunma gibi uygulama alanlarında kullanılmalarından dolayı katı partikül erozyonuna maruz kalmaktadır. Ayrıca literatürde en çok çalışılan konulardan biri katı partikül erozyonudur. Eroziyon aşınma bir taraftan makinalara zarar veren, onları aşındırarak kullanılmak hale getiren bir aşınma türü olsa da diğer taraftan makine parçalarına istediğimiz yüzey özelliklerini kazandırmak amacıyla istediğimiz doğrultusunda kullandığımız bir yöntemdir. Tez çalışmasında bu hususlar göz önünde bulundurularak karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin katı partikül erozyonu davranışına etki eden parametreler incelenmiş ve bu parametrelere bağlı olarak erozyon oranı, yüzey görüntüleri ve yüzey morfolojileri incelenerek bu kompozit malzemenin katı partikül erozyonu davranışı karakterize edilmiştir.

Tez çalışmam boyunca her aşamada bana elinden gelen tüm yardım ve desteği sağlayan Arş. Gör. Y. Müh. Alp Eren ŞAHİN'e, Arş. Gör. Y. Müh. Beysim ÇETİN'e, sahip olduğu laboratuvar imkanlarını benimle paylaşan Doç. Dr. Sinan FİDAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bana her zaman yol gösteren ve destek veren, kapısını her çaldığımda yardımcı olan ve çalışmam sırasında beni sürekli cesaretlendiren danışmanım Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK' e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında her zaman yanımda olan ve beni cesaretlendiren aileme çok teşekkür ederim.

Ocak - 2019

Hilal BIKMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ	vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi	4
1.2. Kompozit Malzemelerin Tanımı	5
1.3. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri	7
1.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	9
1.4.1. Matris tipine göre kompozit malzemeler	9
1.4.1.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler	9
1.4.1.1.1. Termoplastik malzemeler	10
1.4.1.1.2. Termoset malzemeler	12
1.4.1.1.2.1. Epoksi reçineler	13
1.4.2. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler	16
1.4.2.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler.....	16
1.4.2.1.1. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler.....	18
1.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	22
2. KATI PARTİKÜL EROZYONU	24
2.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı	26
2.2. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı	27
2.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütleli Debisi	28
2.4. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu	28
2.5. Aşınan Malzeme Özellikleri.....	29
3. KARBON FİBER TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMENİN EROZYON DAVRANIŞININ LİTERATÜR ÇALIŞMALARINDAN ÖRNEKLER	30
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36
4.1. Malzeme	36
4.1.1. Hedef malzeme	36
4.1.2. Aşındırıcı malzeme	36
4.2. Yöntem	37
4.2.1. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin hesaplanması	38
4.2.2. Eroziyon aşınma deneyi	39
4.2.3. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri	40
4.2.4. Yüzey morfolojilerinin incelenmesi	41
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	42
5.1. Eroziyon Aşınma Deneylerinin Sonuçları	42
5.1.1. Eroziyon oranının partikül çarpma açısına göre değişimi	43

5.1.2. Erozyon oranının partikül boyutuna göre değişimi.....	45
5.1.3. Erozyon oranının fiber yönlenmesine göre değişimi.....	47
5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Görüntülerinin İncelenmesi	49
5.2.1. Partikül boyutlarına göre yüzey pürüzlülüğü görüntülerinin incelenmesi	50
5.2.1.1. 120 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntülerinin incelenmesi	50
5.2.1.2. 80 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntülerinin incelenmesi	52
5.2.1.3. 60 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntülerinin incelenmesi	54
5.3. Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi	56
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	72



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kompozit malzeme faz çeşitleri.....	6
Şekil 1.2.	Kompozit malzemeler.....	6
Şekil 1.3.	Tabakalı kompozit malzemeler.....	7
Şekil 1.4.	Çeşitli malzemelerin dayanım ve yoğunluk değerleri	8
Şekil 1.5.	Epoksi ailesinin genel kimyasal yapısı	13
Şekil 1.6.	DGEBA'nın oluşumu	14
Şekil 1.7.	Çapraz bağlanmış epoksi polimeri.....	15
Şekil 1.8.	Değişik tipte fiber takviyeli kompozitler	17
Şekil 1.9.	PAN ve zift proseslerinin şematik gösterimi	21
Şekil 1.10.	Elyaf dokuma türleri	21
Şekil 2.1.	Erozif aşınma şekilleri	24
Şekil 2.2.	Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler.....	25
Şekil 2.3.	Sünek/kırılgan malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri.....	27
Şekil 3.1.	Fiber yönlenmesinin, partikül çarpma açısına olan etkisi a) karbon fiber takviyeli epoksi kompozit b) cam fiber takviyeli epoksi kompozit (çarpma hızı: 45 ± 5 m/s, çelik bilyaların çapı: 300-500 μ m, püskürtme süresi: 180 s).....	31
Şekil 3.2.	Aşındırıcı olarak kullanılan silika kumunun SEM görüntüsü	33
Şekil 3.3.	Alüminyum oksit aşındırıcının taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	35
Şekil 4.1.	Karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit numunelerin boyutları	36
Şekil 4.2.	Alümina kristal yapısı	37
Şekil 4.3.	Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması	38
Şekil 4.4.	Katı partikül erozyonu aşınma test düzeneği	39
Şekil 4.5.	Optik profilometre cihazı.....	40
Şekil 4.6.	Nikon SMZ 745T markalı stereo mikroskop.....	41
Şekil 5.1.	Erozyon oranının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi a) fiber yönlenmesi: +45/-45, b) fiber yönlenmesi: 0/90	44
Şekil 5.2.	Erozyon oranının katı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi a) fiber yönlenmesi: +45/-45, b) fiber yönlenmesi: 0/90	46
Şekil 5.3.	Erozyon oranının karbon fiber yönlenmesine bağlı olarak değişimi a) partikül boyutu 120 mesh, b) partikül boyutu 80 mesh, c) partikül boyutu 60 mesh.....	48
Şekil 5.4.	0/90 fiber yönlenmesi ve 120 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15^0 partikül çarpma açısı, b) 60^0 partikül çarpma açısı, c) 90^0 partikül çarpma açısı.....	50
Şekil 5.5.	+45/-45 fiber yönlenmesi ve 120 mesh partikül boyutundaki Partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15^0 partikül çarpma açısı, b) 60^0 partikül çarpma açısı, c) 90^0 partikül çarpma açısı.....	51

Şekil 5.6.	0/90 fiber yönlenmesi ve 80 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15 ⁰ partikül çarpma açısı, b) 60 ⁰ partikül çarpma açısı, c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı.....	52
Şekil 5.7.	+45/-45 fiber yönlenmesi ve 80 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15 ⁰ partikül çarpma açısı, b) 60 ⁰ partikül çarpma açısı, c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı.....	53
Şekil 5.8.	0/90 fiber yönlenmesi ve 60 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15 ⁰ partikül çarpma açısı, b) 60 ⁰ partikül çarpma açısı, c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı.....	54
Şekil 5.9.	+45/-45 fiber yönlenmesi ve 60 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15 ⁰ partikül çarpma açısı, b) 60 ⁰ partikül çarpma açısı, c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı.....	55
Şekil 5.10.	a) 15 ⁰ , b) 60 ⁰ , c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: 0/90, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh).....	59
Şekil 5.11.	a) 15 ⁰ , b) 60 ⁰ , c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: +45/-45, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh).....	60
Şekil 5.12.	a) 15 ⁰ , b) 60 ⁰ , c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: 0/90, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh).....	61
Şekil 5.13.	a) 15 ⁰ , b) 60 ⁰ , c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: +45/-45, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh).....	62
Şekil 5.14.	a) 15 ⁰ , b) 60 ⁰ , c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: 0/90, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh).....	63
Şekil 5.15.	a) 15 ⁰ , b) 60 ⁰ , c) 90 ⁰ partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: +45/-45, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh).....	64

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Takviye türlerinin karşılaştırılması.....	18
Tablo 1.2. Karbon fiber ile e-camı fiberin karşılaştırılması.....	19
Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları.....	36
Tablo 4.2. Katı partikül erozyonu aşınma deney parametreleri.....	40
Tablo 4.3. Optik profilometre cihazının özellikleri	41
Tablo 5.1. Erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler	42



SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

T_g	: Camı geçiş sıcaklığı, ($^{\circ}$)
E	: Erozyon oranı, (g/g)
Δm_s	: Örnek numunenin kütle kaybı, (g)
m_e	: Aşındırıcı kütle, (g)
ρ	: Yoğunluk, (g/cm ³)
E	: Çekme modülü, (GPa)
σ_{fu}	: Çekme dayanımı, (MPa)
MoS_2	: Molibden disülfür
N_2	: Azot
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
SiO_2	: Silikon oksit
TiO_2	: Titanyum oksit

Kısaltmalar

DGEBA	: Diglisidil eter bisfenol-A
PAN	: Poliakrilonitril
PC	: Polikarbonat
PE	: Polietilen
PEEK	: Poli(eter eter keton)
PMMA	: Poli(metil)metakrilat
PP	: Polipropilen
PPS	: Poli(fenilen)sülfid
PS	: Polistiren
PSU	: Polisülfon
PVC	: Polivinil klorür
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)
UHMWPE	: Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen)
VARTM	: Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama)
VARI	: Vacuum Assisted Resin Infusion (Vakum Destekli Reçine İnfüzyonu)
WC	: Tungsten karbür

ÖRGÜ YAPILI SÜREKLİ KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTİN KATI PARTİKÜL EROZYONU

ÖZET

Karbon fiberler, mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler gibi benzersiz özelliklere sahiptirler. Yüksek mukavemet ve rijitlik, yüksek modül değerleri ve yüksek korozyon direnci gösterirken, diğer malzemelere göre daha düşük yoğunluğa sahiptirler. Üstün özellikleri nedeniyle karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler özellikle uzay ve havacılık uygulamalarında katı partikül erozyonuna maruz kalmaktadır. Katı partikül erozyonu iş parçalarının ciddi hasara uğramasına ve ekonomik ömrünün çok daha kısa olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin katı partikül erozyon davranışları incelenmiştir. Numuneler partikül erozyon aşınma test makinesinde test edilmiştir. Deneysel çalışmalarda 120 mesh, 80 mesh ve 60 mesh aşındırıcı partiküller kullanılarak partikül çarpma açılarına (15^0 , 30^0 , 45^0 , 60^0 , 75^0 ve 90^0) ve karbon fiberlerin yönlenmesine ($0/90$ ve $+45 / -45$) olan etkileri incelenmiştir. Numunelerin erozyon oranının erozyon parametrelerine bağlı olarak değişimi hesaplanmıştır. Numunelerin erozyon oranı partikül çarpma açısı, karbon fiber yönlenmesi ve aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak önemli oranda değişiklik göstermiştir. Tüm karbon fiber yönlenmelerinde ve tüm partikül boyutlarında 60^0 partikül çarpma açısında maksimum erozyon oranı gözlemlenmiştir. Aşınmış numunelerin yüzeyleri optik profilometre cihazı ile 2 ve 3 boyutlu olarak incelenmiştir. Daha sonra aşınmış numunelerin yüzey morfolojileri stereo mikroskop ile incelenmiştir. 60^0 partikül çarpma açısında oluşan plastik deformasyon sebebiyle yüzeylerde derin oyuklar meydana gelirken, 15^0 partikül çarpma açısında mikrokese ve mikrosürme aşınma mekanizmaları gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Epoksi Reçine, Karbon Fiber, Katı Partikül Erozyonu, Kompozit, Yüzey Morfolojisi.

PARTICLE EROSION BEHAVIOUR OF WOVEN CONTINUOUS CARBON FIBRE REINFORCED POLYMER COMPOSITES

ABSTRACT

The carbon fibres have a unique combination of outstanding properties such as mechanical, physical and chemical properties. While they exhibit high strength and stiffness, high modulus values, high resistance to corrosion, they have lower density compared to universal materials. Due to their outstanding properties the carbon fibre reinforced polymeric composite materials are exposed to solid particle erosion especially in aviation and aerospace applications. The solid particle erosion causes severe damage of workpieces and economic life of workpiece become much more shorter. In this study solid particle erosion behavior of carbon fibre reinforced epoxy composite materials were investigated. The samples were tested in universal particle erosion wear test machine. Effect of particle impact angles (15° , 30° , 45° , 60° , 75° and 90°), orientation of carbon fibres ($0/90$ and $+45/-45$) were examined by using 120 mesh, 80 mesh and 60 mesh alumina erodent particles. The erosion rates of samples were calculated depending on the erosion parameters. The erosion rates have varied dramatically depending on particle impingement angle, orientation of carbon fibres and erodent particle size. The maximum erosion rates were observed at 60° impingement angles at all orientation of carbon fibres and particle sizes. Surfaces 2D and 3D images of eroded samples were examined by using an optical profilometer. The eroded surfaces morphology of the samples were analyzed by using stereo microscope. Microcutting and microploughing erosion mechanisms were observed at 15° particle impingement angle, while deep cavities formed due to plastic deformation were observed at 60° particle impingement angle.

Keywords: Epoxy Resin, Carbon Fibre, Solid Particle Erosion, Composites, Surface Morphology.

GİRİŞ

Dünyada, hızla artan insan ihtiyacını karşılamak amacıyla birçok alanda teknolojik gelişmeler yapılmaktadır. Bu teknolojik gelişmelerin en önemli alanlarından biri de malzeme alanında yapılan çalışmalardır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte kullanılan malzemeler gerekli ihtiyaçları karşılamayarak yetersiz kalmıştır ve malzeme özelliklerinin geliştirilmesi şart olmuştur. Gelişen teknolojiye bu eksikliğı giderebilmek amacıyla kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır.

Mühendislik tasarımlarında kullanılan metallerin yerini yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci ve hafiflik gibi birçok özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler almıştır. Bu üstünlüklerinden dolayı kompozit malzemeler havacılık, savunma, uzay, otomotiv ve denizcilik gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler en az bir matris malzemesi ve en az bir takviye malzemesinden oluşmaktadır.

Kompozit malzemelerin üretiminde genellikle matris malzemesi olarak polimer matrisler kullanılmaktadır. Polimer malzemeler tek başlarına kullanıldıklarında diğer malzemelere göre dayanıksız malzemelerdir fakat takviye malzemeleri ile birleştirilmeleri durumunda yüksek mukavemet, rijitlik ve düşük yoğunluk gibi özelliklere sahip olmaktadır.

Kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak genellikle epoksi reçineler kullanılmaktadır. Epoksi reçinelerin tercih edilme sebepleri yüksek aşınma direnci, yüksek kopma mukavemeti ve yüksek korozyon direnci gibi özelliklere sahip olmasıdır. Polimer (genellikle epoksi reçine) matrisli kompozit malzemelerde yaygın olarak karbon fiberler tercih edilmektedir. Karbon fiberler diğer fiber çeşitleri olan cam ve aramid fiberlere göre daha dayanıklı, rijit ve hafif olmaları sebebiyle daha çok kullanılmaktadırlar. Epoksi matrisli malzemelere karbon fiberler takviye edildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve rijitlik elde edilmektedir.

Karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeler tank yapıları, savaş jetleri, helikopter rotor kanatları ve su türbinleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu tür uygulama alanlar genellikle tozlu ortamlarda çalışmaktadır ve bu sebeple kullanılan kompozit malzemeler katı partikül erozyonuna maruz kalmaktadırlar.

Mühendislik malzemelerinde aşındırıcı partiküllerin tekrarlı ve devamlı darbeleri sonucu katı partikül erozyonu meydana gelmektedir. Katı partikül erozyonu malzemelere zarar veren ve malzeme kayıplarının gerçekleşmesine sebep olan çok karmaşık bir süreçtir. Katı partikül erozyonu bunlar gibi birçok olumsuz bir etkiye sebep olmasının yanında tarihi eserlerin restorasyonu, makine elemanlarının temizliği ve sağlık sektöründe ise diş temizliği gibi faydalı uygulamalarda da kendine uygulama alanı bulabilmektedir.

Bu tez çalışmasında karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeler katı partikül erozyonuna maruz bırakılarak birçok farklı parametre altında erozif aşınma davranışları incelenmiştir. Bu farklı parametreler altında aşındırılan numunelerin yüzey morfolojileri incelenerek bir sonuç ortaya çıkartmak amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının birinci bölümünde öncelikle kompozit malzemelerden genel olarak bahsedilmiştir. Ayrıca matris malzemesi olarak kullanılan epoksi reçineler ile takviye malzemesi olarak kullanılan karbon fiber malzemelerin özellikleri ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise mühendislik malzemelerinin maruz kaldığı katı partikül erozyonundan genel bir şekilde bahsedilmiş ve katı partikül erozyonuna etki eden farklı parametreler alt başlıklarda açıklanarak anlatılmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde literatürdeki karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin katı partikül erozyonu ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde deneysel çalışmalar başlığı altında karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzeme tanıtılmış ve numunelere uygulanan katı partikül erozyonuna yer verilmiştir.

Aşındırılan numunelerin yüzey morfolojilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi için kullanılan stereo mikroskop ve aşınan numune yüzeylerinin 2 ve 3 boyutlu görüntülerinin incelenmesi için kullanılan optik profilometre cihazı tanıtılmıştır.

Beşinci bölümde ise kompozit numunelere uygulanan katı partikül erozyonu testi sonucunda elde edilmiş olan bulgular ve sonuçlar irdelenerek grafikler yardımı ile açıklanmıştır. Ayrıca optik profilometre cihazı ile taranarak elde edilen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri ve stereo mikroskop cihazı ile elde edilen yüzey morfolojilerinin görüntüleri verilmiş ve yorumlanmıştır.

Çalışmanın son bölümünde ise deneysel çalışmalar sonrasında çıkarılan sonuçlar özetlenmiştir.

1. KOMPOZİT MALZEMELER

1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Günümüzde inşaat sektöründen otomotiv sektörüne, uçak sektöründen uzay teknolojisine kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin üretimi son birkaç yüzyılda ortaya çıkmış gibi görülse de ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır. 1940'lı yılların başında kompozit malzeme kavramı ortaya atılmış ve bir mühendislik konusu olarak ele alınmıştır [1].

İlk çağlarda insanlar, kırılğan yapıdaki malzemelerin içine bitkisel ve hayvansal fiberler koyarak bu malzemelerin dayanımını artırmışlardır. Bu uygulamaya en iyi örneklerden biri yapı malzemesi olarak kullanılan kerpiçtir. Kerpiç, killi toprak içine samanın karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Kerpicing içine katılan saman malzemenin üretimi ve kullanımı sırasındaki dayanımını artırmaktadır [2].

1930'lu yıllarda Amerika Birleşik Devletlerinde çimentoya kısa cam fiber takviye edilerek fiber kompozitlerin daha gelişmiş bir çeşidi ortaya çıkmıştır ve 1940 yılında fiber katkılı kompozitler geliştirilmeye başlanmıştır. İkinci Dünya Savaşı'nda tekne gövdeleri ve radar kubbeleri yapımında cam fiber ve polyester reçine kompozitler kullanılmıştır [3]. Cam takviyeli plastikten tekne ilk kez 1942 de yapılmıştır. Aynı zamanda üretilen uçak parçalarında takviyeli plastikler kullanılmıştır. İlk elyaf sarma patenti ise 1946 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde alınmıştır ve 1950'lerde uçak pervaneleri kompozit malzemelerden yapılmaya başlanmıştır [4]. İlk kez 1950'lerde kompozit malzemeler otomobillerde kullanılmıştır. Zamanla kompozitler üzerinde daha fazla araştırma yapılmaya ve üretim sürecini geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [3].

Günümüzde kompozit malzemenin takviye edilmesinde yaygın olarak kullanılan fiberlerle ilgili uygulamalar çok eskilere dayanmaktadır. Örneğin cam fiberlerin üretimi, eski Mısır'a kadar dayanmaktadır. Araştırmalara göre M.Ö. 1600 yıllarında Mısır'da ince cam fiberlerin yapımı bilinmekteydi.

Cam fiberlerin sanayide kullanımı ilk kez 1877 yılında gerçekleşmiştir. Bu yüzyılın başında, hidrolik bağlayıcılar ve elyaf malzeme kullanılarak yapay taş plakaların üretilmesi yöntemi hakkında patentler yer almaktadır. Günlük uygulamalarda en yaygın kullanım olanağı bulmuş olan fiberlerle donatılmış kompozit malzemelerden, biri asbest fiberler ile donatılı kompozit malzemeler diğeri ise cam fiberlerle donatılı polyester kompozit malzemelerdir. Çimento ve asbest kompozitleri ilk kez ince levha yapımında kullanılmıştır ve bugün hala kullanılmaktadır.

Fiberler ile donatılı sentetik reçineler 1950'li yılların ortalarından itibaren döküm endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin en tanınmış grubu “cam fiberi donatılı polyester reçineli kompozit” tir. Ülkemizde “fiberglass” diye bilinen bu malzeme 1960'lı yılların başından itibaren Türkiye’de çatı levhaları, sıvı depoları, küçük boyda deniz teknelerinin yapımı gibi alanlarda kullanılmıştır. Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan “Anadol”un kaportası bu malzemedan üretilmiştir [5].

İlk kez boron ve yüksek dayanımlı karbon fiberler 1960'lı yılların başında ortaya çıkmıştır. Ticari olarak ilk Kevlar (Aramid) fiber A.B.D.’de DuPont firması tarafından 1965 yılında tanıtılmıştır. 1970 yılında bor/alüminyum gibi metal matrisli kompozitler ortaya çıkmıştır. 1970’lerin sonundan itibaren kompozit malzemelerin otomotiv, uçak ve biyomedikal endüstri alanlarındaki uygulamaları yaygınlaştı [4].

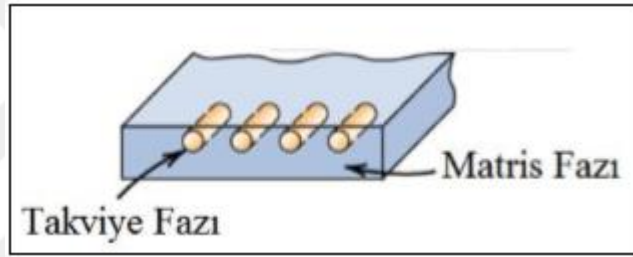
1.2. Kompozit Malzemelerin Tanımı

Kompozit malzeme; fiziksel ve/ veya kimyasal olarak farklı fazlardan oluşan iki ya da daha fazla sayıdaki malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşan malzemelerin genel adıdır [6]. Bu malzemeleri bir araya getirmedeki amaç, tek başlarına özellikleri yeterli olmayan farklı malzemelerin uygun olan özelliklerini tek bir malzemedan toplayarak istenilen özellikte bir malzeme ortaya çıkarmaktır.

Ali, Joshi, Thariq ve Sultan tarafından kompozit malzemeler; “İki veya daha fazla farklı malzemenin eşsiz bir kombinasyonu sonucu meydana gelen malzemelerdir.” şeklinde tanımlanmaktadır [7].

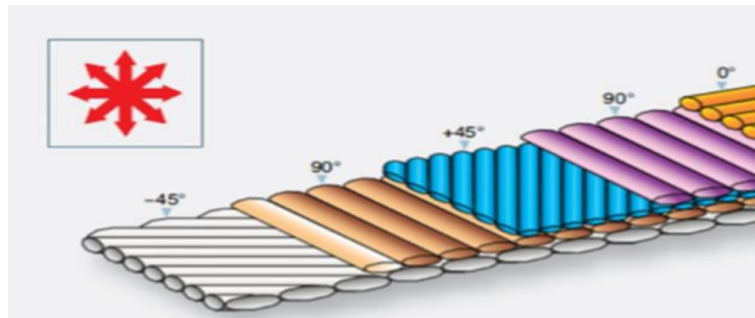
Ekh ise kompozit malzemeleri; “Yüksek sağlamlık ve mukavemete sahip takviye elemanının sürekli bir malzeme olan matris içine gömülmesiyle farklı özelliklerde ki iki veya daha fazla malzemenin birleşmesiyle oluşmaktadır.” şeklinde tanımlamıştır [8]. Kaw tarafından kompozit malzemeler; “Makroskobik seviyede birleştirilen ve birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşen içeren yapısal bir malzemedir.” olarak tanımlanmaktadır [2].

Campbell ise çalışmalarında kompozit malzemeleri; “Tek başına kullanıldıklarında iyi özelliklere sahip olan iki veya daha fazla malzemenin birleşmesi ile meydana gelen malzemelerdir.” şeklinde tanımlamaktadır [9]. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi kompozit malzemelerde sürekli (ana faz) faza matris ve kesintili (parçalı) veya elyaf (fiber) şeklindeki fazlara ise takviye fazı (ikincil faz) adı verilir [10].

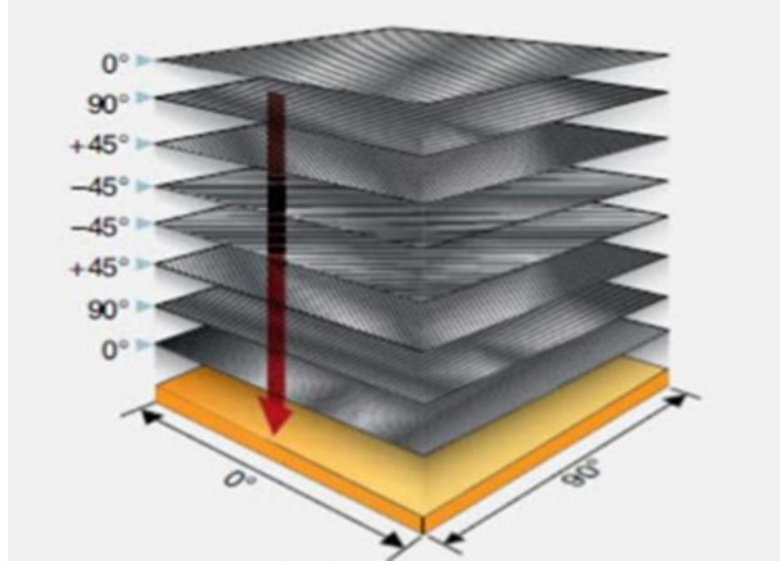


Şekil 1.1. Kompozit malzeme faz çeşitleri [10]

Kompozitlerde takviye elemanı, matrisi mukavemet ve rijitlik bakımından güçlendirmek için kullanılır. Çoğu durumda takviye elemanı matristen daha rijit ve daha dayanımlıdır. Takviye elemanı genellikle bir fiber veya bir partiküldür. Fiberler, elde edilecek olan kompozit malzemenin özelliklerini etkilemek için kesilebilir, hizalanabilir ve farklı şekillerde yerleştirilebilir. Matris, takviye elemanını istenilen şekilde tutar. Şekil 1.2 ve şekil 1.3’de görüldüğü gibi ince katmanlı malzemelerin üst üste eklenmesi ile tabakalı kompozit yapılar elde edilmektedir [11].



Şekil 1.2. Kompozit malzemeler [11]



Şekil 1.3. Tabakalı kompozit malzemeler [11]

1.3. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Kompozit malzemelerin en büyük avantajı kompoziti oluşturan bileşenlerin en iyi özelliklerini bir araya getirmesidir. Kompozit malzemelerin üretimiyle genellikle aşağıda verilen özelliklerden birinin ya da birkaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Aşağıda kompozit malzemelerin bazı avantajları verilmiştir [3].

- Dayanım: Kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinden biri de dayanımdır. Kompozit malzemeler çok rijit olduklarından dolayı, binalar ve gemiler gibi bütün yapılarda gerekli dayanımı sağlarlar. Kompozitlerin çekme mukavemeti çelik ve alüminyumdan 4 ila 6 kat daha fazladır. Kompozit malzemedan yapılmış yapılar, alüminyumdan yapılmış olan yapılara göre %30-40 daha hafiftir [3].
- Ağırlık: Kompozit malzemelerin hafifliği deprem gibi çeşitli doğal felaketlerde avantaj sağlamaktadır. Depremlerde gerçekleşen ölümler, insanların ağır beton ve metal kirişler altında kalmasından kaynaklanmaktadır. Konutlar hafif kompozitler kullanılarak inşa edildiğinde herhangi bir felaket durumunda insanlar üzerindeki etkinin azaltılmasına yardımcı olur [3].
- Kompozitler düşük termal iletkenlik ve düşük termal genleşme katsayısına sahiptirler.
- Korozyon ve aşınmaya karşı yüksek direnç gösterirler.
- Yorulma dayanımları yüksektir.

- Fiberler, uygulanan yüklerin ağırlığını taşıyabilmek için gerilim yönünde düzenlenebilir.
- Kompozitlerin burulma, burkulma, kayma dirençleri yüksektir.
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel dirençleri yüksektir.
- Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır.

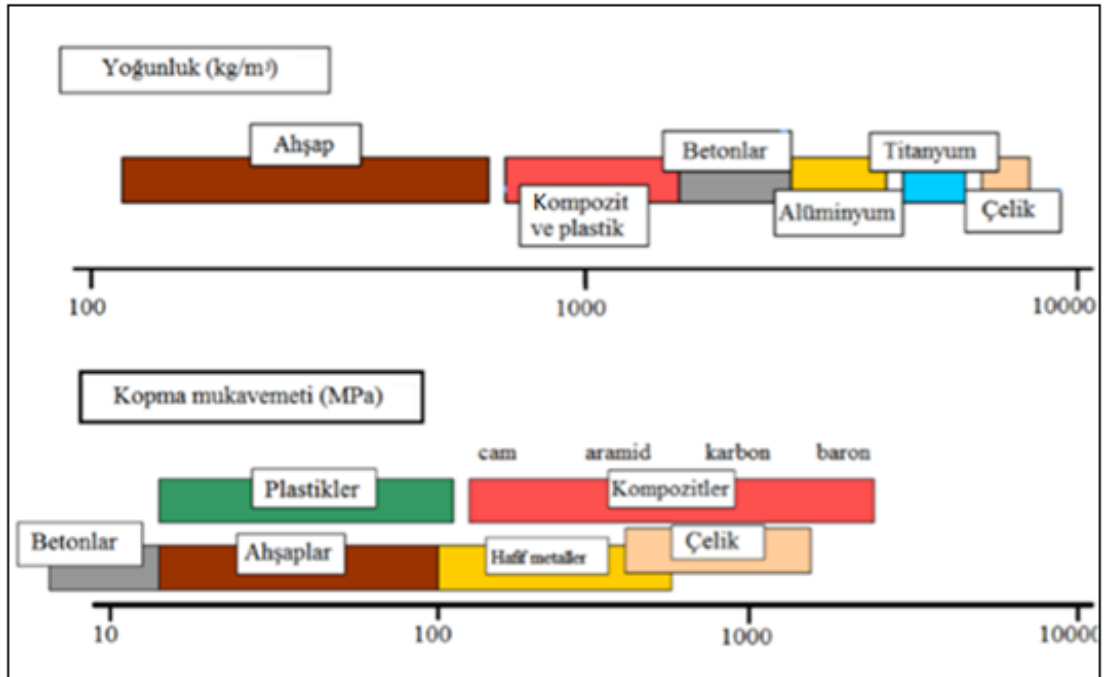
ve benzeri özellikler şeklinde sıralanabilir [12].

Kompozit malzemelerin bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır.

Bunlar;

- Hammadde ve üretim maliyeti pahalıdır.
- Malzemelerin raf ömürleri sınırlıdır. Bu yüzden bazı kompozitlerin naklieleri ve depolanmaları soğuk ortamlarda gerçekleştirilmelidir.
- Bazı bileşenlerin üretim öncesi kurutulmaları zaman almaktadır.
- Matris, çevresel bozulmaya maruz kalmaktadır.
- Analizi zordur [12].

Şekil 1.4 incelendiğinde kompozit malzemeler ile diğer malzemelerin yoğunluk ve dayanım ilişkisi daha iyi bir şekilde anlaşılmaktadır.



Şekil 1.4. Çeşitli malzemelerin dayanım ve yoğunluk değerleri [10]

1.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Daha önce de bahsedildiği gibi kompozit malzemeler matris (sürekli faz) ve takviye (ikincil faz) fazından oluşmaktadır. Ayrıca malzeme içerisinde fazlar arasında büyük miktarda iç yüzey (ara yüzey) oluşur. Kompozit malzemeler matris tipine göre kompozitler ve takviye elemanına göre kompozitler olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır [6].

1.4.1. Matris tipine göre kompozit malzemeler

Kompozit yapılarda matrisin 3 temel görevi vardır. Bunlar;

- Fiberleri yapının içinde bir arada tutmak
- Fiberleri yağmur ve nem gibi çevresel etkilerden korumak
- Gelen yükü fiberler arasında eşit olarak dağıtmaktır.

Ayrıca kompozit bir malzemenin kullanım sıcaklığını, nem ve sıvılara karşı direncini, termal ve oksidasif kararlılığını matris malzemesi belirler. Matris, kompozit malzemelerde darbe ve aşınma direnci, hasar toleransı ve tokluk özelliklerini sağlar [9].

Kompozit yapılarda matris malzemesinin önemi çok büyüktür. Fiberlerin gelen yükü taşıyabilmesi için matris malzemesinin bu yükü tüm elyaflara eşit dağıtması gerekmektedir. Fakat matris malzemesi olmayan bir elyaf demeti düşünürsek gelen yük bir veya birkaç elyaf tarafından taşınacaktır [13].

Matris malzemesine göre kompozit malzemeler; polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler, karbon ve grafit matrisli kompozitler olmak üzere 4'e ayrılmaktadır.

1.4.1.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler

Kompozit malzemelerin çok büyük bir kısmı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. Polimer matrisli kompozit malzemeler makine elemanları ve mühendislik yapı malzemelerinin arasında en yaygın olarak kullanılan malzemelerden biri haline gelmiştir. Otomotiv, denizcilik ve havacılık sektörü, tekstil, boya, inşaat, elektrik-

elektronik, gıda, ambalaj, tıp gibi birçok geniş kullanım alanları polimer kompozit malzemeleri günlük yaşamımızla bütünleştirmektedir [14].

Polimer matrisli kompozitlere cam, karbon, aramid elyaflar takviye edildiğinde daha yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip olurlar [15]. Polimer kompozit malzemeler korozyona dirençli, bakım ve onarımı kolay, uzun süreli kullanıma uygun, istenilen büyük karmaşık bir şekle dahi kolayca şekillendirilebilen, işlenmesi kolay malzemelerdir [16]. Polimer kompozit malzemelerin yüksek özgül mukavemet ve özgül çekme modülü en önemli özelliklerindedir. Bu malzemelerin yüksek mukavemetli çeliklere göre özgül mukavemet değerleri daha yüksektir. Ayrıca polimer kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılan karbon fiberlerinin özgül çekme modülü alüminyumun çekme modülünden 5 kat daha yüksektir.

Polimer matrisli kompozit malzemeler bu üstün özellikleri sayesinde uzay ve uçak sektöründe alüminyuma göre daha çok tercih edilmektedir [17].

Çeşitli mühendislik uygulamalarında metal malzemelere göre daha çok tercih edilen polimer matrisli kompozit malzemeler sadece hafiflik, korozyona direnç gibi özellikler ve insan dokuları ile uyum sağlayan yapay doku ve organlar gibi uygulamaların dışında “optik elyaf ve basınç ile elektrik üretebilen” piezoelektrik özellikli ve istenilen şekilde işlenebilen özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerine kullanılmaktadır [18].

Polimer matrisli kompozit malzemelerde matris bileşeni olarak, termoset ve termoplastik malzemeler kullanılmaktadır.

1.4.1.1.1. Termoplastik malzemeler

Termoplastik malzemeler yüksek molekül ağırlıklı reçinelerdir. Bu nedenle termoplastiklerin viskozitesi termosetlerin viskozite değerinden daha yüksektir. Termoplastik polimerlerin zincirleri düz (doğrusal) ya da dallanmış yapıda bulunurlar ancak zincirler arasında çapraz bağ kesinlikle görülmez. İkinci dereceden zayıf Van der Waals bağlarıyla bağlanarak oluşturulmuşlardır. Termoplastik malzemeler zayıf bir yapıya sahip olduklarından dolayı camsı geçiş sıcaklığının üzerine kadar ısıtılırsa yumuşarlar ve sıcaklık arttıkça malzemenin viskozitesi düşer. Bu malzemeler tekrar

soğutulduklarında yeniden sertleşme görülür. Sıcaklık etkisine bağlı bu yumuşama, sertleşme durumu buharlaşma ile malzemenin bileşimleri değişmediği sürece istenildiği kadar devam edilebilir [9].

Termoplastik malzemelerin bazı avantajları vardır. Bunlardan bazıları şöyledir;

- Termoplastikler eritilebilir ve tekrar tekrar kullanılabilir.
- Termoplastikler sonsuz bir raf ömrüne sahiptir.
- Termosetlere göre termoplastikler daha basit ve daha hızlı (dakikalar içerisinde) şekillendirilebilirler.
- Termoplastik malzemeler üstün kırılma tokluğu ve yüksek süneklik özelliklerine sahiptir.

Bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar şunlardır;

- Bazı solventlere karşı düşük direnç gösterirler.
- Termoset malzemelere göre termoplastik hammaddesi daha pahalıdır.
- Üretiminde yüksek sıcaklık (300-400°C) ve basınç gerekir [19].

Termoplastik malzemelerin her birinin kendine özgü camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı vardır. Örneğin; PEEK (Poli(eter eter keton)) için T_g : 140°C , PPS (poli(fenilen)sülfit) için T_g : 90°C , PSU (polisülfon) için T_g : 190°C dir. Termoplastik malzemeler camsı geçiş sıcaklığına yaklaştıkça mekanik özelliklerinde düşüş görülmektedir. Bu nedenle malzemelerin tüm özelliklerini korumak için çalışma sıcaklığı genellikle camsı geçiş sıcaklığını aşmamalıdır [20].

Termoplastikler amorf veya yarı kristalin yapıda olabilirler. Amorf bir termoplastiğin zincirleri rastgele birbirine karışmış şekildedir. Amorf termoplastikler iyi bir uzama, tokluk ve darbe direnci gösterirler. Kristalin yapıdaki termoplastikler ise düzenli şekiller oluştururlar. Termoplastiklerde ki kristal yapı mukavemeti ve bükülmezliği sağlar [9].

Termoplastik reçineler malzemelerin eğilme ve çekme mukavemetinin artırılması için kullanılmaktadır. Bu malzemeler otomotiv sektöründe ve yüksek performanslı malzeme çözümleri için uçak sanayisinde de tercih edilmektedir [10].

Polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), teflon, naylon, poli(fenilen)sülfid (PPS), polisülfon (PSU), poli(eter eter keton) (PEEK), poli(metil)metakrilat (PMMA), polikarbonat (PC), polivinil klorür (PVC) gibi polimerler termoplastik matrisli malzemeler grubuna girmektedir [21].

1.4.1.1.2. Termoset malzemeler

Polimer matrisli kompozitlerde, en çok kullanılan matris malzemesi termoset matrisli malzemelerdir. Sıvı halde bulunan termoset reçineler ile katalizörler belirli oranda karıştırılır ve takviye malzemesiyle birleştirilerek termoset matrisli kompozit malzemeler üretilir. Böylece sıvı termoset reçine sertleşir ve sağlamlaşır. Polimerizasyon işlemi sırasında reaksiyon süreci hızlandırmak için genellikle ısı verilmesi gerekir. Bu işlemler gerçekleşirken moleküller birbirlerine kovalent bağlarla üç boyutlu bir şekilde çapraz bağlanarak uzun zincirleri oluştururlar. Termoset matrisli kompozitler, kovalent bağlarla üç boyutlu olarak bağlandıkları için rijit bir yapıları vardır [22].

Termoset matrisli malzemelerin molekülleri birbirlerine çapraz bağlı oldukları için termoplastik matrisli malzemelerden farklı olarak geri dönüşümleri yoktur. Bu malzemelerin üretiminde polimerizasyon işlemi sırasında ısı verilerek şekillendirilir. Fakat polimerizasyon işlemi sonrasında tekrar ısı verilerek yumuşatılamazlar ve eritilemezler. Termoset matrisli malzemelere ısı verilirse malzemedeki kovalent bağlar kopar ve malzeme giderek kömürleşerek yapısında geri dönüştürülemez bir değişim meydana gelir [23].

Termoset malzemelerin termoplastik malzemelere göre bazı avantajları aşağıda verilmiştir;

- İmalat sıcaklığı düşüktür.
- Kullanım sıcaklıkları yüksektir.
- Rijitliği fazladır.
- Elyafar termoset ile daha kolay ıslanır.
- Karmaşık istenilen şekiller elde edilebilir.
- Viskozitesi daha düşüktür.

Termoset malzemelerin termoplastik malzemelere göre bazı dezavantajları da vardır. Bunlar aşağıda verilmiştir;

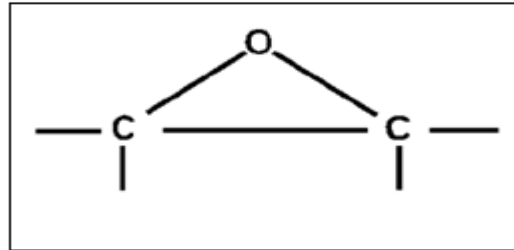
- Termoset malzemeler, termoplastik malzemelere göre daha uzun sürede şekillendirilebilirler.
- Raf ömürleri daha kısadır.
- Kurlenme süresi (1-2 saat) uzundur [19].

Termoset malzemeler havacılık, otomotiv, denizcilik gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu malzemeler, özellikle havacılık uygulamasında endüstride kullanılan kompozit matris malzemelerinin en popüleridir. Havacılık parçaları, otomobil parçaları, savunma sistemleri gibi uygulamalarda genellikle termoset matrisli malzemelerin kullanımları ağırlık kazanmaktadır. Bazı termoset matris malzemelerinin çeşitleri şunlardır; epoksi, polyester, poliamid, fenolik, vinil ester, poliüretandır.

Uçak endüstrisinde kullanılan kompozit malzemeler içinde en yaygın kullanılan matris malzemesi epoksi reçinelerdir [12].

1.4.1.1.2.1. Epoksi reçineler

Epoksi reçinesi daha öncelerde de bilinmesine rağmen ilk olarak 1930'lu yıllarda Almanya ve İsviçre'de pratik olarak uygulanmıştır. 1936 yılında epoksi ile ilgili ilk patent İsviçreli bilim adamı Dr. Pierre Castan tarafından alınmıştır. Bugünde kullanılan tabakalar ve yapışkanlar 1939 yılında Amerikalı bilim adamı Dr. S. O. Greenlee tarafından araştırılmış ve birçok epoksi sistemi geliştirilmiştir. 1940'ların sonlarında epoksi reçinelerin sınırlı sayıda üretimi başlamış ve 1950'lerin başlarında epoksi reçine yapışkanın ticari üretimi başlamıştır [24].

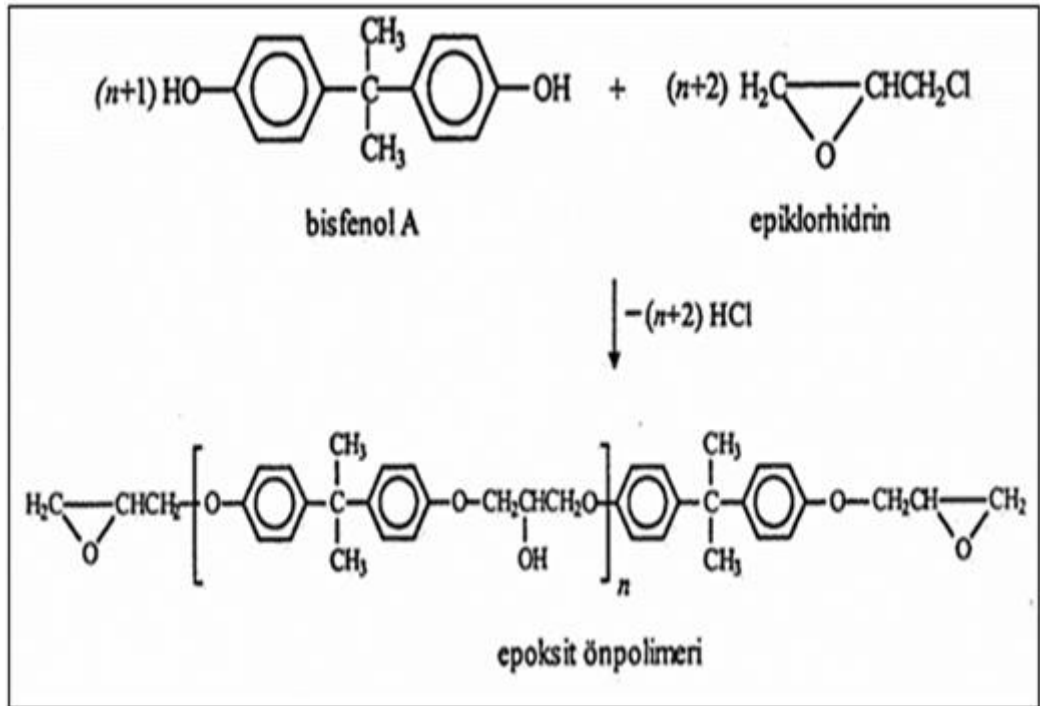


Şekil 1.5. Epoksi ailesinin genel kimyasal yapısı [25]

Epoksi reçineler, yüksek performanslı kompozit malzemeler içerisinde en yaygın olarak kullanılan matris malzemesidir. Epoksiler, şekil 1.5’de verildiği gibi bir oksijen atomunun iki karbon atomuna bağlanarak zincirde üçgen çıkıntı oluşturduğu düşük molekül ağırlıklı organik sıvı reçinelerdir [25].

İlk ticari epoksi reçinelerinden olan ve en yaygın kullanılan epoksi tipi olan Diglisidil eter bisfenol-A (DGEBA), propilenden sentezlenen epiklorhidrin ve fenollü aseton ile oluşturulan bir petrol türevi olan bisfenol-A’nın sodyum hidroksit varlığında reaksiyonuyla elde edilir [17].

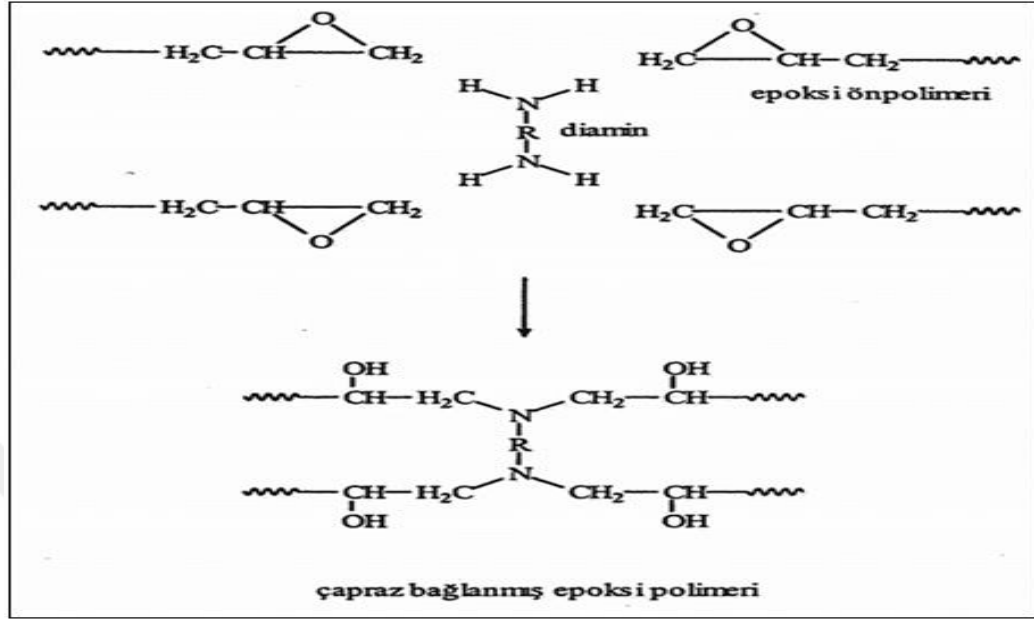
Termoset polimer yapısı iki aşamada oluşturulur. İlk aşamada fazla epiklorhidrin kullanılarak zincir sonlarında epoksit grupları bulunan düşük mol kütleli bir önpolimer hazırlanır. Bu önpolimerin hazırlanış reaksiyonu şekil 1.6’da gösterilmiştir. Önpolimerdeki yenilenen birimin (n) büyüklüğü, elde edilecek olan epoksi polimerinin özelliklerini belirler.



Şekil 1.6. DGEBA'nın oluşumu [17]

Termoset epoksi polimerinin ikinci aşamasında önpolimer, uygun bir çapraz bağlayıcı ile sertleştirilir. Epoksi önpolimer ile diamin karıştırıldığında şekil 1.7’de ki tepkimeye

uygun olarak epoksit grupları üzerinden çapraz bağlanma gerçekleşir ve polimer termoset yapıya geçer [17].



Şekil 1.7. Çapraz bağlanmış epoksi polimeri [17]

Epoksi reçinelerin avantajları;

- Kopma mukavemetleri yüksektir.
- Kurlenme sırasında düşük çekme özelliğine (genelde %1-2) sahiptirler.
- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- Elyaf yapılarla yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
- Uçucu olmamalarından dolayı kullanım kolaylığı sağlarlar.
- Boyutsal ve termal kararlılıkları iyidir.
- Kimyasal dirençleri yüksektir.
- Elektriksel özellikleri iyidir.
- Yaşken 140⁰C, kuruyken 220⁰C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dirençlidirler.
- Korozif sıvılara ve ortamlara dayanıklıdır [12]

Dezavantajları;

- Bismaleimid reçineler hariç diğer termoset reçinelerden daha pahalıdır.
- Epoksi reçinelerin viskozitesi polyester reçinelerin viskozitesinden daha yüksektir [12].

Epoksi malzemelerin kullanılmasında en çok karşılaşılan sorun kırılgen olmalarıdır. Fakat cam, karbon, aramid elyaflar gibi çeşitli elyaf takviye malzemeleriyle daha esnek epoksi malzemesi üretmek mümkündür. Epoksiler pahalı olmasına rağmen yüksek performans özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Epoksi reçineler tüm elyaf malzemelerinde kullanılabilmesi ve çok fazla avantajları olması nedeniyle birçok alanda kullanılabilir. Genellikle havacılık, denizcilik, otomotiv, elektrik/elektronik, sektörleri gibi birçok alanda epoksi matrisli malzemeler kullanılmaktadır. Epoksi reçineler genellikle karbon fiberler ile birlikte kullanılmaktadır [3].

1.4.2. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler

Takviye elemanları kompozit yapılara rijitlik, dayanım gibi birçok mekanik özellikleri sağlarlar. Bunlar kompozit yapılara uygulanan gerilmelerin büyük bir kısmını taşıyan elemanlardır. Bu takviye elemanları kompozitlerin aşınma dayanımı, yanmazlık, termal özellikler gibi bazı fiziksel özelliklerinin de geliştirilmesine imkan verirler. Takviye elemanlarında düşük yoğunluk, yüksek mekanik özellikler, reçine ile iyi uyumluluk, düşük maliyet, üretim kolaylığı gibi özellikler aranmaktadır [26].

Takviye elemanı türleri; fiberler (elyaflar), parçacıklar ve kılcal kristaller (whiskers) şeklinde sınıflandırılmaktadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan parçacıklar, yönlendirmezler ve diğerlerine göre daha ucuzdurlar. Bu nedenle, genellikle maliyeti azaltmak için kullanılırlar. Kılcal kristaller, ince tek kristal yapıya sahiptirler ve matris içinde homojen dağılımları zordur. Bu takviye malzemesi diğerlerine göre çok pahalıdır. Fiber takviye elemanları hem doğal hem de sentetik yapılarda bulunurlar. Bunların ise dayanımı ve bükülmezliği yüksektir [3].

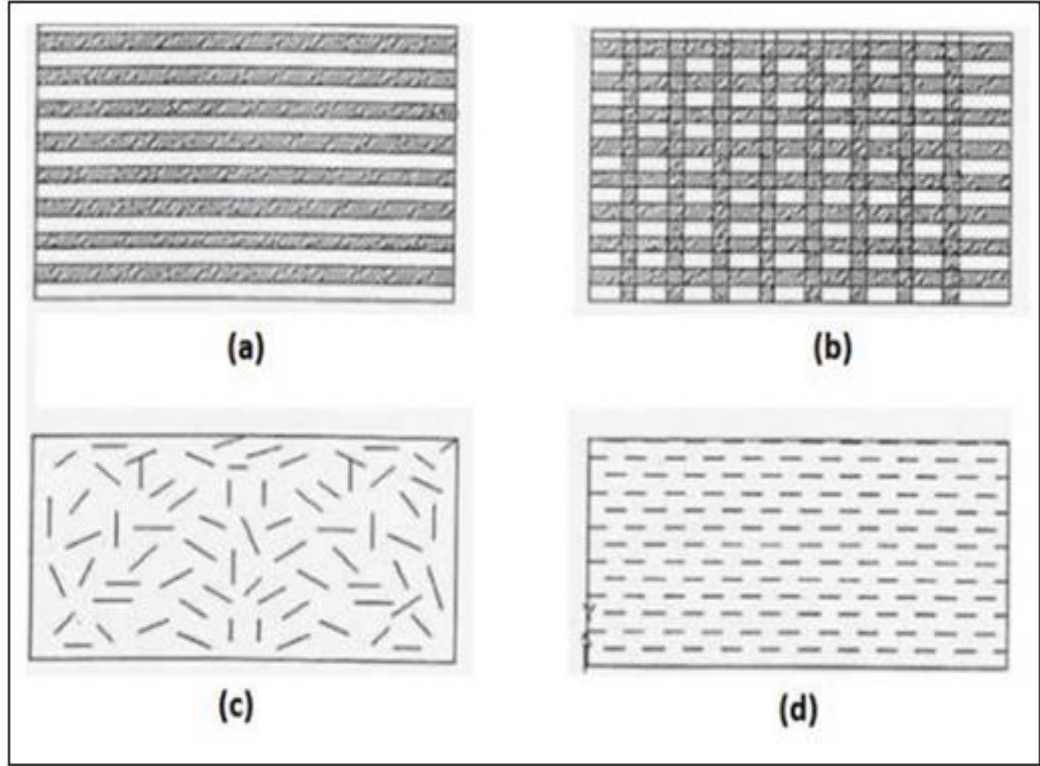
1.4.2.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler

Düzgün kesitli, çapı ortalama 0,01 mm değerinde ve uzunluk/çap (L/D) oranı 100 veya daha fazla olan yapılar “fiber” olarak adlandırılır. Fiberlerin uzunluk/çap oranı arttıkça matris aracılığı ile fiberlere iletilen yük artmaktadır. Fiber yapının kusursuz olması mukavemet bakımından çok önemlidir. Kompozit yapının içindeki fiber miktarı arttıkça kompozitin mekanik dayanımı da artar fakat fiber oranı belli bir

seviyeye ulaştıktan sonra dayanım da azalmaya başlar. Bu yüzden kompozit yapının mukavemeti açısından içerisinde bulunan fiberlerin mukavemeti çok önemlidir [27].

Fiberler takviye elemanı olarak en çok tercih edilen formlardan biridir. Fiberlerin düşük yoğunluk, iyi yorulma davranışı, yüksek çekme modül, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci gibi avantajları vardır. Fiberlerin bu özelliklerinden dolayı fiber kompozit yapılar ev eşyaları, inşaat sektörü, uzay ve havacılık alanları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [28].

Kompozitlerin takviye edilmesinde boyutsal ve şekilsel özellikleri çok farklı olan fiberler kullanılmaktadır. Bunlar sürekli ve süreksiz fiberler olarak aşağıdaki şekil 1.8'de gösterildiği gibidir;



Şekil 1.8. Değişik tipte fiber takviyeli kompozitler a) Tek yönlü sürekli fiber takviyeli kompozit, b) Çapraz bağlı sürekli fiber takviyeli kompozit, c) Rastgele yönlü kısa fiber takviyeli kompozit, d) Yönlendirilmiş kısa fiber takviyeli kompozit [29]

Kompozit yapılarda takviye türlerine göre fiberlerin cam, karbon, aramid başta olmak üzere baron, polyester, naylon, polietilen gibi birçok çeşidi vardır. Tablo 1.1'de kısaca gösterilmektedir [10].

Tablo 1.1. Takviye türlerinin karşılaştırılması [10]

Takviye Türleri	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Özellikler
Cam	3000-5000	72-82	2.48-2.60	Yüksek mukavemet, İyi kaplama özellikleri, Düşük maliyet
Karbon	2500-3000	200-700	1.75-1.96	Yüksek modül, Elektriksel iletkenlik, Yüksek maliyet
Aramid	2750-3000	82-124	1.44	İyi spesifik özellikler, Orta maliyet
Baron	3500	400	2.55	Yüksek modül, Yüksek maliyet
Polyester	1000	9	1.38	İyi darbe dayanımı ve kimyasal özellikler
Naylon	950	5	1.16	İyi darbe dayanımı ve alkali dayanımı
Polietilen	1200-1500	40-60	0.97	Düşük yoğunluk, İyi darbe dayanımı

Günümüzde en çok kullanılan takviye elemanı cam elyaf olmasına rağmen gelişmiş kompozit malzemelerde genellikle saf karbonun elyafı kullanılmaktadır. Karbon fiberler cam fiberlere göre daha yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Aramid (Kevlar) fiberler yüksek tokluk, yüksek modül ve termal kararlılığın eşsiz bir kombinasyonu ile hafif ve esnektir [7].

1.4.2.1.1. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler

İlk karbon malzemesi, çok eskiden beri kullanılan odun kömürü olabilir. 1800'lü yıllarda piller için elektrotlarda karbon malzemesi kullanılmaya başlandı. Karbon malzemelerinin geliştirilmesi 1960 yılından önce, 1960 ile 1985 yılları arası ve 1985 yılından sonrası olmak üzere üç döneme ayrılarak incelenmiştir. 1960 yılına kadar, yapay grafit bloklar, aktif karbonlar, karbon siyahı ve doğal elmas olmak üzere dört çeşit karbon malzemesi biliniyordu. 1960 yılında, üretim süreçlerinde ve özelliklerinde klasik karbonlardan tamamen farklı olan karbon fiber, cam benzeri karbon ve pirolitik karbonlar olmak üzere üç karbon malzemesi geliştirildi. 1960 ile 1985 yılları arasında

yüksek yoğunluklu izotropik grafitler, sentetik elmas, elmas benzeri karbonlar ve çeşitli kompozitler geliştirildi. 1985 yılı ve sonrasında karbon nanotüpler ve grafen geliştirildi [30].

Karbon fiber kompozitlere yönelik uygulamalar 1960 yılından bugüne kadar büyük ölçüde genişlemiş ve alüminyumun yanı sıra en çok kullanılan uçak yapı malzemesi haline gelmiştir. Karbon (grafit) fiberler, jet motor parçaları ve uçak yapıları için polimer (genellikle epoksi reçine) matrisli kompozitlerde kullanılan çok rijit, güçlü ve hafif malzemelerdir. Karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler, yumuşak çelikten 5 kat daha güçlü ve daha hafiftir. Karbon fiber takviyeli kompozitler neredeyse tüm metallerden daha iyi yorulma özelliklerine ve korozyon direncine sahiptir [22].

Karbon fiberler kristal yapıda ve genellikle $2,0 \text{ g/cm}^3$ 'den az yoğunlukta olan malzemelerdir. Düşük yoğunlukta olmalarına rağmen çok iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Tablo 1.2'de karbon fiber ile e-cam fiberin karşılaştırılması verilmiştir [26].

Tablo 1.2. Karbon fiber ile e-camı fiberin karşılaştırılması [26]

Özellik	E-Camı	Karbon	Y.M * Karbon	Ç.Y.M ** Karbon	Y.M Karbon (zift)
Yoğunluk ρ (g/cm^3)	2,6	1,75	1,81	1,95	2,0
Çap (μm)	10-20	5-7	5-7	5-7	12
Çekme Modülü E (GPa)	73	230	400	600	280
Spesifik Modül E/ ρ (MN m/kg)	28	130	210	310	140
Çekme Dayanımı σ_{fu} (MPa)	3400	3000-4000	2800	2000	2000-2400
Spesifik Dayanım σ_{fu}/ρ (KN m/kg)	1,30	1,71-2,29	1,55	1,03	1,00-1,20
E camına göre maliyet	1	10-15	30-50	200-400	50-100

*Y.M: Yüksek Modüllü **Ç.Y.M: Çok Yüksek Modüllü

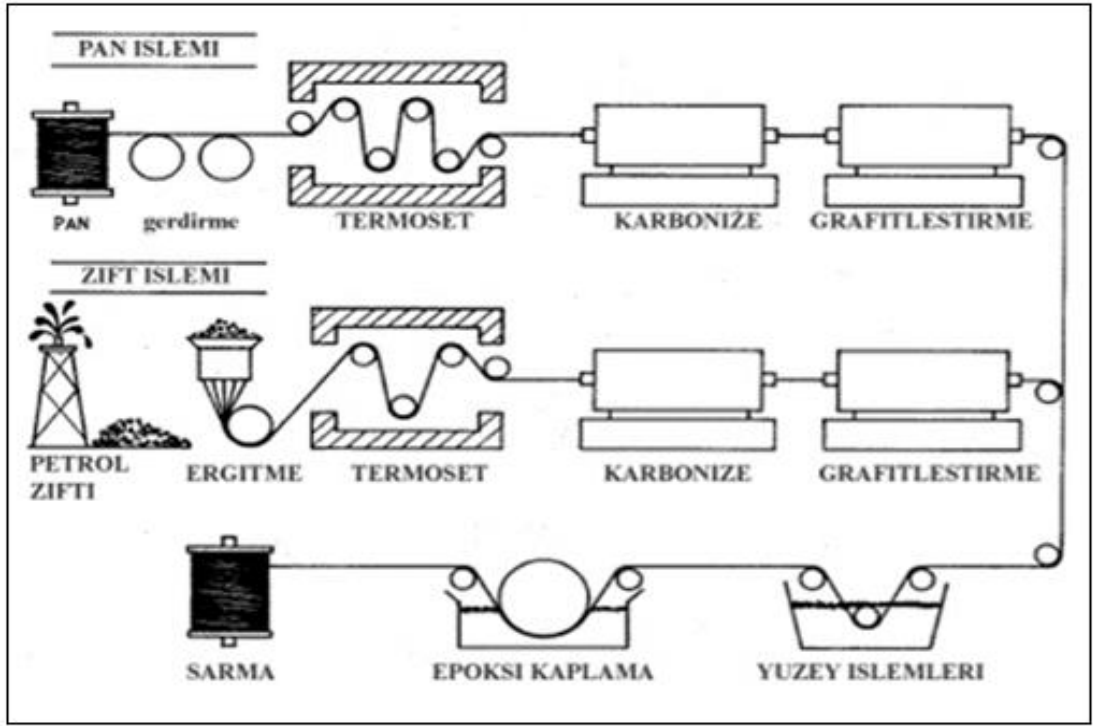
Karbon fiber üretiminde ham madde olarak en yaygın poliakrilonitril (PAN), rayon (selüloz) ve zift kullanılır. Günümüzde ticari olarak satılan karbon elyafın büyük bir çoğunluğu PAN temellidir. Çünkü PAN temelli karbon elyaf, zift ve rayondan üretilen karbon elyafa kıyasla daha yüksek mekanik özelliklere (yüksek dayanım ve çekme modülü) sahiptir. Havacılık uygulamaları için üretilen karbon fiberler, organik bir polimer olan PAN kullanılarak yapılır. Daha düşük mekanik performansları nedeniyle karbon fiberlerin üretiminde nadiren kullanılan zift ve rayon gibi malzemeler, spor ekipmanları, sivil altyapı ve deniz araçları gibi havacılık dışı uygulamalar için kullanılmaktadır.

Karbon elyafın üretilmesinden önce, PAN malzemesi uzun ve ince filamentlere gerdirilir. PAN malzemesi, gerilim altındayken çok aşamalı termoset işlemlerle 400°C nin üzerine ısıtılır. İlk aşama olarak oksidasyon işlemi gerçekleştirilir. Bu aşama da elyaflar hava ortamında 200-300°C ye kadar ısıtılır. Bu işlem ile fiberlerin yapısındaki hidrojen ayrılarak daha uçucu olan oksijen eklenir. Daha sonra karbonizasyon aşamasına hazırlık amacı ile fiberler kesilerek grafit teknelere konur.

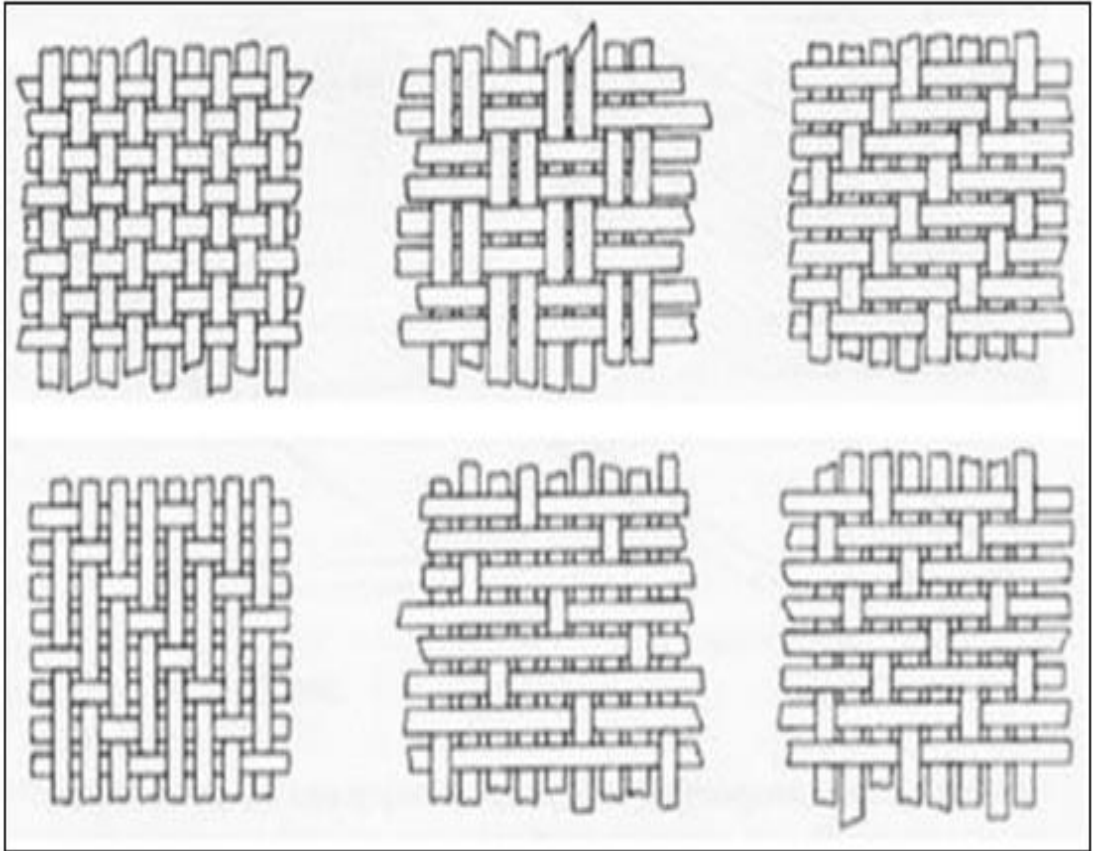
Karbon fiberlerin üretiminde 2. aşama olarak karbonizasyon işlemi uygulanır. Bu kısımda PAN malzemesi yanıcı olmayan atmosfere (örneğin, argon gazı gibi) sahip bir fırında 1500-2000°C pirolize edilir. Bu ısıl işlem karbonizasyon olarak adlandırılır. Çünkü PAN moleküllerinden karbon olmayan atomlar (örneğin, N,O,H,CH ve su) çıkarılarak %93-95 saflık derecesine sahip karbonca zengin fiber elde edilir.

Son ısıl işlemden sonra karbonun yüzeyi temizlenir ve fiberin kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır. Son aşama olarak fiberler reçine ile kaplanır. Bu kaplama işlemi için genellikle epoksi reçine kullanılır. Çünkü karbon fiberler epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve rijitlik özellikleri gösterirler [22].

Tasarım aşamasında elyafların reçine içindeki yerleşimlerini ve geometrilerini göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Malzemenin dayanımını artırmak ve tüm yönlerde eşit mukavemet elde etmek için bazı durumlarda elyaflar kumaş olarak dokunurlar [31].



Şekil 1.9. PAN ve zift proseslerinin gösterimi [22]



Şekil 1.10. Elyaf dokuma türleri [31]

1.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerden yapılan Boeing 757 ve 767 jetleri ilk büyük ticari uçaktır. Boeing 757 ve 767 jetlerinin kabinlerindeki görünür iç parçaların yaklaşık %95'i alışılmış malzemelerden yapılmıştır. Boeing 787 jetinin gövdesinin büyük bir kısmı karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeden oluşurken, Airbus 380'in büyük bir kısmında ise cam fiber takviyeli kompozitler kullanılır. Bu malzemelerin kullanılmaya başlanmasındaki ana sebeplerden bazıları karbon fiberlerin hafifliği ve maliyet fiyatlarının düşmesidir. Benzer şekilde, savunma sanayisinde kullanılan helikopterler de dahil olmak üzere, uçaklarda kullanılan kompozit yapıların kullanımı artmıştır. Örneğin, Sikorsky H-69 helikopterinin gövdesinde metal yapılar kullanılmakta fakat bunun içinde çok yoğun işçilik gerekmektedir. Buna karşılık gövdenin yapımında karbon, aramid ve cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeler daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca polimer matrisli kompozitler, gövdelerin üretiminde metallerden daha hafiftir ve maliyeti daha ucuzdur. Bu kompozitler hafiflik özelliklerinden dolayı uçaklarda enerji tasarrufu sağlarlar [6]. Cam fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler havacılık ve savunma uygulamalarında, insansız hava aracının (İHA), roketatarların, uçak gaz türbini fan kanatlarının, uzay aracının, uydu antenlerinin, mayın avcısı gemilerin ve balistik zırhların üretiminde kullanılmaktadır. Bor fiber takviyeli polimer kompozitler de havacılık ve savunma sanayisinde tercih edilir. Uçuş uygulamasında ilk gelişmiş kompozit olarak F-14 yatay dengeleyicide bor fiber takviyeli epoksi kompozit malzeme kullanılmıştır [15].

Aramid, karbon ve cam elyaf takviyeli polimer kompozitler inşaat sektöründe, denizcilik sektöründe ve spor ürünlerinde daima kullanılmaktadır. Spor malzemeleri endüstrisindeki uygulamalar, kayak, bot, eldiven, kayak direkleri ve tenis raketlerinden olta kamışına kadar birçok çeşitli ekipmanlardan oluşmaktadır. Kompozitlerin spor malzemeleri endüstrisinde kullanılmasının başlıca amacı, diğer malzemelere göre daha güvenli, daha hafif ve daha dayanıklı olmasıdır.

Polimer kompozit malzemelerden yapılan kayak direkleri, alüminyum direklere göre daha hafif ve rijittir [6].

Otomotiv endüstrisinde, diğer kompozit tiplerine göre polimer matrisli kompozitler maliyet avantajından dolayı daha çok tercih edilmektedir. Otomotiv alanında dizel motor piston kafası üretiminde metal matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Al-Si döküm alaşımından olan dizel motor pistonunun kafası nikel dökme demirden üretilmekteydi. Alüminyum matrisli kompozit malzemeler hafif, aşınmaya dayanıklı ve üretim maliyetinin düşük olmasından dolayı giderek nikel dökme demirin yerini almaktadır. Honda Prelude aracının motorunda metal matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Ayrıca Honda Motor Company alümina ve karbon fiber takviyeli alüminyumdan imal edilmiş silindir gömleği ile bir alüminyum motor geliştirdi. Bakır bazlı kompozitler yüksek termal iletkenlik ve yüksek mukavemet gerektiren bazı uygulamalarda kullanılmaktadır [6].

Cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin endüstriyel uygulamalarındaki kullanımlarından bazıları; gaz türbini kanatları, x-ışını ekipmanları, robotlar ve diğer makine bileşenleri, enerji depolama volanları, yakıt hücreleri, basınçlı hava tankları, tren yapıları ve iç mekanlarıdır. Ayrıca kayak, bisiklet, hokey sopaları, ok ve yaylar, olta takımları, tenis raketleri gibi spor ekipmanları, müzik enstrümanları, mobilya, dizüstü bilgisayar kasaları, otomobil alanında yapı bileşenleri ve tahrik milleri üretiminde yine cam fiber takviyeli polimer kompozitler kullanılmaktadır [15].

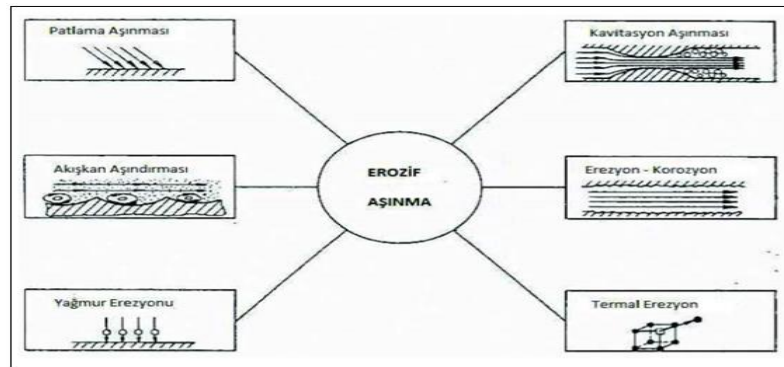
2. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Aşınma, katı bir malzemenin yüzeyinden istenmeyen şekilde meydana gelen kademeli malzeme kaybıdır [32]. Aşınma olayını belirleyen bazı şartlar ve kriterler vardır. Mühendislik malzemelerinde meydana gelen bazı olayların aşınma sayılabilmesi için aşağıda belirtilen koşulları sağlaması gerekir [33].

- Mekanik bir etki olmalı
- Sürtünme olmalı (izafi hareket)
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana gelmeli
- İstenmediği halde meydana gelmeli
- Yavaş fakat devamlı olmalı [33].

1960'lı yıllarda endüstriyel ülkelerde aşınma araştırmasına yönelik sistematik çalışmalar başlatılmıştır. Aşınma üzerine bilimsel olarak yoğun bir şekilde çalışılsa da yirmi birinci yüzyılda endüstriyel uygulamalarda hala aşınma problemleri vardır [34].

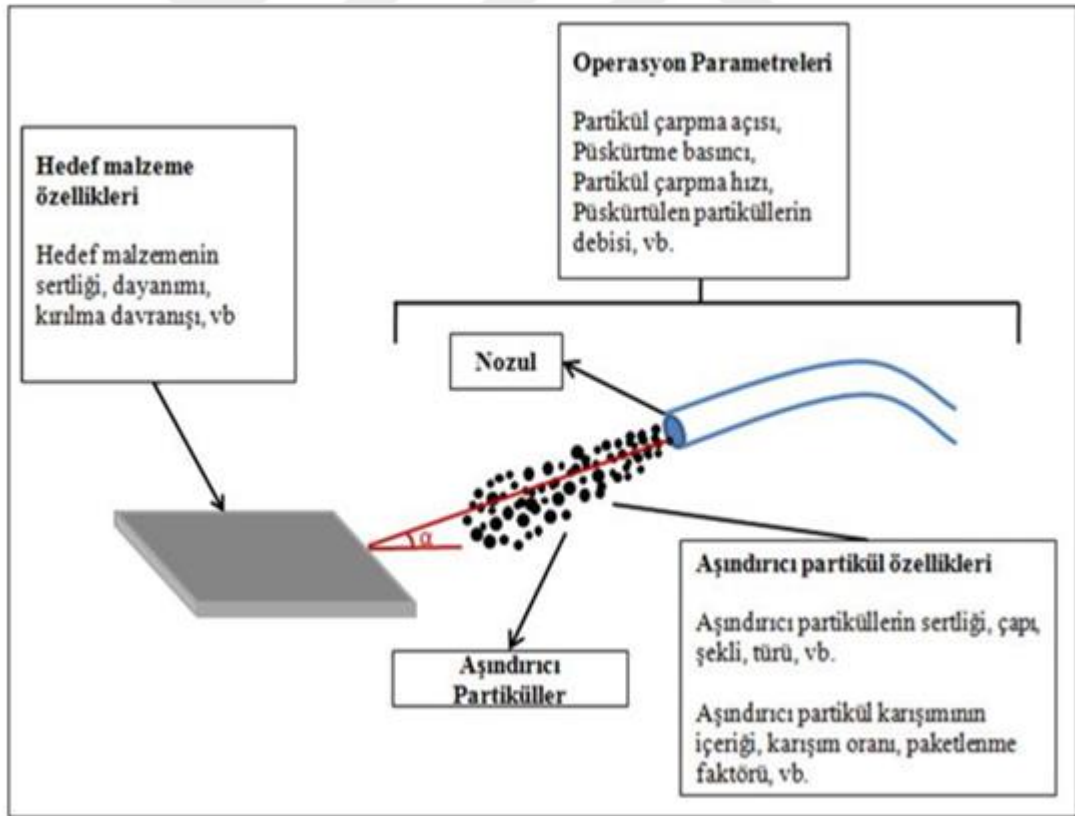
Erozif aşınma, katı, sıvı veya gaz maddelerin katı bir malzemenin yüzeyine çarparak yüzeyden malzemenin kaldırılması olayıdır. Eroziyon aşınma şekil 2.1'de görüldüğü üzere çeşitli biçimlerde oluşur [33]. Bazı uygulamalarda bu aşınma türü ile karşılaşmaktadır. Örneğin, uçak yağmur bulutları arasından geçerken gaz türbini motorlarında, elektrik kontaklarında, boru hatlarında gibi birçok uygulamada bu aşınma şekli karşımıza çıkmaktadır [35].



Şekil 2.1. Eroziyon aşınma şekilleri [33]

Tipik bir aşınma şekli olan katı partikül erozyonu, küçük ve katı partiküllerin malzeme yüzeyine çarparak tekrarlı darbeleri sonucu malzeme kaybı meydana getirmesidir. Katı partikül erozyonu, su jeti kesimi, makine elemanlarının temizliği, tarihi eserlerin restorasyonu gibi durumlarda faydalıdır. Fakat buhar ve jet türbinleri, boru hatları, valfler ve akışkan yataklı yakma sistemleri gibi birçok mühendislik uygulamalarında ciddi problemler oluşturmaktadır.

Günümüzde polimerler ve kompozit malzemeler, mühendislik sistemlerinde yapısal malzemeler olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar metaller ile karşılaştırıldığında, tasarım ve şekillendirilmede işleme kolaylığı gibi faydalar sağlarlar. Polimer kompozit malzemeler, helikopter rotor kanatları, pompaların pervane kanatları, yüksek hızlı araçlar ve uçaklar, su türbinleri, uçak motor kanatları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar genellikle tozlu ortamlarda çalışırlar ve bu yüzden katı partikül erozyonuna maruz kalırlar [34].



Şekil 2.2. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler [36]

Katı partikül erozyonu esnasında meydana gelen değişimler birçok faktöre bağlıdır. Katı partikül erozyonuna etki eden en önemli parametreler, aşındırıcı partiküllerin hızı,

çarpma açısı, debisi ve boyutu, aşınan malzemelerin özellikleri ve aşındırıcı partiküllerin karışım oranıdır. Yukarıdaki şekil 2.2’de katı partikül erozyonuna etki eden parametreler şematik olarak verilmiştir [36].

Bu bölümde malzemelerin katı partikül erozyonu davranışını etkileyen önemli parametrelerden kısaca bahsedilecektir. Bir sonraki bölümde ise literatürde karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin katı partikül erozyonu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar verilecektir.

2.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı

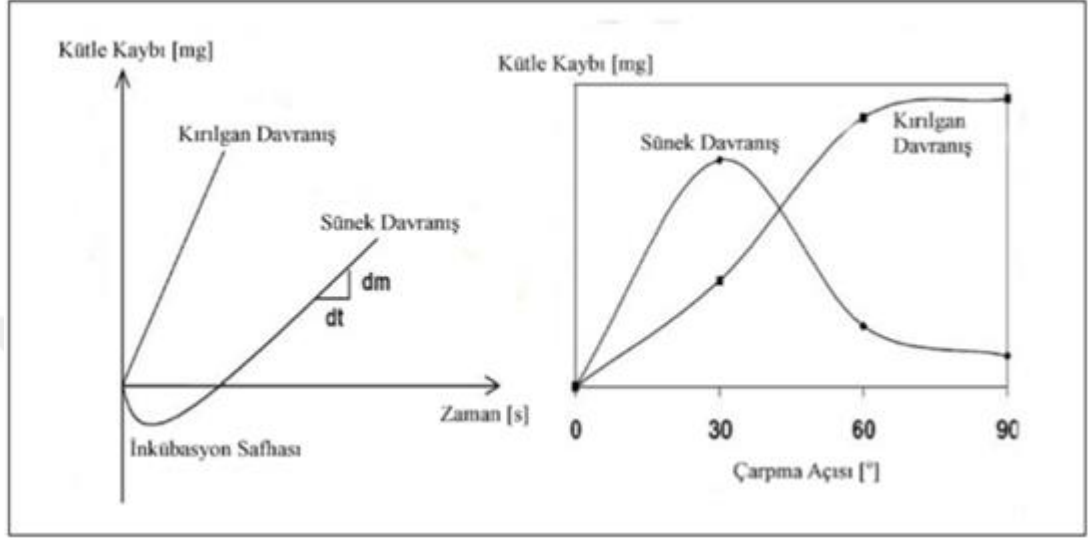
Katı partikül erozyonu davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biri aşındırıcı partiküllerin çarpma açısıdır. Partikül çarpma açısına bağlı olarak, katı partikül erozyonu iki kategoride incelenebilir;

- Dik çarpma açılarındaki erozyon ($a \approx 90^0$)
- Eğik çarpma açılarındaki erozyon ($0^0 < a < 90^0$)

Partikül erozyonu, düşük çarpma açılarındaki abrazyona benzer bir mekanizmaya sahiptir. Çünkü partiküller etkileşim süresince malzeme yüzeyi boyunca bir yol izlerler. Yüksek çarpma açılarındaki ise, aşınma mekanizması tipik katı partikül erozyonu şeklindedir.

Partiküllerin çarpma açısındaki ve zamanındaki değişiklik göz önüne alındığında, erozif aşınmaya göre çeşitli malzemelerin sınıflandırılmasında büyük farklar vardır. Şekil 2.3’de zamanın ve partikül çarpma açısının tipik erozyon diyagramları gösterilmektedir. Erozyon mekanizmaları sünek ve kırılmalı davranış gösteren malzemeler olmak üzere iki şekilde kategorize edilmektedir. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi sünek malzemelerde maksimum malzeme kaybının düşük çarpma açılarındaki ($\sim 30^0$) ortaya çıkarken, kırılmalı malzemelerde en fazla malzeme kaybının yüksek çarpma açılarındaki ortaya çıktığı görülmektedir. Aşındırıcı partikül çarpma açısının malzeme kaybına göre değişimi incelendiğinde, sünek davranış gösteren malzemelerde aşınma zamanla doğrusal hale gelmeden önce hedef malzeme ağırlığının arttığı gelişim safhasının (inkübasyon periyodu) varlığı söz konusu olabilmektedir. Bu inkübasyon safhası aşındırıcı partiküllerin sünek hedef malzemeye

gömülmesiyle ortaya çıkar. Aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyinden ayrılmasından sonra kararlı erozyon davranışı gözlemlenir. Çarpma enerjisindeki kaybın büyük bir kısmı hedef malzeme yüzeyini pürüzlendirme esnasında ortaya çıkar [37].



Şekil 2.3. Sünek/kırılgen malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [37]

Sonuç olarak erozyon aşınmasındaki kütle kaybının çarpma açısına bağlı diyagramı incelendiğinde sünek ve kırılgen malzemelerin farklı özellikler gösterdiği gözlemlenir. Sünek malzemeler düşük çarpma açılarında (15° – 30°) maksimum erozyon gösterirler iken kırılgen malzemeler maksimum erozyon davranışını normal çarpma açılarında (90°) gösterirler. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, maksimum erozyonun 45° – 60° çarpma açıları arasında ortaya çıktığı yarı-sünek davranış gösterirler [36].

2.2. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı

Hedef malzeme yüzeye çarptığında aşındırıcı partiküllerin hızı aşınma süreci üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir. Eğer partikül çarpma hızı çok düşük ise, çarpma anındaki gerilmeler plastik deformasyon oluşumu için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder. Partikül çarpma hızı arttığında, aşınan malzeme partikülün çarpmasına bağlı olarak plastik deformasyona uğrayabilir. Bu sistemde, tekrarlanan plastik deformasyonla aşınma meydana gelir. Kırılgen malzemelerin aşınma davranışında, alt yüzey kırılması şeklinde aşınma meydana gelir. Çok yüksek partikül

çarpma hızlarında, darbeye maruz kalan yüzeyde lokal ergime bile meydana gelebilir [38].

2.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debisi

Partikül akış debisi, birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı partikül kütlesi olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca aşındırıcı partiküllerin kütlesel debisi erozyon aşınmasını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Teorik olarak, kullanılan tüm aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye eşit çarpma açısı ve hızda çarptıkları kabul edildiğinden aşındırıcı partiküllerin kütlesel debisinin aşınma miktarı üzerinde etkisi olmamalıdır. Ancak pratikte, ölçülen aşınma oranı üzerinde aşındırıcı partiküllerin kütlesel debisinin önemli etkileri vardır.

Aşındırıcı partiküllerin akış debisi farklı mekanizmalar da oluşabilir ve erozyon aşınmasını etkileyebilir. Süreç, her çarpmadan sonra oluşan bir geçici reaksiyonlar dizisi olarak değerlendirilebilir. Akış debisi arttığında, malzemenin ilgili yüzeyindeki çarpmalar arası zaman azalır. Bundan dolayı bir sonraki çarpmadan önce bozulma reaksiyonu için daha az zaman kalmış olacaktır ve böylece bozulmanın derecesi ve ona bağlı olarak da erozyon aşınması miktarı düşecektir [39].

2.4. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu

Malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküllerin boyutları erozyon aşınmasını etkileyen önemli bir parametredir. Aşınma mekanizmasının aşındırıcı partikül boyutlarına bağlı olarak gösterdiği değişim incelendiğinde; küçük partikül boyutlarındaki aşındırıcıların hedef malzemede hasarın mikro kesme mekanizması ile gerçekleştiği ve hedef malzemeye zarar vermek için yeterli kinetik enerjiye sahip olmamalarından dolayı aşınma oranının düşük olduğu görülmüştür [40]. Büyük partikül boyutlarındaki aşındırıcıların ise hedef malzemede mikro çatlama ve mikro kırılma hasar mekanizmaları meydana getirdiği ve yüksek kinetik enerjiye sahip olmalarından dolayı malzemede çatlak oluşumuna yol açarak malzeme yüzeyinden büyük parçalar kopardığı ve yüksek aşınma oranlarına neden olduğu görülmüştür [41].

Eğik açılı ile yönlendirilen aşındırıcı partikül erozyonunda gevrek malzemelerin yüzeylerinde radyal çatlaklar oluşmaktadır. Malzemelerde radyal çatlak oluşumu

aşınmayı hızlandırır ve malzeme kaybını arttırır. Aşındırıcı partikül boyutlarının arttırılması ile malzeme yüzeyinde daha derin radyal çatlakların oluştuğu ve aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir [42].

2.5. Aşınan Malzeme Özellikleri

Katı partikül erozyonunda hedef malzemenin kırılma davranışı, aşınma esnasında görülen etkin aşınma mekanizmasını belirleyen önemli bir etkidir. Malzemelerin erozyon davranışlarındaki farklılıklar, kauçuklar için yırtılma ve mikro-yorulma; sünek metaller ve polimerler için mikro-kesme ve mikro-sürme; seramikler, camlar ve gevrek polimerler için mikro-çatlama ve gevrek kırılma gibi çeşitli malzeme aşınma mekanizmaları şeklinde ortaya çıkmaktadır [43].

Abrazif aşınmada olduğu gibi, erozif aşınmada da malzemelerin aşınmasına ve işlem parametrelerine bağlı olarak plastik deformasyon ve/veya gevrek kırılma meydana gelir. Sünek malzemeler, mikro-sürme ve mikro-kesme aşınma mekanizmalarından dolayı plastik deformasyona maruz kalmaktadır. Üst kısımda da bahsedildiği gibi gevrek malzemeler mikro-çatlama aşınma mekanizmasına maruz kalmaktadır ve burada oluşan çatlamanın derecesi ve şiddeti, aşındırıcı partiküllerin şekline göre değişmektedir. Keskin aşındırıcı partiküller, yuvarlak aşındırıcı partiküllere göre daha çok bölgesel deformasyonlara ve aşınmaya yol açmaktadır [44].

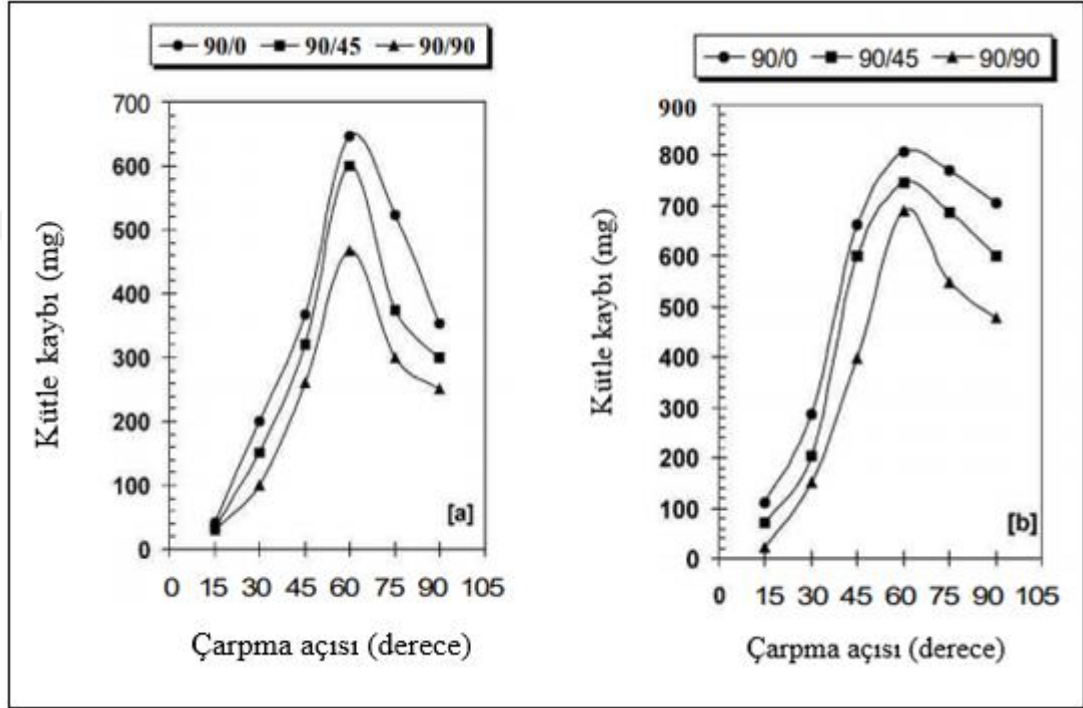
3. KARBON FİBER TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMENİN EROZYON DAVRANIŞININ LİTERATÜR ÇALIŞMALARINDAN ÖRNEKLER

Literatürde, polimer esaslı kompozit malzemelerin katı partikül erozyonu davranışının incelenmesine yönelik yapılan deneylerde araştırmacılar kompozit malzeme olarak genellikle aramid kumaş takviyeli epoksi, cam kumaş takviyeli epoksi, MoS₂ dolgu maddesi içeren karbon fiber takviyeli epoksi v.b. gibi kompozit malzemeleri kullanmışlardır. Bu çalışmalarında çoğu araştırmacılar aşındırıcı malzemesi olarak silis kumu ve çelik bilya kullanmışlardır. Yapılan literatür araştırmasında karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin katı partikül erozyonu davranışına yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak aşındırıcı malzemesi olarak alüminyum oksit kullanılmış ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin katı partikül erozyonu deneylerinde aşındırıcı partikül boyutunun, partikül çarpma açısının ve fiber yönlenmesinin erozyon oranına etkisi incelenmiştir.

Tewari ve arkadaşları, tek yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin katı partikül erozyon davranışlarını karakterize etmişlerdir. Numunelerin camsı geçiş sıcaklığını N₂ atmosferinde, 10 °C/dakikalık bir ısıtma hızında diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı kullanarak hesaplamışlardır. 1 kilogramlık yük altında Vickers sertlik testine tabi tutarak kompozitlerin rijitliklerini belirlemişlerdir. Bu kompozitlerin erozif aşınmasını farklı çarpma açılarında (15⁰-90⁰) ve üç farklı fiber yönelimlerinde (0⁰, 45⁰ ve 90⁰) değerlendirmişlerdir. Erozif aşınma testi sonucunda fiber yönlenmesinin, partikül çarpma açısına göre değişimi şekil 3.1'de gösterilmiştir [43].

Aşınmış yüzeylerin morfolojisini taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, her iki kompozit malzemeninde 60°'lik çarpma açısında maksimum aşınmaya sahip olduklarını ve yarı sünek aşınma davranışı gösterdiklerini incelemişlerdir.

Katı partikül erozyon testinde kullanılan 300-500 µm çaplı çelik bilyalar, fiberlere paralel yönde etki ettiklerinde erozyonun daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bu nedenle kompozitlerdeki fiber yönlenmesinin erozif aşınma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Cam fiber takviyeli epoksi kompozitin erozif aşınmasının karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitten daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [43].



Şekil 3.1. Fiber yönlenmesinin, partikül çarpma açısına olan etkisi a) karbon fiber takviyeli epoksi kompozit b) cam fiber takviyeli epoksi kompozit (çarpma hızı: 45 ±5 m/s, çelik bilyaların çapı: 300-500 µm, püskürtme süresi: 180 s) [43]

Çelik ve Kılıçkap'ın yaptıkları çalışmada, cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit çubukların aşınma davranışlarını ağırlık kaybına bağlı olarak incelemişlerdir. Aşınma kayıplarını belirlemek için aşınma test deney düzeneği hazırlamışlardır. Deney sonucunda malzemelerde oluşan aşınma bölgelerini optik mikroskopla incelemişlerdir. Sonuç olarak, hem yükün hem de kayma mesafesinin ağırlık kaybının artmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Karbon elyaf takviyeli malzemede meydana gelen ağırlık kaybının cam elyaf takviyeli malzemede meydana gelen ağırlık kaybından daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelere göre oldukça fazla aşınmış olduğunu gözlemlemişlerdir [45].

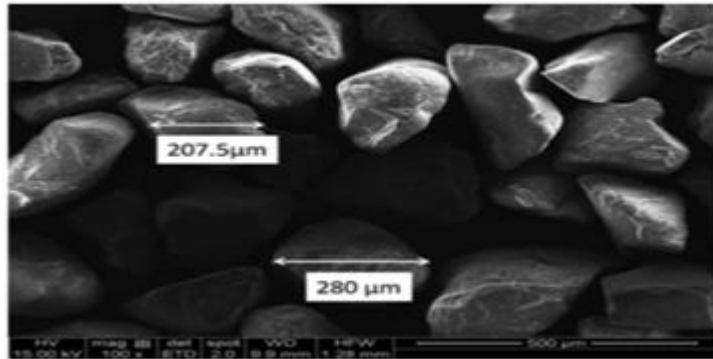
Zhang ve arkadaşları, karbon fiber dokuma kumaş (ağırlıkça% 52) takviyeli epoksi kompozit ve karbon fiber epoksi kompozitin yüzeyine karbon nanofiber (ağırlıkça% 12) kağıt kaplanmış olan malzemelerin erozyon davranışlarını incelemiştir. Bu malzemelerin erozyon davranışını yaklaşık olarak 150 µm olan silika parçacıkları kullanarak katı partikül erozyon testi ile incelemiştir. Aşınmış yüzeylerin morfolojisini taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak incelemiştir. Sonuç olarak, karbon fiber epoksi kompozitin yüzeyine karbon nanofiber kağıdı kaplı olan malzeme, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlere kıyasla çok daha güçlü bir aşınma direnci sağladığını tespit etmişlerdir [46].

Rao ve arkadaşları yaptığı çalışmada, grafit partikül dolgulu karbon kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin ve grafit partiküller ile doldurulmamış olan malzemelerin katı partikül erozyon davranışlarını incelemiştir. Bu kompozitlerin aşınma davranışını farklı çarpma açılarında ve aşındırıcı olarak silika kum partikülleri kullanarak değerlendirmişlerdir. Dolgu içeriğinin ve çarpma açısının karbon epoksi kompozit erozyon oranı üzerindeki etkisini incelemiştir. Aşınmış yüzeylerin morfolojisini, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak incelemiştir. Grafit dolgusuz ve grafit dolgulu karbon epoksi kompozitlerin, 45°'lik çarpma açısında maksimum aşınma oranına sahip oldukları ve yarı sünek aşınma davranışı sergiledikleri sonucuna varmışlardır. Grafit ile doldurulmamış kompozitler, grafit dolgulu karbon epoksi kompozit malzemelere kıyasla daha iyi aşınma direnci sergiledikleri gözlemlenmiştir. Eroziyon aşınma kütle kaybı % 0 ila % 4 grafit dolgulu kompozitlerde artmış; % 6 grafit dolgulu kompozit malzemelerde azaldığını gözlemlemişlerdir [47].

Vijay ve Srikanpatta yaptıkları çalışmada, MoS₂ dolgu maddesi içeren ve içermeyen karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin aşınma davranışını incelemiştir. Bu kompozitlere farklı çarpma açılarında (15°-90°), 200 mikron boyutunda silika aşındırıcılar ile katı partikül erozyonu testi yapmışlardır. Deney sonucunda, çarpma açısının artması ile aşınma kaybının azaldığını gözlemlemişlerdir. MoS₂ dolgulu karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin, dolgusuz olan karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlere kıyasla daha iyi erozyon direnci gösterdikleri sonucuna varmışlardır. %4 MoS₂ dolgu maddesi içeren karbon fiber takviyeli epoksi kompozitin en iyi erozyon aşınma performansı sergilediğini gözlemlemişlerdir [48].

Hussein ve Hashim yaptıkları çalışmada, el yatırma yöntemi ile kompozit numuneleri hazırlamışlar ve erozif aşınma davranışını incelemişlerdir. Hazırlanan kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak epoksi reçine, takviye malzemesi %3 hacim fraksiyonlu cam fiber ve dolgu malzemesi olarak %2, %4, %6 hacim fraksiyonlu alüminyum oksit (Al_2O_3), silikon oksit (SiO_2) ve titanyum oksit (TiO_2) kullanmışlardır. Numuneleri 40 mm çapında ve 5 mm kalınlığında kesmişlerdir. Bu kompozitlere farklı çarpma açılarında (30° , 60° , 90°) erozyon testi uygulamışlardır. Deney sonucunda, dolgusuz epoksi kompozit malzemenin, dolgulu kompozit malzemelere kıyasla daha düşük erozyon direncine sahip olduğunu ve numunenin (Epoksi +% 6 cam elyafı +% 6 SiO_2) endüstriyel esaslı kompozit malzemelere göre daha yüksek erozyon direnci gösterdiğini görmüşlerdir. Hacim fraksiyonu arttığında erozyon direncinde arttığı sonucuna varmışlardır [49].

Mohan ve arkadaşları, aramid kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve katı partikül erozyonu aşınma davranışları üzerine ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) etkisini araştırmışlardır. UHMWPE ile kaplanmış aramid kumaş takviyeli epoksi kompozitleri, vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) tekniği kullanılarak % 0 ila % 4 arasında değişen partikül konsantrasyonu ile imal etmişlerdir. Ürettikleri kompozit malzemelerin mekanik davranışını belirlemek için Instron üniversal test makinesi kullanmışlardır. Katı partikül erozyon deneylerini ASTM-G76 standardına uygun olarak erozyon test cihazında gerçekleştirmişlerdir. Katı partikül erozyonu testinde aşındırıcı olarak şekil 3.2'de görülen 150-280 μm boyutunda silika kumu kullanmışlardır.



Şekil 3.2. Aşındırıcı olarak kullanılan silika kumunun SEM görüntüsü [50]

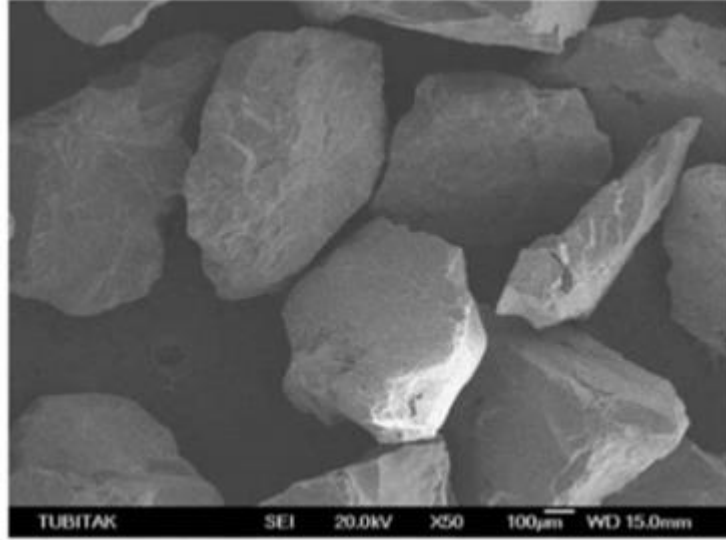
Erozyon testini oda sıcaklığında, 20 m/s, 30 m/s ve 40 m/s partikül çarpma hızlarında ve 30⁰, 60⁰, 90⁰ partikül çarpma açılarında 150-280 µm boyutundaki silika kumunun 3 dakika süre ile üretilen kompozit malzemelere çarpması ile gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlerin aşındırılan yüzeylerini SEM cihazı ile incelemişlerdir. Deney sonucunda, kompozitlerin maksimum aşınma davranışının 60⁰ partikül çarpma açısında gerçekleştiği ve yarı sünek bir erozif aşınma davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. SEM görüntülerini incelediklerinde ise, aramid kumaş takviyeli epoksi kompozitleri UHMWPE ile kapladıklarında, matrisin daha az hasar gördüğünü incelemişlerdir [50].

Mohan ve arkadaşları yaptıkları başka bir çalışmada, tungsten karbür (WC) tozlarının cam kumaş epoksi (G-E) kompozitlerde erozif aşınma davranışına olan etkisini araştırmışlardır. Kompozit numunelerin üretilmesi için vakum destekli reçine infüzyonu (VARI) tekniğini kullanmışlardır. Farklı çarpma hızlarında (40 ve 80 m/s) ve farklı çarpma açılarında (30⁰ ila 90⁰) kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Tungsten karbür ile doldurulmuş ve doldurulmamış cam kumaş epoksi kompozitlerin aşınmış yüzey özelliklerini, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak incelemişlerdir. Erozif aşınma deneyi sonucunda, tüm kompozitlerde maksimum erozyon oranının 90⁰ partikül çarpma açısında gerçekleştiği ve kırılğan erozif aşınma davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Tungsten karbür ile doldurulmuş cam kumaş epoksi kompozit malzemenin, doldurulmamış cam kumaş epoksi kompozit malzemeye göre daha düşük bir erozyon oranı sergilediğinin sonucuna varmışlardır [51].

Sınmazçelik ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, rastgele yönelimli kısa cam fiber ve karbon fiber takviyeli polietereterketon (PEEK) kompozitlerin katı partikül erozyonu aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Katı partikül erozyon testini, 500-710 µm boyutundaki kahverengi erimiş alüminyum oksit (Al₂O₃) aşındırıcı ile altı farklı partikül çarpma açısında (15⁰, 30⁰, 45⁰, 60⁰, 75⁰, 90⁰) gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcının SEM görüntüsü şekil 3.3’de verilmiştir.

Erozif aşınma testinden sonra numunelerin aşındırılmış yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu ile incelemişlerdir. Sonuç olarak, her iki kompozit malzemenin de maksimum aşınmasının 45⁰ partikül çarpma açısında gerçekleştiğini ve yarı sünek bir

erozif aşınma davranışı sergilediklerini gözlemlemişlerdir. Karbon fiber takviyeli kompozitlerin kütle kaybı cam fiber takviyeli kompozitlerden daha yüksektir. Karbon fiber takviyeli PEEK kompozitler, cam fiber takviyeli PEEK kompozitler ile karşılaştırıldığında daha düşük erozyon oranına sahip olduğunun sonucuna varmışlardır [52].



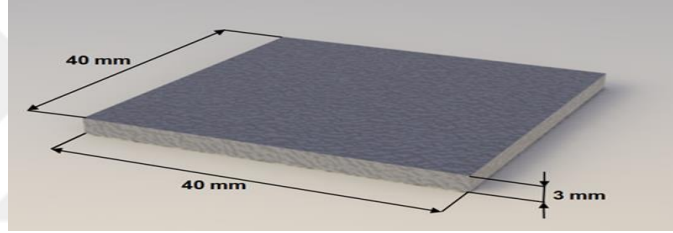
Şekil 3.3. Alüminyum oksit aşındırıcının taramalı elektron mikroskop görüntüsü [52]

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme

4.1.1. Hedef malzeme

Deneysel çalışmalarda karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak karbon fiber ve matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılan bu kompozit malzeme $1,555 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. Karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit [0/90] ve [+45/-45] yönelime sahiptir. Şekil 4.1’de kullanılan numunenin boyutları verilmiştir.



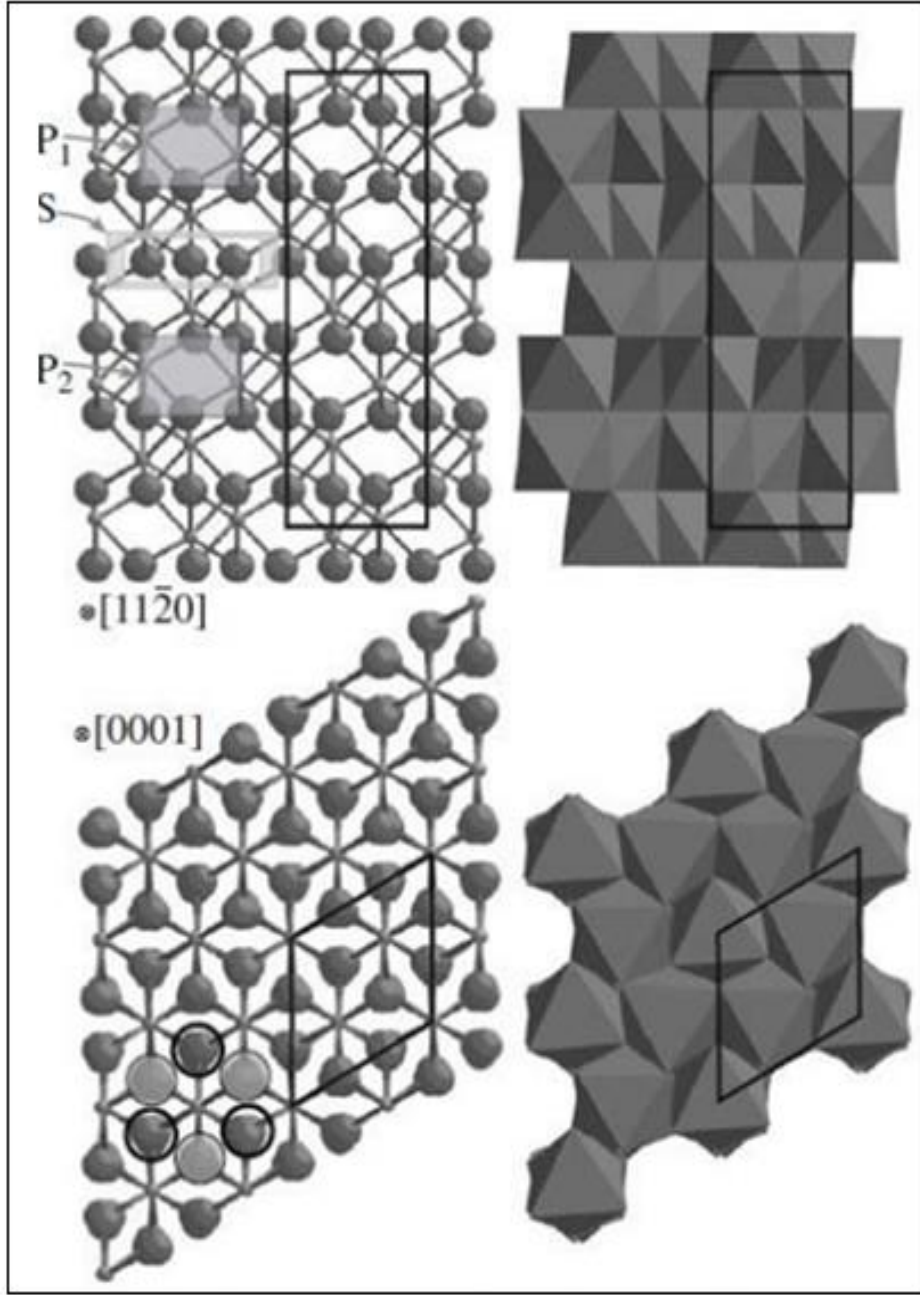
Şekil 4.1. Karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit numunelerin boyutları

4.1.2. Aşındırıcı malzeme

Deneysel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak, üç farklı partikül boyutuna (60 mesh, 80 mesh, 120 mesh) sahip alümina (alüminyum oksit, Al_2O_3) aşındırıcılar kullanılmıştır. Tablo 4.1’de deneysel çalışmalarda kullanılan alümina aşındırıcıların partikül boyutları verilmiştir. Şekil 4.2’de alüminanın kristal yapısı iki boyutlu olarak verilmiştir.

Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları

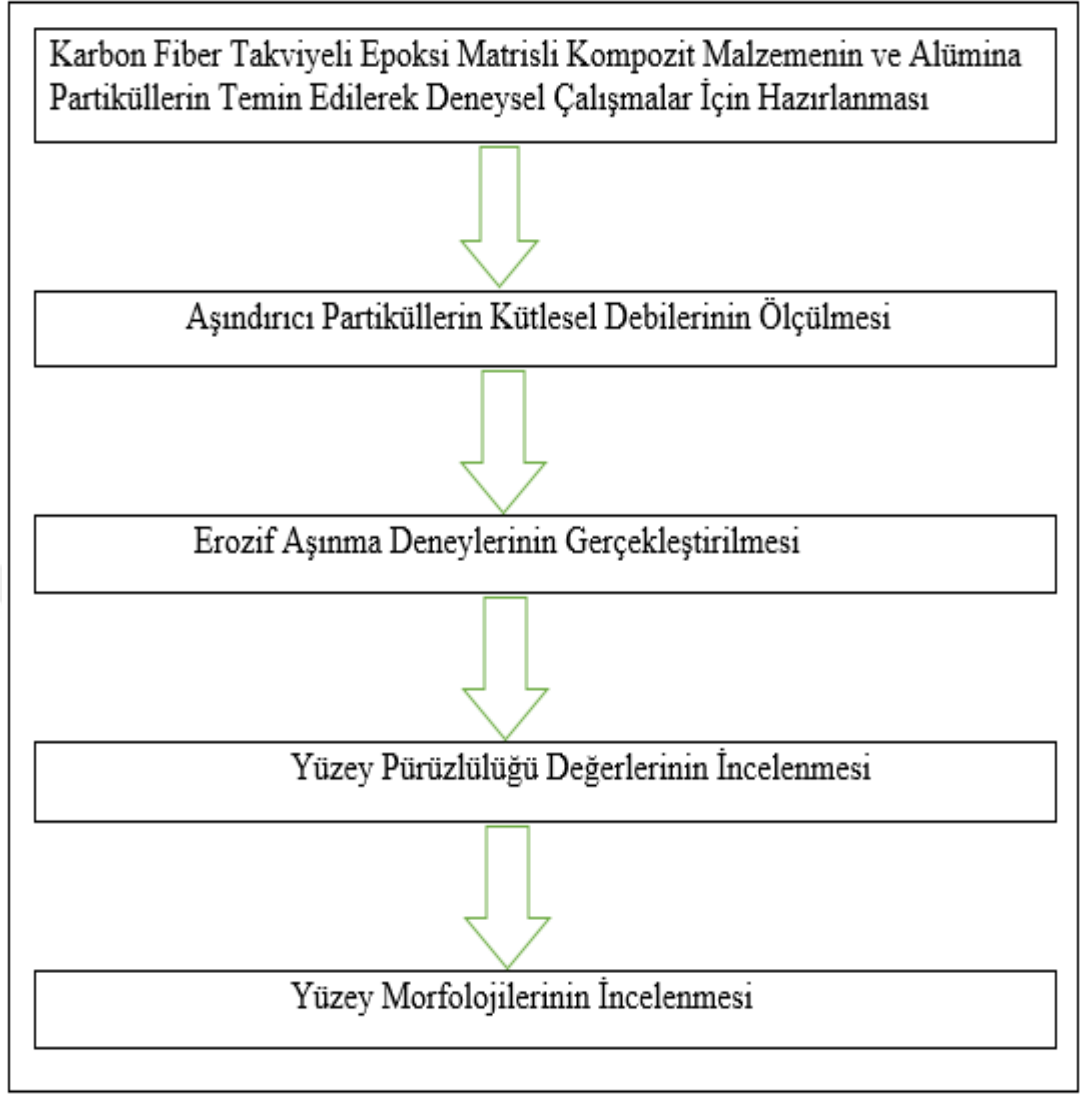
Aşındırıcı Partikül Adı	Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
Alüminyum Oksit (60 mesh)	212-300 μm
Alüminyum Oksit (80 mesh)	150-212 μm
Alüminyum Oksit (120 mesh)	90-125 μm



Şekil 4.2. Alümina kristal yapısı [53]

4.2. Yöntem

Yüksek lisans tez çalışmasında şekil 4.3’de akış şeması verilen deneysel çalışmalar sırası ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde akış şemasında verilen yöntemlerin nasıl gerçekleştirildiği detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Deneysel çalışmalar gerçekleştirilirken kullanılan cihaz ve ekipmanlar akış şemasında verilen yöntemlerin anlatıldığı bölümler içerisinde verilmiştir.



Şekil 4.3. Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması

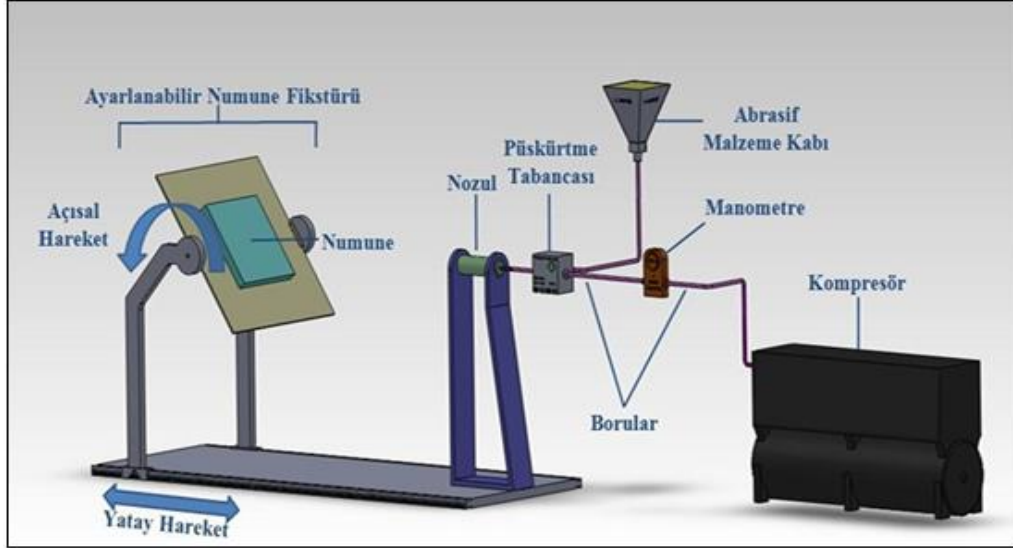
4.2.1. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin hesaplanması

Deneysel çalışmalarda alümina aşındırıcılar 3 bar basınçta hızlandırılmış ve bu basınçlarda aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri ölçülmüştür. Elde edilen debi değerleri daha sonra karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemenin farklı partiküller ile aşındırılması sonrasında erozyon oranlarının hesaplanması için kullanılmıştır.

Kütleli debilerin ölçülmesi için aşındırıcı partiküller 3 bar püskürtme basıncında 5 saniye süresince püskürtülmüştür. Bu süre içerisinde kullanılan aşındırıcı partikül kütleli debisinin erozyon süresine bölünmesi ile basınç değeri ve her bir partikül boyutu için kütleli debi hesaplanmıştır.

4.2.2. Eroziyon aşınma deneyi

Katı partikül erozyonu aşınma davranışı özel olarak tasarlanan katı partikül erozyonu test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Katı partikül erozyonu test düzeneği basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, kumlama kabini, numune fikstürü ve kumlama tabancası elemanlarından oluşmaktadır. Kumlama tabancası kumlama kabini içerisine sabitlenmiştir ve kabin dışarısından bir pedal aracılığı ile kontrol edilebilmektedir. Kumlama basıncı da kabin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanabilmektedir. Kumlama kabini içerisine numunenin sabitlenmesi ve numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülmesini sağlayan özel bir numune tutucusu yerleştirilmiştir. Bu düzenek ile kabin içerisine sabitlenmiş kumlama tabancası, numunenin 15'er derece ile döndürülmesine olanak veren ayarlanabilir numune fikstürünün hareketi ile numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtebilmektedir. Kumlama işlemleri sırasında numuneler bu fikstür kullanılarak kumlama tabancasından 60 mm uzaklıkta tutulmuştur. Şekil 4.4' de katı partikül erozyonu test düzeneği verilmiştir [41].



Şekil 4.4. Katı partikül erozyonu aşınma test düzeneği [41]

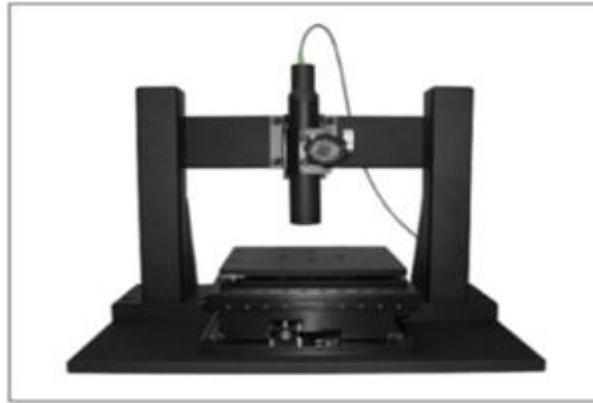
Şekilde verilen test düzeneği ile kompozit malzeme farklı partikül açılarında (15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°) farklı yönlendirmelerde ($0/90$ ve $+45/-45$) ve farklı partikül boyutlarında (60 mesh, 80 mesh, 120 mesh) alümina partikülleri kullanılarak aşındırılmıştır. Tablo 4.2'de deneysel çalışmalarda kullanılan tüm parametreler verilmiştir.

Tablo 4.2. Katı partikül erozyonu aşınma deney parametreleri

Aşındırıcı Türü	Alümina (Alüminyum Oksit, Al ₂ O ₃)
Aşındırıcı Partikül Boyutları	60 mesh, 80 mesh, 120 mesh
Partikül Çarpma Açısı	15 ⁰ , 30 ⁰ , 45 ⁰ , 60 ⁰ , 75 ⁰ , 90 ⁰
Partikül Püskürtme Basıncı	3 bar
Erozyon Süresi	5 sn
Test Sıcaklığı	25 ⁰ C
Nozul ile Numune Arası Mesafe	60 mm
Nozul Çapı	5 mm
Nozul Boyu	50 mm
Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debileri	60 mesh → 23,66 g/sn 80 mesh → 17,08 g/sn 120 mesh → 20,38 g/sn

4.2.3. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Katı partikül erozyonu deneyinden sonra uygulanan farklı parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini incelemek amacı ile aşındırılan numuneler 3 boyutlu optik profilometre cihazı ile taranmıştır. Bu cihaz ile aşınmış yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.5’de deneysel çalışmalarda kullanılan Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazının görüntüsü verilmiştir. Tablo 4.3’de ise bu cihaza ait bazı özellikler verilmiştir.



Şekil 4.5. Optik profilometre cihazı [41]

Tablo 4.3. Optik profilometre cihazının özellikleri

X-Y Eksen Mesafesi	50 mm
Z Eksen	30 mm
X-Y Eksen Çözünürlüğü	0,1 μm
Maksimum X-Y Hızı	10 mm/s

4.2.4. Yüzey morfolojilerinin incelenmesi

Kompozit malzemenin aşınmaya maruz kalan yüzeylerinin makro boyutta morfolojik inceleme ve analizlerinin yapılması için şekil 4.6'da gösterilen Nikon SMZ 745T markalı stereo mikroskop kullanılmıştır. Bu optik profilometre cihazı 7.5:1 zoom oranına, 115 mm uzun çalışma mesafesi ve 3.35X – 300X toplam büyütme özelliklerine sahiptir.



Şekil 4.6. Nikon SMZ 745T markalı stereo mikroskop [41]

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Eroziyon Aşınma Deneylerinin Sonuçları

Bu bölümde karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin katı partikül erozyonu davranışına eroziyon aşınma test parametrelerinin etkileri incelenecektir. Tez çalışması kapsamında kompozit malzeme 6 farklı partikül çarpma açısında (15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°), 2 farklı karbon fiber yönlenmesinde (+45/-45 ve 0/90), 3 farklı partikül boyutundaki aşındırıcılar (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) ile 3 bar basınçta aşındırılmıştır. Bu noktada kompozit malzemenin eroziyon aşınma davranışına karbon fiberlerin farklı yönlenmesinin, partikül çarpma açısının ve partikül boyutunun etkilerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin eroziyon aşınma davranışlarının incelenmesi aşamasında bu kapsamda bir çalışmaya rastlanmamıştır. Tez çalışmasının en büyük çıktılarından biri tüm bu parametrelerin karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin eroziyon aşınma davranışına etkilerinin net bir şekilde anlaşılmasıdır. Bu bölüm içerisinde kullanılan kompozit malzemenin erozyon oranının; partikül çarpma açısı, partikül boyutu ve karbon fiberlerin farklı yönlenmesine bağlı olarak değişimi bu bölümde alt başlıklar halinde ayrı ayrı çizilen grafikler yardımı ile incelenmiştir.

Tablo 5.1’de eroziyon aşınma deneylerinde kullanılan parametreler verilmiştir. Tez çalışması kapsamında tabloda verilen parametrelerin tüm kombinasyonlarında eroziyon aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir ve tüm deneyler için karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin deneysel erozyon oranı hesaplanmıştır.

Tablo 5.1. Eroziyon aşınma deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı Partikül Boyutu	60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh
Partikül Çarpma Açısı	15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°
Fiber Yönlenmesi	+45/-45 ve 0/90

Malzemelerin erozyon davranışı incelenirken birim aşındırıcının gerçekleştirdiği erozyon miktarı hesaplanmalıdır. Bu durumda farklı parametreler altında malzemelerin erozyon davranışları karşılaştırılabilir. Erozyon oranı; katı partikül erozyonu sonucunda aşındırılan numunedeki kütle kaybının, bu kaybı meydana getiren toplam aşındırıcı partikül kütesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Tez çalışmasında uygulanan tüm deneylerin sonuçları denklem (5.1)'de kullanılarak erozyon oranı olarak ifade edilmiştir.

Çalışmada erozyon oranı hesabı aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$E = \frac{\Delta m_s}{m_e} \quad (5.1)$$

E = Erozyon oranı (g/g)

Δm_s = Örnek numunenin kütle kaybı (g)

m_e = Aşındırıcı kütlesi (g)

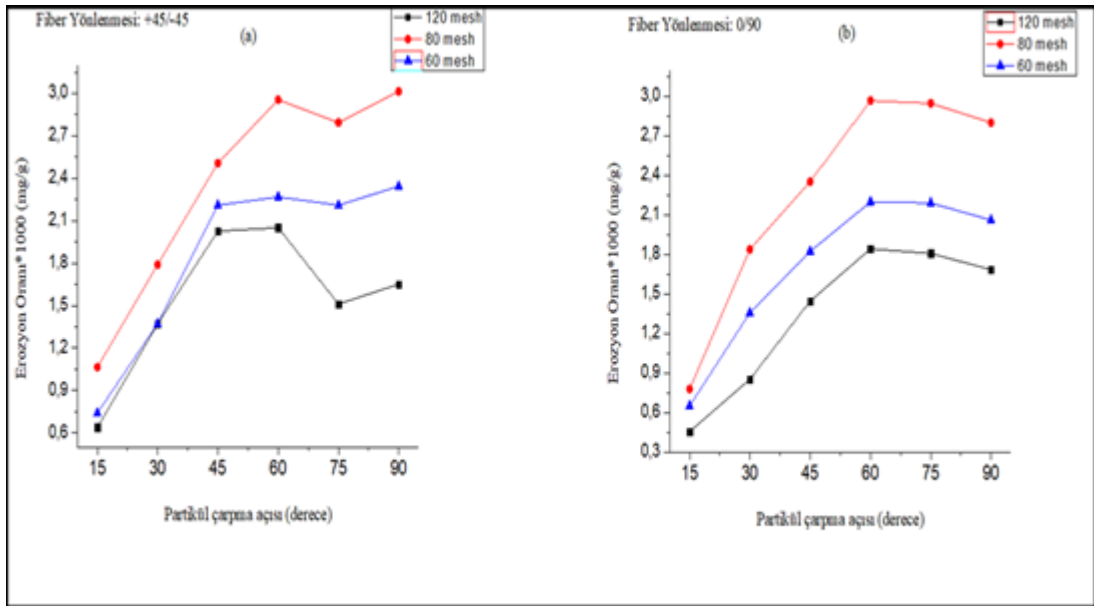
5.1.1. Erozyon oranının partikül çarpma açısına göre değişimi

Literatürde birçok araştırmacı katı partikül erozyonunun partikül çarpma açısına bağlı değişimini incelemiştir. Karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin literatür çalışmaları incelendiğinde karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin yarı-sünek bir erozif aşınma davranışı sergilediği görülmüştür. Literatürde karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin yarı-sünek erozif aşınma davranışına bağlı olarak maksimum aşınmanın 60° çarpma açısında meydana geldiği görülmüştür [43]. Tewari ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, karbon fiber takviyeli epoksi kompozit ve cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin tüm fiber yönlenmelerinde (0°, 45° ve 90° fiber yönlenmeleri) maksimum ağırlık kaybının 60° partikül çarpma açısında gerçekleştiği sonucuna varmışlardır [43].

Sınmazçelik ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, rastgele yönelimli kısa cam fiber ve karbon fiber takviyeli polietereketon (PEEK) kompozitlerin maksimum aşınmasının 45° partikül çarpma açısında ve minimum aşınmasının ise 90° partikül çarpma açısında meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [52].

Ancak yine de karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin partikül çarpma açısının etkisine yönelik çalışmalar sınırlıdır. Özellikle de örgülü sürekli fiber takviyeli kompozit fiberler ile yapılmış çalışmalar oldukça azdır. Bu bölümde karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin katı partikül erozyonu davranışını etkileyen önemli bir parametre olan partikül çarpma açısının erozyon oranına etkisinin farklı parametreler altında incelenerek literatürdeki bu boşluğun doldurulması amaçlanmıştır. Deneylerde farklı aşındırıcı partikül boyutları (60 mesh, 80 mesh, 120 mesh) ve farklı fiber yönlenmesi (+45/-45 ve 0/90) kullanılarak aşındırılan numunelerin erozyon oranlarının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Deneyler sonrasında ölçülen kütle kayıpları ile karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin her bir parametre için erozyon oranı hesaplanmıştır. Bu bölüm içerisinde hesaplanan erozyon oranları ile çizilen grafikler yardımı ile karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin erozyon oranının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Şekil 5.1’de +45/-45 fiber yönlenmesinde, 6 farklı çarpma açısında (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°), 3 farklı boyutta (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) partiküller ile aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin erozyon oranlarının değişimi verilmiştir.



Şekil 5.1. Erozyon oranının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi a) fiber yönlenmesi: +45/-45, b) fiber yönlenmesi: 0/90

Şekil 5.1-a'da +45/-45 fiber yönlenmesinde ve 80 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile elde edilen sonuçlarda, erozyon oranının 60⁰'lik partikül çarpma açısına kadar belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. 60 ve 120 mesh boyutundaki aşındırıcılar için çizilen eğrilere bakıldığında maksimum erozyon oranının 60⁰ çarpma açısında ve minimum erozyon oranının 15⁰ çarpma açısında gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 5.1-b'de farklı fiber yönlenmesi ile farklı partikül çarpma açıları ve farklı partikül boyutlarında aşındırılması ile elde edilen erozyon oranları verilmiştir. Şekil 5.1-b incelendiğinde şekil 5.1-a için ulaşılan sonuçların geçerli olduğu söylenebilir. Tüm partikül boyutlarında minimum erozyon oranı 15⁰ partikül çarpma açısında ve maksimum erozyon oranı ise 60⁰ partikül çarpma açısında gözlenmiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin yarı sünek bir erozif aşınma davranışı sergilediği sonucuna varılabilmektedir.

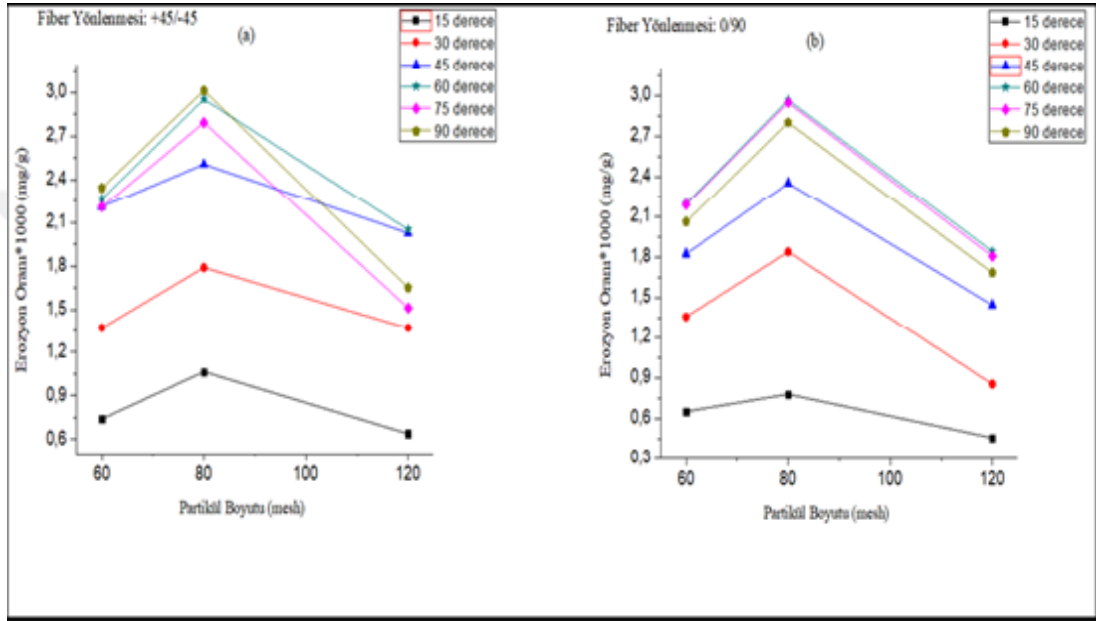
5.1.2. Erozyon oranının partikül boyutuna göre değişimi

Malzemelerin erozif aşınma davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biride aşındırıcı partikül boyutudur. Literatür çalışmaları incelendiğinde katı partikül erozyonunun aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi ile ilgili birçok araştırmacının çalışmalarına rastlanmaktadır. Deliwala ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeye 150µm, 200µm ve 250µm boyutlarındaki çelik bilyalar ile erozif aşınma testi uygulamışlar ve tüm partikül çarpma açılarında (15⁰, 30⁰, 45⁰, 60⁰, 75⁰, 90⁰) 150 µm boyutundaki partiküllerin 200µm ve 250µm boyutundaki partiküllere göre daha düşük kütle kaybına yol açtığının sonucuna varmışlardır [54].

Ancak bu konu ile ilgili kapsamlı çalışmalar bulunmamaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda aşındırıcı partikül tane boyutunun artmasıyla erozif aşınmanın da artış gösterdiği fikri ileri sürülmüştür. Buna karşın bazı çalışmalarda ise erozif aşınma miktarının aşındırıcı partikül boyutundan bağımsız olduğu fikrine ulaşılmıştır. Tez çalışmasında erozyon oranı üzerinde aşındırıcı partikül boyutunun etkisi olup olmadığını irdelemek amacıyla karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeye

60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh partikül boyutundaki aşındırıcılar ile farklı fiber yönlenmelerinde ve farklı partikül açılarında erozyon oranı değerleri incelenmiştir.

Şekil 5.2'de +45/-45 ve 0/90 fiber yönlenmesi ile 6 farklı partikül çarpma açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) kullanılarak aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin 3 farklı partikül boyutunun (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) erozyon oranına etkisini grafikler yardımıyla ile verilmiştir.



Şekil 5.2. Erozyon oranının katı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi a) fiber yönlenmesi: +45/-45, b) fiber yönlenmesi: 0/90

Şekil 5.2-a'da +45/-45 karbon fiber yönlenmesinde farklı boyuttaki aşındırıcı partiküller (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) kullanılarak yapılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemede katı partikül erozyonu sonucu oluşan erozyon oranları değerleri verilmiştir.

Şekilde her bir aşındırıcı partikül boyutu için erozyon oranları değerleri değişen partikül çarpma açılarına göre belirtilmiştir. Erozyon oranı değerlerine bakıldığında +45/-45 karbon fiber yönlenmesinde tüm açı değerlerinde (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) 80 mesh boyutlu aşındırıcı partikülün en yüksek erozyon oranına sahip olduğu görülmüştür. Tüm partikül çarpma açılarında 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partikülün ise en düşük erozyon oranlarına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca 80 mesh boyutlu aşındırıcı partikülün çarpma açısına bağlı erozyon oranı incelendiğinde ise en

yüksek erozyon oranının 90° partikül çarpma açısında, en düşük erozyon oranının da 15° partikül çarpma açısında meydana geldiği saptanmıştır.

Şekil 5.2-b'de 0/90 karbon fiber yönlenmesinde tüm açı değerleri (15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°) için aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak erozyon oranının değişim grafiği verilmiştir. Şekil 5.2-b incelendiğinde karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemede en yüksek erozyon oranının 80 mesh boyutunda partiküller kullanılması durumunda ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partikülde ise tüm partikül çarpma açılarında en düşük erozyon oranları görülmüştür. Ayrıca 80 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküllerin çarpma açısına bağlı erozyon oranı incelendiğinde en yüksek erozyon oranının 60° , en düşük erozyon oranının ise 15° partikül çarpma açısında meydana geldiği görülmektedir.

Deneysel çalışmalar öncesinde aşındırıcı partikül boyutundaki artışın partiküllerin hızlarını, momentumlarını ve kinetik enerjilerini arttıracığı ve buna bağlı olarak erozif aşınma miktarının da artacağı öngörülmüştür. Şekil 5.2 incelendiğinde en büyük partikül boyutu olan 60 mesh partikül boyutundaki aşındırıcıların, en küçük partikül boyutu olan 120 mesh partikül boyutundaki aşındırıcılara göre erozyon oranının daha yüksek olması bu öngörüğü desteklemektedir. Ancak partikül boyutu 80 mesh olan aşındırıcı partiküllerinin diğer aşındırıcı partikül boyutlarına göre en yüksek aşınma miktarını meydana getirmesi öngörülen bu durumun aksini göstermektedir. Bu durum karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemede görülen etkin aşınma mekanizmaları ile açıklanabilir.

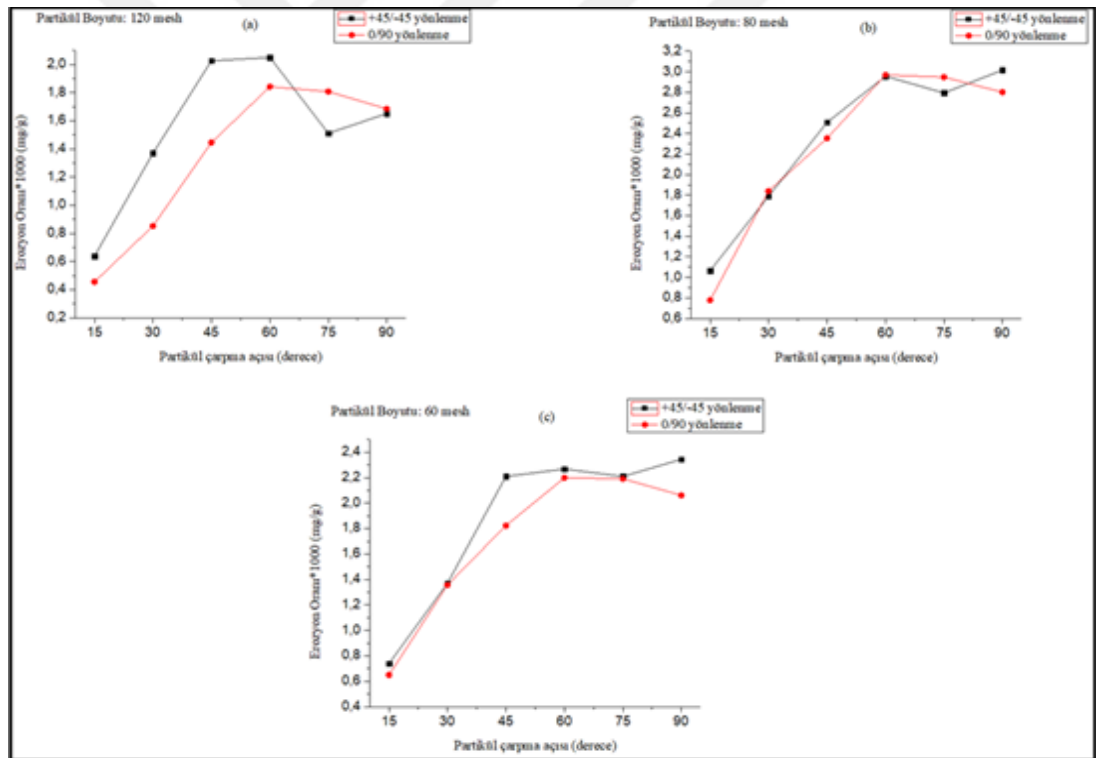
5.1.3. Erozyon oranının fiber yönlenmesine göre değişimi

Literatür incelendiğinde katı partikül erozyonunun fiber yönlenmesine bağlı olarak değişimi ile ilgili yeterli derecede çalışmaya rastlanmamıştır. Tewari ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, karbon fiber takviyeli epoksi kompozit ve cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin fiber yönlenmesinin erozyon oranına etkisini incelemiştirlerdir. Çalışma sonucunda, özellikle 60° partikül çarpma açısında 90/45 (45° fiber yönlenmesi) ve 90/90 (90° fiber yönlenmesi) fiber yönlenmesine göre 90/0 (0° fiber yönlenmesi) fiber yönlenmesinin daha yüksek erozyon oranı gösterdiğini gözlemlemiştirlerdir [43]. Deliwala ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, karbon fiber

takviyeli epoksi kompozit malzemenin çelik bilyalar ile aşındırılması sonucu, aşındırıcı malzemeye paralel yönde yerleştirilen fiberlerin, enlemesine yerleştirilen fiberlere göre kütle kaybının daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır [54].

Tez çalışmasında erozyon oranı üzerinde fiber yönlenmesinin etkisi olup olmadığını araştırmak amacıyla karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeye 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh partikül boyutundaki aşındırıcılar ve farklı partikül çarpma açıları ile farklı fiber yönlenmelerindeki erozyon oranı değerleri incelenmiştir.

Şekil 5.3'de 3 farklı partikül boyutu (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) ve 6 farklı partikül çarpma açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) kullanılarak aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin +45/-45 ve 0/90 fiber yönlenmesinin erozyon oranına etkisini grafikler yardımıyla ile verilmiştir.



Şekil 5.3. Erozyon oranının karbon fiber yönlenmesine bağlı olarak değişimi a) partikül boyutu 120 mesh, b) partikül boyutu 80 mesh, c) partikül boyutu 60 mesh

Şekil 5.3-a'da +45/-45 ve 0/90 karbon fiber yönlenmesinde ve 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılarak yapılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemede katı partikül erozyonu sonucu oluşan erozyon oranları değerleri verilmiştir.

Şekilde erozyon oranı değerlerine bakıldığında 120 mesh partikül boyutundaki aşındırıcı ile aşındırılan kompozit malzemenin 15⁰'den 60⁰ partikül çarpma açısına kadar olan tüm açı değerlerinde +45/-45 karbon fiber yönlenmesinin en yüksek erozyon oranına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca tüm partikül çarpma açılarında +45/-45 ve 0/90 karbon fiber yönlenmelerinin erozyon oranına göre değişimi incelendiğinde ise minimum erozyon oranının 15⁰ partikül çarpma açısında ve maksimum erozyon oranının 60⁰ partikül çarpma açısında meydana geldiği saptanmıştır.

Şekil 5.3-b ve şekil 5.3-c incelendiğinde ise şekil 5.3-a için ulaşılan sonuçların geçerli olduğu söylenebilir. Şekil 5.3 incelendiğinde karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemenin 0/90 fiber yönlenmesinde malzemeye uygulanan aşındırıcı partiküllerin hareket doğrultuları ile fiber doğrultuları paralel olduğundan karbon fiberlerin çok fazla kırılmadıkları ve bu sebeple de +45/-45 fiber yönlenmesine göre daha düşük erozyon oranı meydana geldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, tüm partikül boyutlarında en yüksek erozyon oranının +45/-45 karbon fiber yönlenmesinde meydana geldiği sonucuna varılabilmektedir.

5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Görüntülerinin İncelenmesi

Tez çalışması kapsamında farklı parametreler altında (partikül çarpma açısı, fiber yönlenmesi) ve farklı boyutlarda alümina partiküller ile aşındırılmış karbon fiber takviyeli epoksi kompozit numunelerin aşındırılmış yüzeylerin Nanovea PS50 Marka 3D Optik Profilometre ile 2 ve 3 boyutlu yüzey topografyası alınmıştır. Aşınan yüzeylerde meydana gelen derinlik farkını gösterebilmek amacıyla renklendirme yapılmıştır. Bu resimlerde verilen skalanın en üstünde yer alan beyaz renkten mavi renge doğru ilerledikçe aşınma izi derinliği arttığı sembolize edilmektedir.

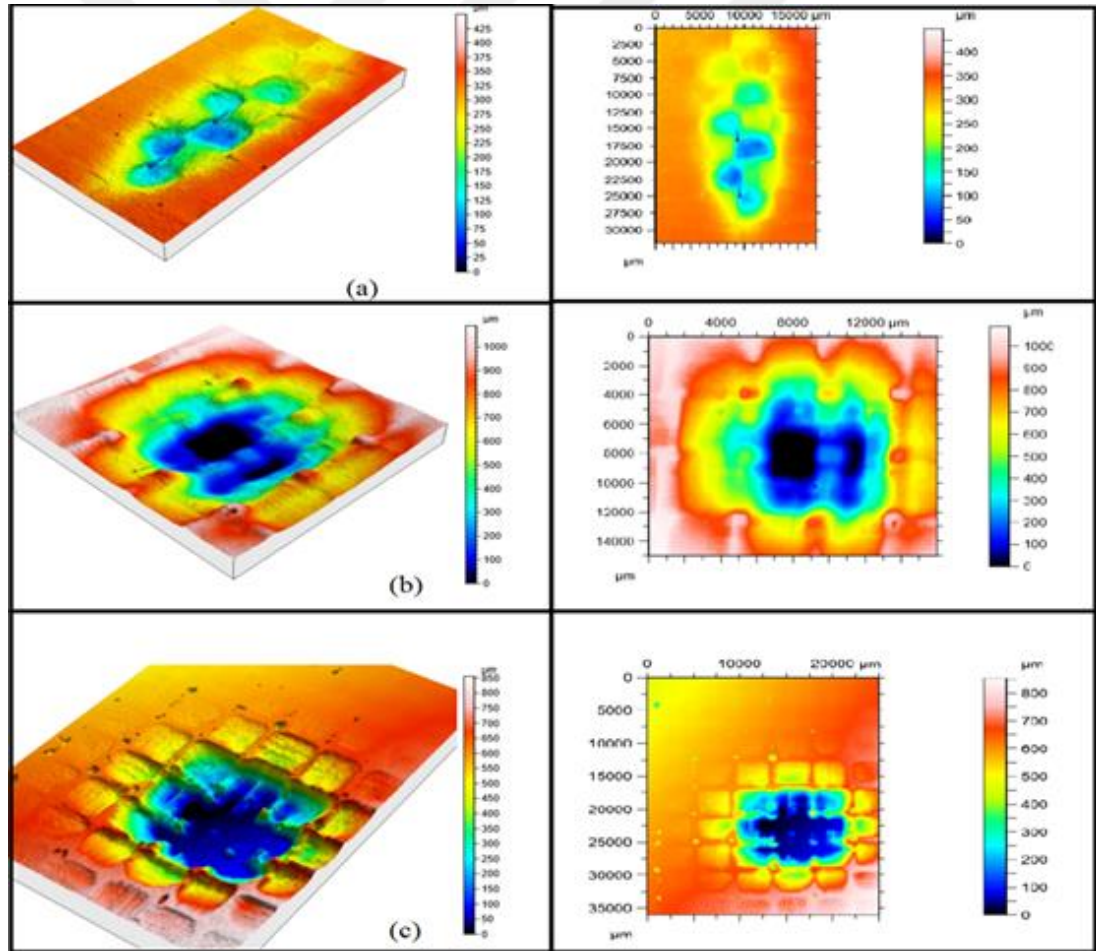
Bu bölüm içerisinde farklı partikül boyutlarıyla (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin aşınmış yüzeylerinin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri incelenmiştir.

5.2.1. Partikül boyutlarına göre yüzey pürüzlülüğü görüntülerinin incelenmesi

5.2.1.1. 120 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntülerinin incelenmesi

Bu bölümde 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile 2 farklı karbon fiber yönlenmesinde (+45/-45 ve 0/90) ve 3 farklı partikül çarpma açısında (15°, 60° ve 90°) aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin optik profilometre ile elde edilen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri incelenmiştir.

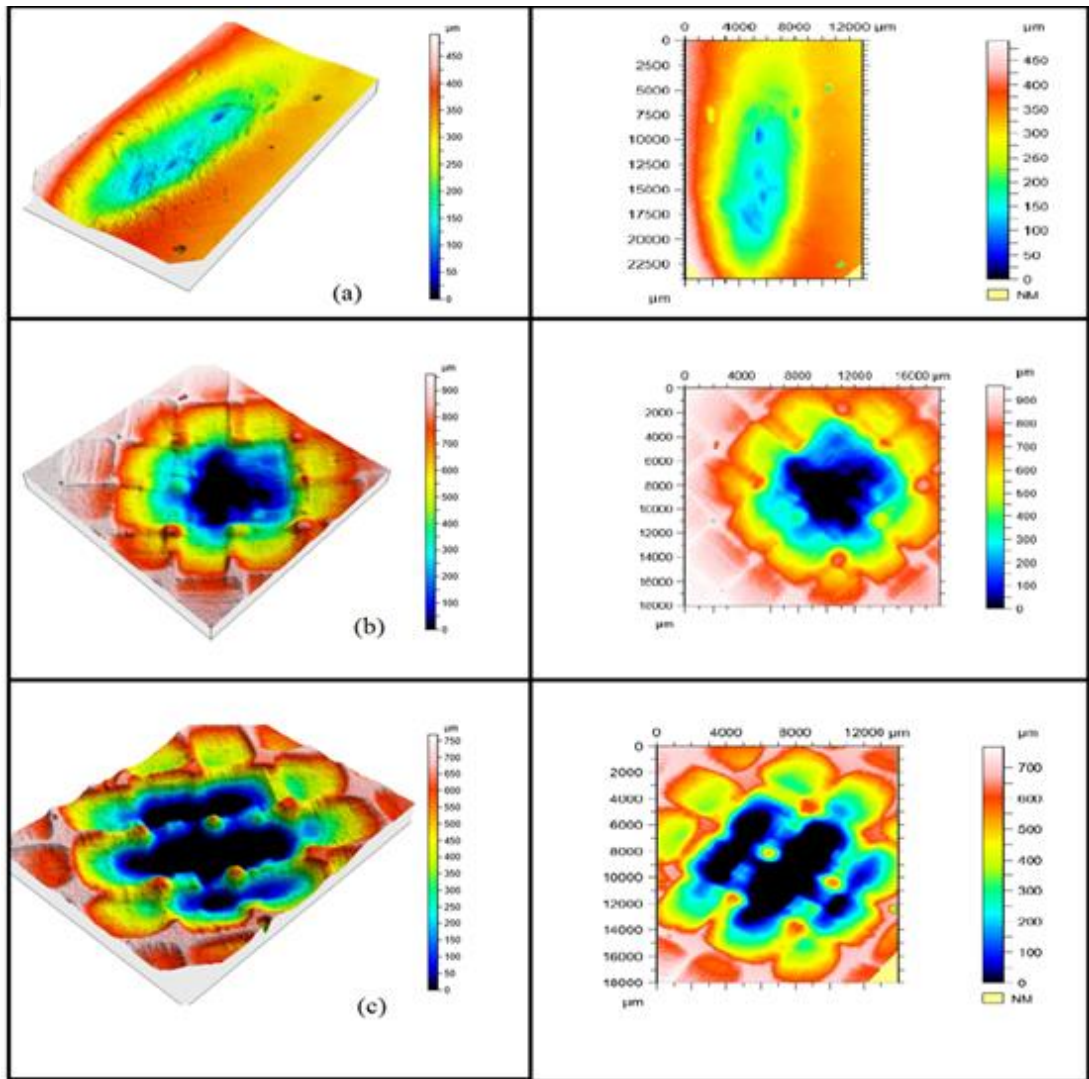
Şekil 5.4'de 120 mesh boyutundaki partiküller ile 0/90 karbon fiber yönlenmesinde ve 15°, 60° ve 90° partikül çarpma açısından aşındırılan kompozit numunelerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.4. 0/90 fiber yönlenmesi ve 120 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15° partikül çarpma açısı, b) 60° partikül çarpma açısı, c) 90° partikül çarpma açısı

Şekil 5.4-a incelendiğinde malzemenin yüzeyine paralele yakın gelen (düşük çarpma açılarında) aşındırıcı partiküllerin yüzeyde sıyırma etkisi gösterdiği açıkça görülmektedir. Şekil 5.4-b ve şekil 5.4-c incelendiğinde ise çarpma açısı dikleştikçe aşındırıcı partiküllerin penetrasyon derinliği artmış ve kalınlık ekseninde penetrasyona bağlı derin hasarlar oluştuğu görülmektedir.

Şekil 5.5’de 120 mesh boyutundaki partiküller ile +45/-45 karbon fiber yönlendirmede ve 15° , 60° , 90° partikül çarpma açısından aşındırılan kompozit numunelerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri verilmiştir.



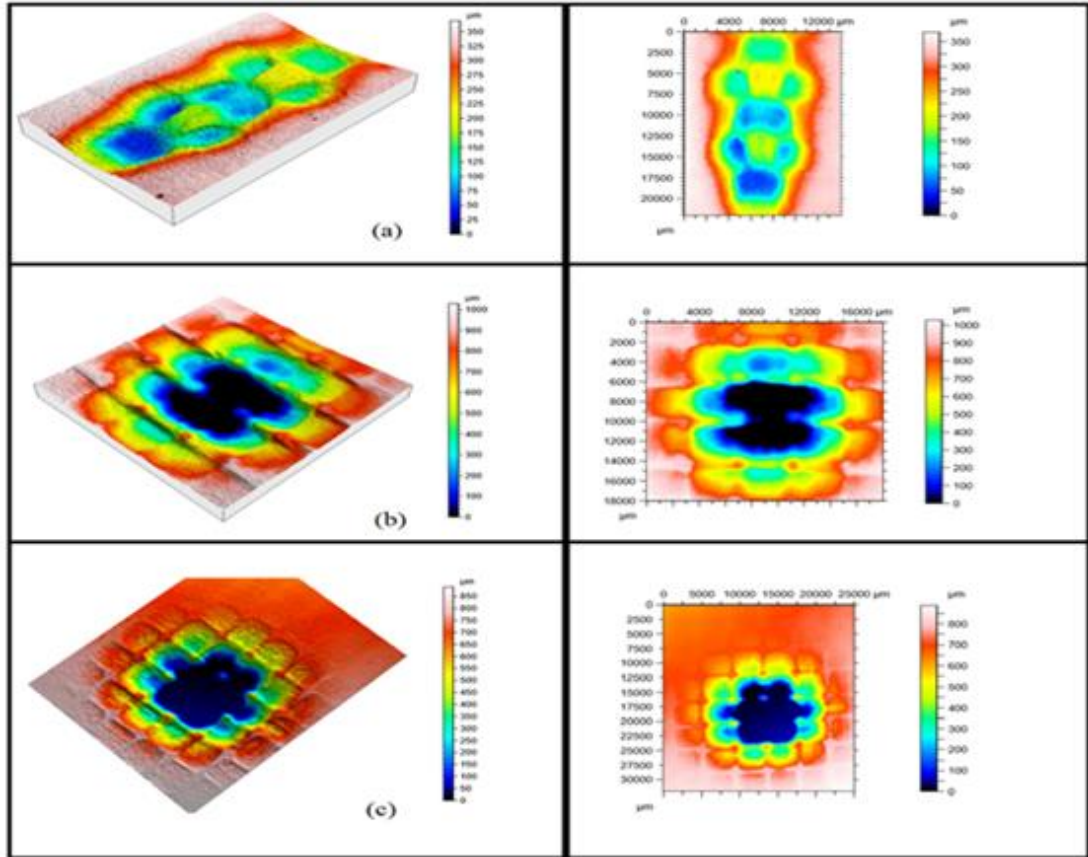
Şekil 5.5. +45/-45 fiber yönlendirmesi ve 120 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15° partikül çarpma açısı, b) 60° partikül çarpma açısı, c) 90° partikül çarpma açısı

Şekil 5.5 incelendiğinde ise şekil 5.4 için ulaşılan sonuçların geçerli olduğu söylenebilir. Şekil 5.5’de aşındırıcı partiküllerin +45/-45 yönlenmesindeki karbon fiberlere çarpmasıyla fiberleri de büyük ölçüde aşındırdığı görülmektedir.

5.2.1.2. 80 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntülerinin incelenmesi

Bu bölümde 80 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile 2 farklı karbon fiber yönlenmesinde (+45/-45 ve 0/90) ve 3 farklı partikül çarpma açısında (15^0 , 60^0 ve 90^0) aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin optik profilometre ile elde edilen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri incelenmiştir.

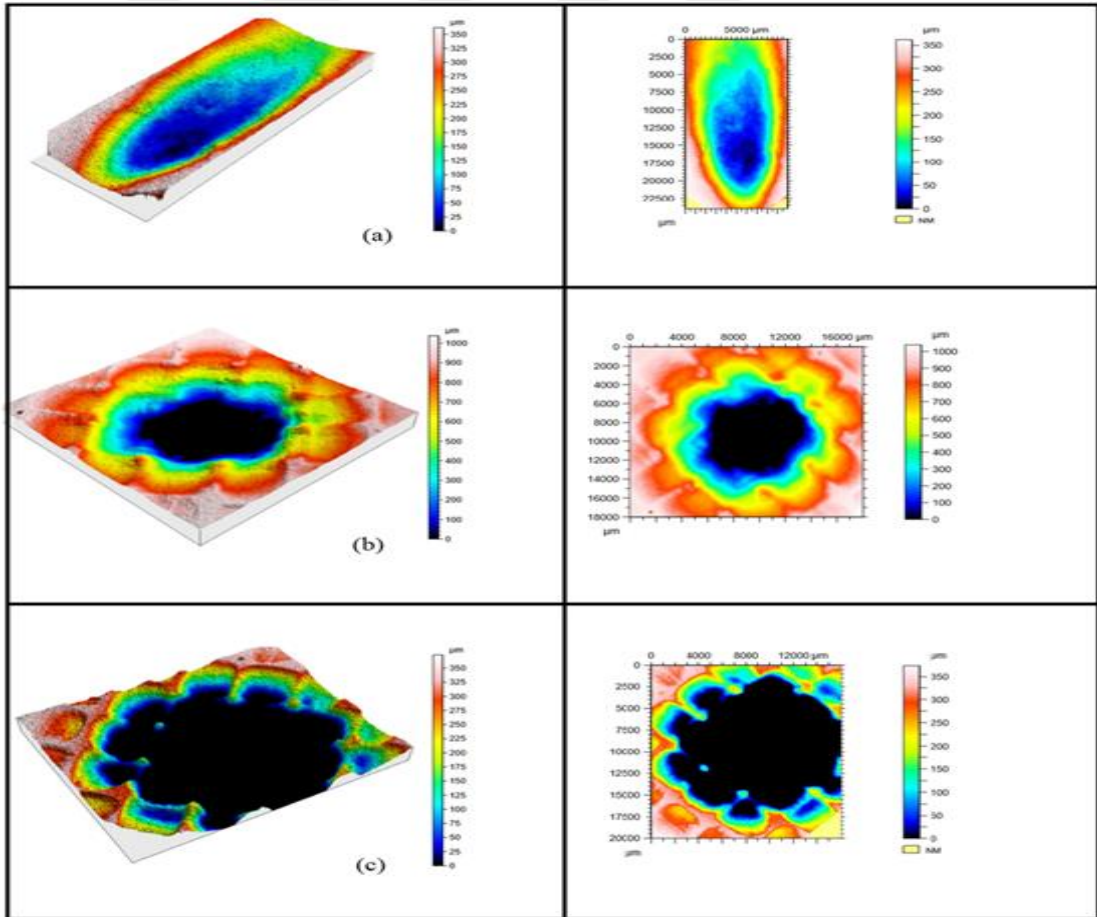
Şekil 5.6’da 80 mesh boyutundaki partiküller ile 0/90 karbon fiber yönlenmesinde ve 15^0 , 60^0 ve 90^0 partikül çarpma açısından aşındırılan kompozit numunelerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.6. 0/90 fiber yönlenmesi ve 80 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15^0 partikül çarpma açısı, b) 60^0 partikül çarpma açısı, c) 90^0 partikül çarpma açısı

Şekil 5.6 incelendiğinde partikül çarpma açısının artması ile daha fazla aşınmanın meydana geldiği görülmektedir. Düşük çarpma açılarında yüksek çarpma açılarna kıyasla malzeme yüzeyinde daha derin çukurların oluştuğu görülmektedir. Bu durum düşük çarpma açılarında aşındırıcı partiküllerin sahip oldukları yatay kuvvet bileşeninin büyük ve dikey kuvvet bileşeninin küçük olması sebebiyle malzeme yüzeyini çizme eğiliminde olmalarından kaynaklanmaktadır. Yüksek çarpma açılarında ise aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine yüksek dikey kuvvet bileşeninin ve düşük yatay kuvvet bileşeninin çarpması nedeniyle malzeme yüzeyine saplanma eğilimindedirler.

Şekil 5.7’de 80 mesh boyutundaki partiküller ile +45/-45 karbon fiber yönlenmesinde ve 15° , 60° , 90° partikül çarpma açısından aşındırılan kompozit numunelerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri verilmiştir.



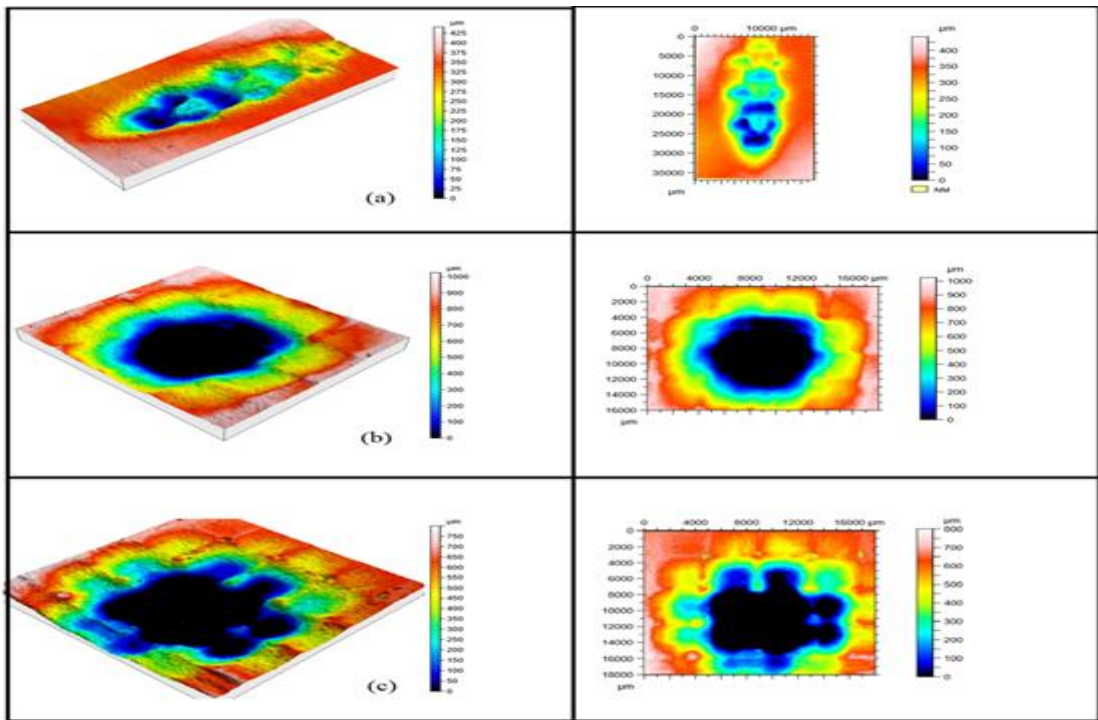
Şekil 5.7. +45/-45 fiber yönlenmesi ve 80 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15° partikül çarpma açısı, b) 60° partikül çarpma açısı, c) 90° partikül çarpma açısı

Şekil 5.6 için varılan sonuçların şekil 5.7 içinde geçerli olduğu söylenebilir. Daha önceki bölümlerde de maksimum aşınmanın 60^0 partikül çarpma açısında ve minimum aşınmanın 15^0 partikül çarpma açısında meydana geldiği sonucuna varılmıştı. Bunu destekler nitelikte şekil 5.7-b incelendiğinde verilen skalanın en yüksek olduğu yani maksimum aşınma meydana geldiği ve şekil 5.7-a incelendiğinde ise verilen skalanın en düşük olduğu yani minimum aşınma meydana geldiği görülmektedir.

5.2.1.3. 60 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntülerinin incelenmesi

Bu bölümde 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile 2 farklı karbon fiber yönlenmesinde ($+45/-45$ ve $0/90$) ve 3 farklı partikül çarpma açısında (15^0 , 60^0 ve 90^0) aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin optik profilometre ile elde edilen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri incelenmiştir.

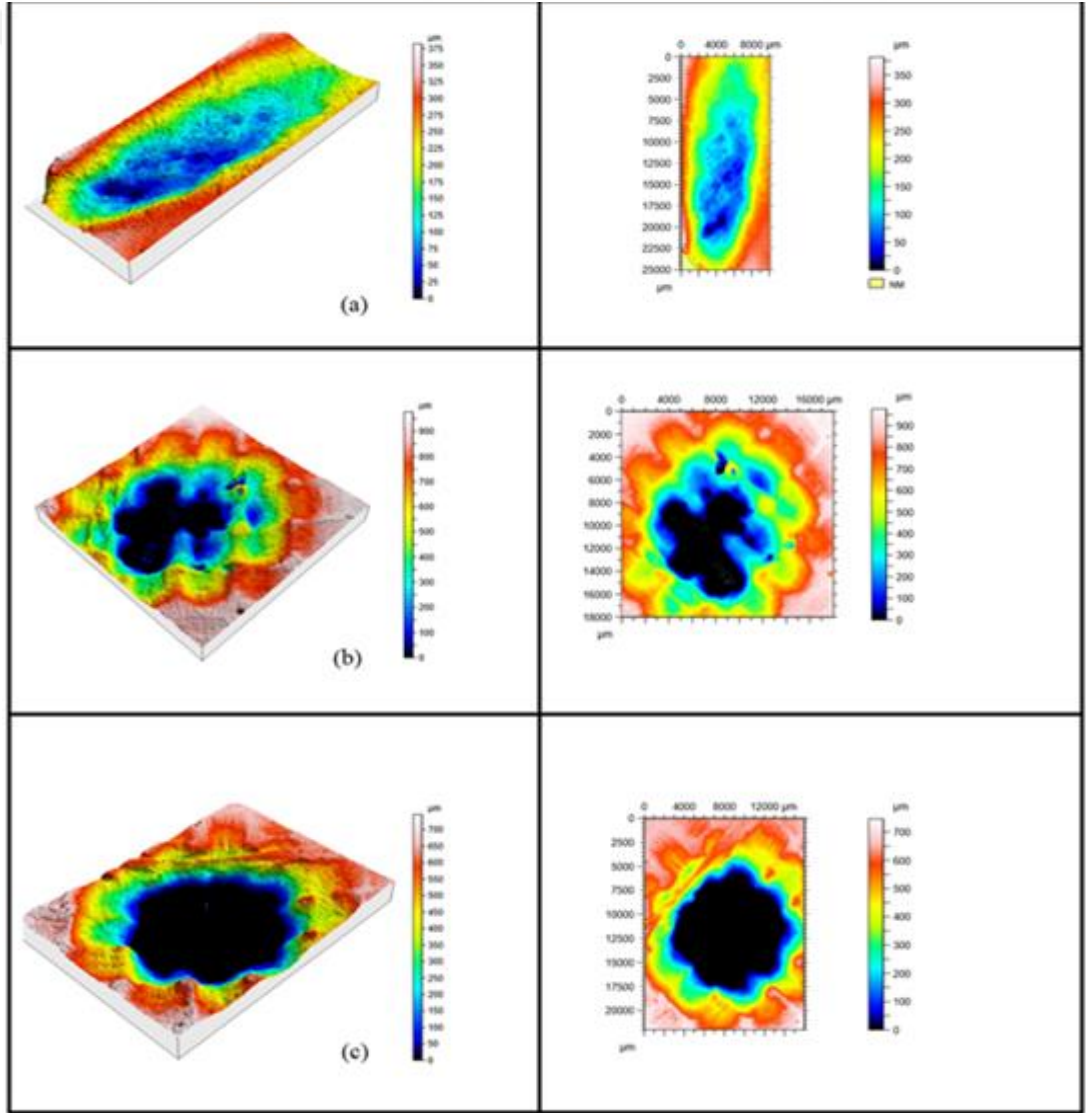
Şekil 5.8’de 60 mesh boyutundaki partiküller ile $0/90$ karbon fiber yönlenmesinde ve 15^0 , 60^0 , 90^0 partikül çarpma açılarında aşındırılan kompozit numunelerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.8. $0/90$ fiber yönlenmesi ve 60 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15^0 partikül çarpma açısı, b) 60^0 partikül çarpma açısı, c) 90^0 partikül çarpma açısı

Şekil 5.8-a incelendiğinde yüzey görüntüsündeki skaladaki değerlerin şekil 5.8-b ve şekil 5.8-c'ye göre daha düşük değerde olduğu görülmektedir. Bu da şekil 5.8-a da minimum aşınmanın meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 5.8-b incelendiğinde ise partikül çarpma açısının 60^0 olması sebebiyle skaladaki değerlerin şekil 5.8-a ve şekil 5.8-c'ye göre en yüksek değerde olduğu görülmektedir ve buradan da şekil 5.8-b'de en yüksek aşınmanın oluştuğu sonucuna varılmaktadır.

Şekil 5.9'da 60 mesh boyutundaki partiküller ile +45/-45 karbon fiber yönlenmesinde ve 15^0 , 60^0 , 90^0 partikül çarpma açısından aşındırılan kompozit numunelerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.9. +45/-45 fiber yönlenmesi ve 60 mesh partikül boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri a) 15^0 partikül çarpma açısı, b) 60^0 partikül çarpma açısı, c) 90^0 partikül çarpma açısı

Şekil 5.9-a'da görüldüğü gibi partikül çarpma açısının 15^0 (düşük çarpma açılarında) olması sebebiyle malzeme yüzeyinde süpürme etkisi görülmektedir. Yüksek çarpma açılarında şekil 5.9-b ve şekil 5.9-c'de ki gibi aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyini adeta döverek plastik deformasyona neden olmaktadır. Ayrıca şekil 5.8-a ile şekil 5.9-a kıyaslandığında şekil 5.8-a'da karbon fiberlerin 0/90 yönlenmesi nedeniyle fiberler daha belirgin olarak görülmektedir. Fakat şekil 5.9-a'da $+45/-45$ karbon fiber yönlenmesinin sebebiyle matrisle birlikte karbon fiberlerde aşındırıcı partiküller ile adeta süpürme etkisinin olduğu görülmektedir.

5.3. Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi

Bir önceki bölümde karbon fiber takviyeli epoksi kompozit numunelerin erozyon oranının partikül çarpma açısı, partikül boyutu ve karbon fiber yönlenmesine bağlı olarak değişimi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu sonuçların nedenlerinin anlaşılması da çok önemlidir. Katı partikül erozyonuna etki eden parametrelerin malzemede meydana getirdiği değişimin net olarak anlaşılabilmesi için numunelerin aşındırılmış yüzeylerin morfolojilerinin incelenmesi gerekmektedir. Aşınma sonrası malzeme yüzeyinde hangi parametrelerin ne tür bir hasar meydana getirdikleri ve oluşan bu hasarın hangi aşınma mekanizması ile meydana geldiğinin belirlenmesi önemli bir husustur.

Literatürde birçok araştırmacı polimer matrisli kompozit malzemelerin katı partikül erozyonu testinden sonra yüzey morfolojilerini incelemişlerdir. Tewari ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, karbon fiber takviyeli epoksi kompozit ve cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerini incelediklerinde fiberlerin matristen ayrıldığını ve matriste mikroçatlama erozif aşınma davranışının meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [43]. Sınmazçelik ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, rastgele yönelimli kısa cam fiber takviyeli polietereterketon (PEEK) kompozit malzemede maksimum aşınmanın meydana geldiği 45^0 partikül çarpma açısındaki taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde derin aşınma izleri, fiber-matris ayrılması ve aşınma kalıntılarına rastlamışlardır. Rastgele yönelimli kısa karbon fiber takviyeli polietereterketon (PEEK) kompozit malzemenin yüzey morfolojisini incelediklerinde ise fiber-matris ayrılmasından dolayı

matris üzerinde oyukların ve birçok kırılmanın meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [52].

Tez çalışmasında 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh partikül boyutları ile 0/90 ve +45/-45 karbon fiber yönlenmesinde ve 15⁰, 60⁰ ve 90⁰ partikül çarpma açısında katı partikül erozyonu ile aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin aşınan yüzeylerinin stereo mikroskop ile yüzey morfolojileri incelenmiştir.

Şekil 5.10'da 120 mesh partikül boyutunda, 0/90 karbon fiber yönlenmesinde ve 15⁰, 60⁰ ve 90⁰ partikül çarpma açıları ile aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin aşınan yüzeylerinin stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.10-a incelendiğinde kompozit numunelerin yüzeyine 15⁰ partikül çarpma açısında gelen aşındırıcı partiküllerin yüzeyde adeta süpürme etkisi yarattığı açıkça görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine yataya yakın bir açı ile çarpmasıyla özellikle fiberler arasındaki matrisin aşınarak uzaklaşmasına neden olmuşlardır. Şekilde gösterilen ok yönleri örgü formundaki fiberlerin yönünü göstermektedir. 2, 3 ve 4 numaralı oklar ile gösterilen kısımlarda fiber yönü ile aşındırıcı partiküllerin yönü paralel olduğundan aşınma izleri daha az görülmektedir. Ancak 1 numaralı ok ile gösterilen kısımda fiber yönü ile aşındırıcı partikül yönü dik olduğundan dolayı eğme kuvvetinin etkisiyle fiberlerde daha fazla kırılma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.10-b ve şekil 5.10-c incelendiğinde ise aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinde derin oyuklar meydana getirdiği görülmektedir.

Şekil 5.11'de 120 mesh partikül boyutunda, +45/-45 karbon fiber yönlenmesinde ve 15⁰, 60⁰ ve 90⁰ partikül çarpma açıları ile aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin aşınan yüzeylerinin stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.11-a incelendiğinde aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinde oluşturduğu süpürme hareketine bağlı olarak mikrokesme ve mikrosürme şeklinde aşınma mekanizmaları meydana geldiği görülmektedir. Matris malzemesi aşındıkça fiberleri desteklemez. Fiberler desteklenmediğinde çabuk kırılır ve fiber, matris ile birlikte yerinden çıkar bu kötü bir durum oluşturmaktadır. Şekil 5.11-a incelendiğinde daire içerisine alınan kısımlarda matrisin aşınmasıyla fiberlerin yerinden çıkması açıkça görülmektedir. Şekil 5.11-b ve şekil 5.11-c incelendiğinde ise aşındırıcı partiküller ile malzeme yüzeyine 90⁰ ve 60⁰ çarpma açısı ile aşındırılması sonucu mikrokesme ve

mikrosürme aşınma mekanizmalarına ilaveten dövmenin etkisiyle plastik deformasyonların meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.11-c incelendiğinde aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine dik açıda çarpması sonucu malzeme yüzeyinde fiberler arasındaki matristen oluşan bölgelerde kraterlerin oluştuğu ve fiberlerin kırıldıkları tespit edilmiştir.

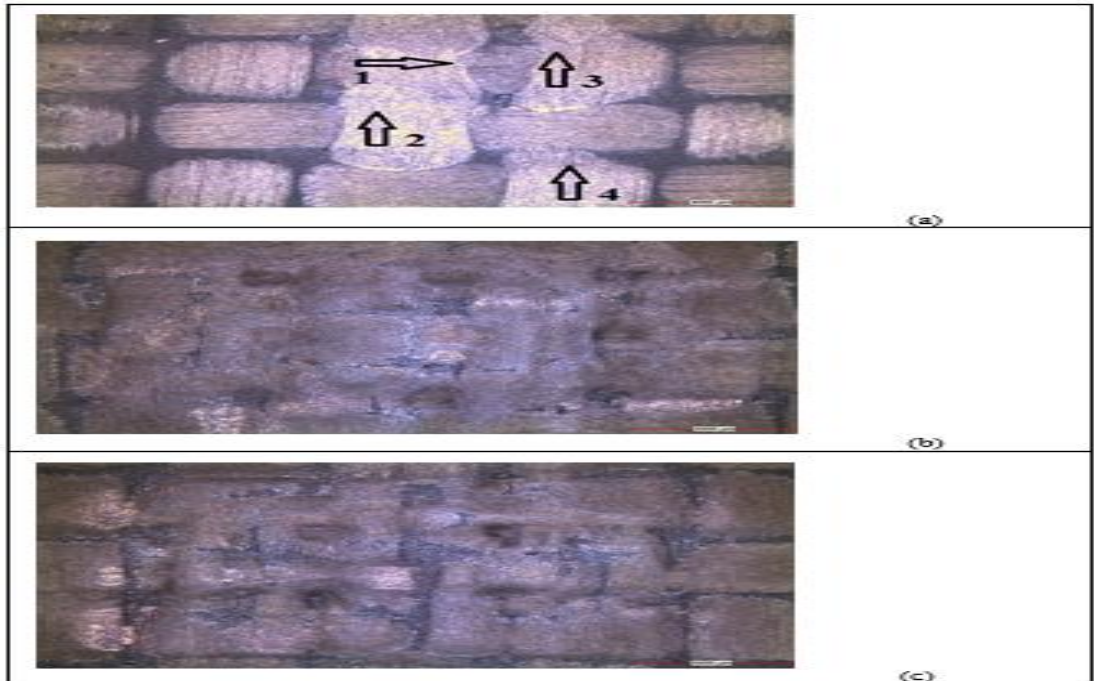
Şekil 5.12'de 80 mesh partikül boyutunda, 0/90 karbon fiber yönlenmesinde ve 15⁰, 60⁰ ve 90⁰ partikül çarpma açıları ile aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin aşınan yüzeylerinin stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.12-a incelendiğinde mikrosürme ve mikrokesme aşınma mekanizmalarına ait aşınma izleri görülmektedir. Şekil 5.12-a'da fiberlerin eğildiği ve daire ile gösterilen kısımlarda ön yüklenmiş bölgelerin oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.12-b ve şekil 5.12-c incelendiğinde ise aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine adeta dövme işlemi uyguladığı görülmektedir.

Şekil 5.13'de 80 mesh partikül boyutunda, +45/-45 karbon fiber yönlenmesinde ve 15⁰, 60⁰ ve 90⁰ partikül çarpma açıları ile aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin aşınan yüzeylerinin stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.13-a incelendiğinde malzeme yüzeyinde +45/-45 yönünde aşınma izleri görülmektedir. Şekil 5.13-b ve şekil 5.13-c'de aşındırıcı partiküllerin 90⁰ ve 60⁰ açıları ile çarpması halinde baskın aşındırma mekanizması plastik deformasyon meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 5.14'de 60 mesh partikül boyutunda, 0/90 karbon fiber yönlenmesinde ve 15⁰, 60⁰ ve 90⁰ partikül çarpma açıları ile aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin aşınan yüzeylerinin stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.14-a'da aşağıdan yukarıya doğru olan aşınma izlerinin malzeme yüzeyinde mikrosürme ve mikrokesme aşınma mekanizmaları meydana getirdiği görülmektedir. Fiberler kırılıncaya kadar aşınmaya karşı koyar ancak kırıldıktan sonra aksine aşınmayı artırır ve abrazyon etki yapmaya başlar. Şekil 5.14-a'da fiberlerin kırıldığı ve aşınmayı artırdığı görülmektedir. Şekil 5.14-b ve şekil 5.14-c incelendiğinde ise malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküllerin yüzeyde mikrodövme aşınma mekanizması ve buna bağlı plastik deformasyonlar meydana getirdiği görülmektedir. Şekil 5.14-c'nin şekil 5.14-a'dan farklı olarak aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine dik açıda

çarpması neticesinde yapıda ciddi plastik deformasyonlar oluşmuş ve fiberler kırılarak buldukları orijinal doğrultulardan sapmışlardır.

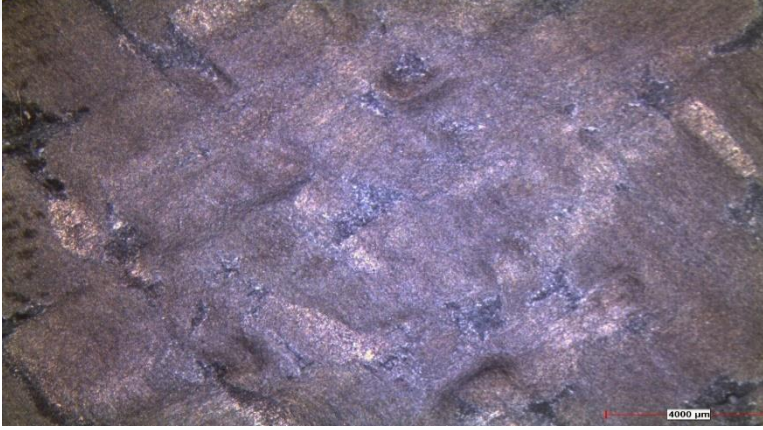
Şekil 5.15’de 60 mesh partikül boyutunda, +45/-45 karbon fiber yönlenmesinde ve 15^0 , 60^0 ve 90^0 partikül çarpma açıları ile aşındırılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin aşınan yüzeylerinin stereo mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.15-a’da +45/-45 yönünde oluşan aşınma izlerinden de anlaşılacağı gibi aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinde süpürme etkisi yarattığı görülmektedir. Şekil 5.15-a’da 1 numaralı ok aşındırıcı partiküllerin yönünü, 2 ve 3 numaralı oklar ise okların bulunduğu kısımdaki örgü fiberin yönünü göstermektedir. 2 numaralı okun bulunduğu kısımda fiberlerin yönü ile aşındırıcı partiküllerin yönü dik olduğundan fiberler eğmeye zorlanarak kırılmakta ve aşınmanın arttığı görülmektedir. 3 numaralı okun bulunduğu kısımda fiberlerin yönü ile aşındırıcı partiküllerin yönü paralel olduğundan çekmeye zorlanan fiberlerin çekme mukavemetinin fazla olması nedeniyle fiberlerin kolayca kopmadıkları görülmektedir. Şekil 5.15-b ve şekil 5.15-c incelendiğinde ise aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyini adeta döverek plastik deformasyona neden olduğu görülmektedir.



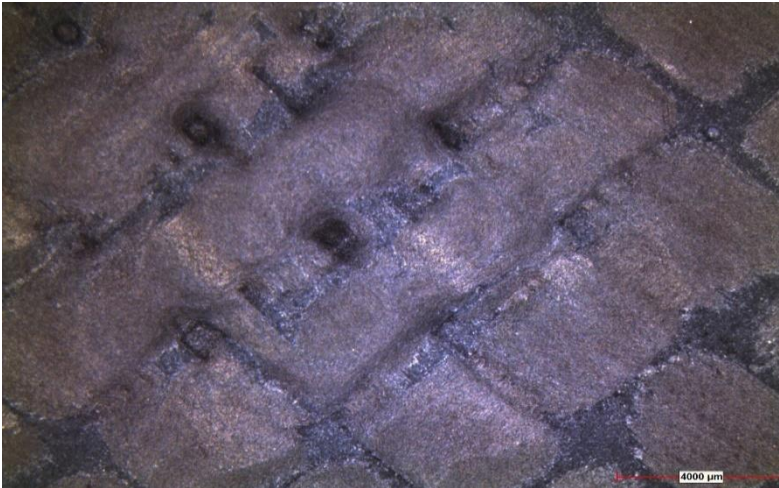
Şekil 5.10. a) 15^0 , b) 60^0 , c) 90^0 partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: 0/90, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)



(a)

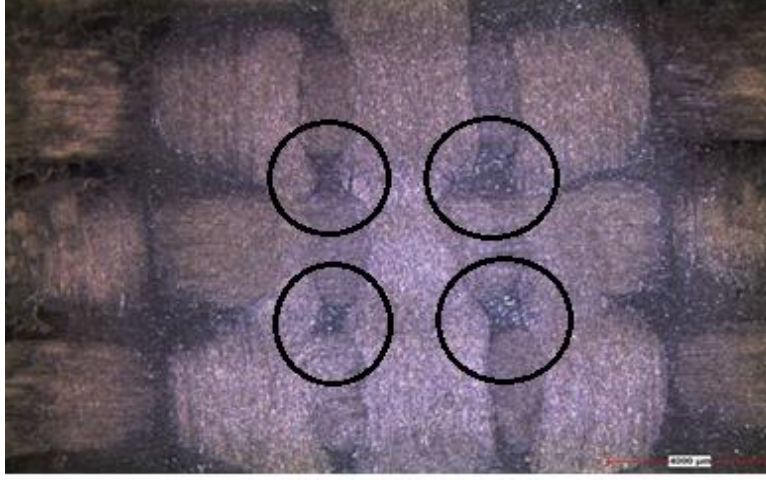


(b)



(c)

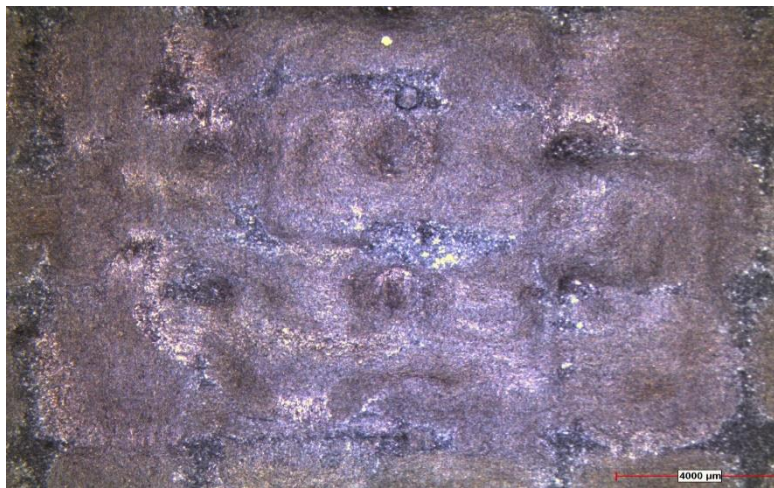
Şekil 5.11. a) 15° , b) 60° , c) 90° partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: $+45/-45$, aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)



(a)



(b)

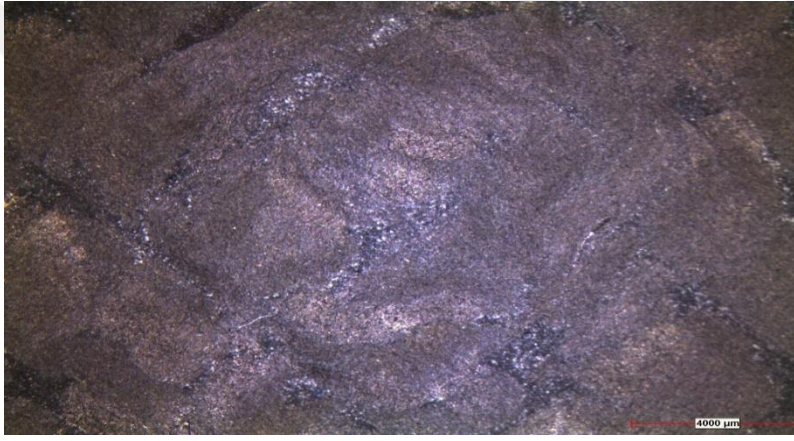


(c)

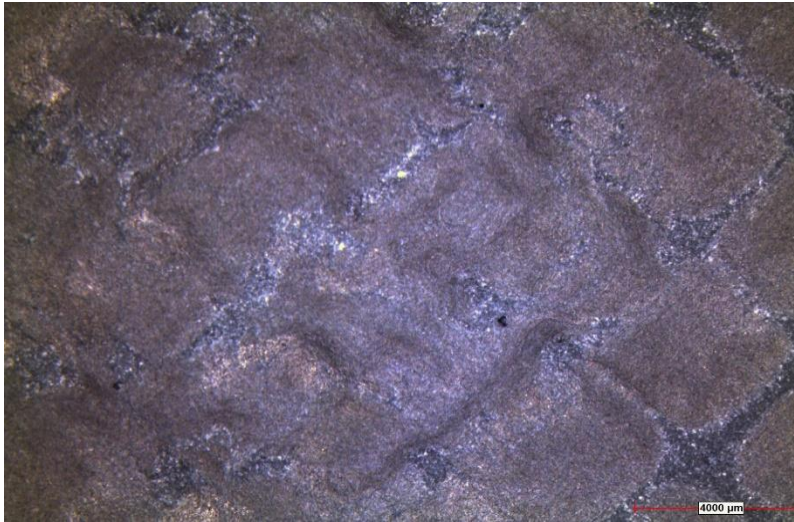
Şekil 5.9. a) 15° , b) 60° , c) 90° partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: 0/90, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)



(a)

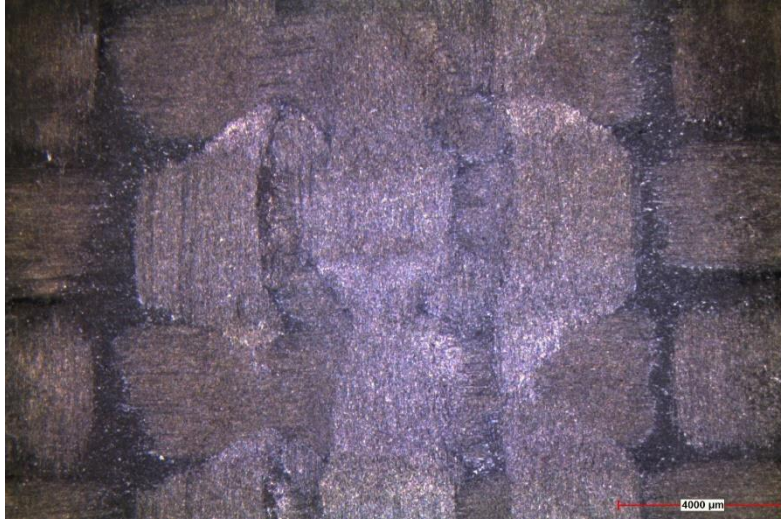


(b)

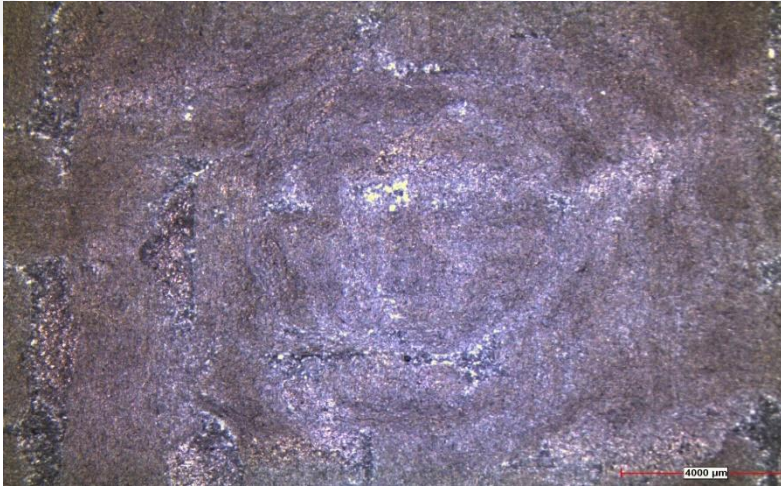


(c)

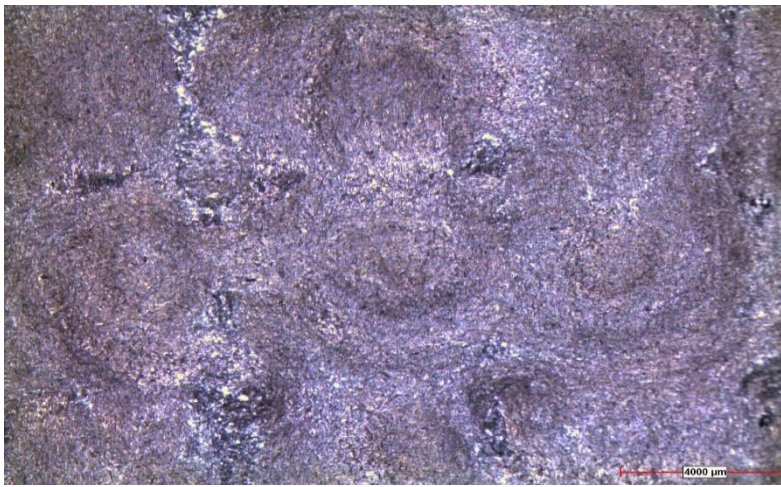
Şekil 5.10. a) 15° , b) 60° , c) 90° partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: $+45/-45$, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)



(a)

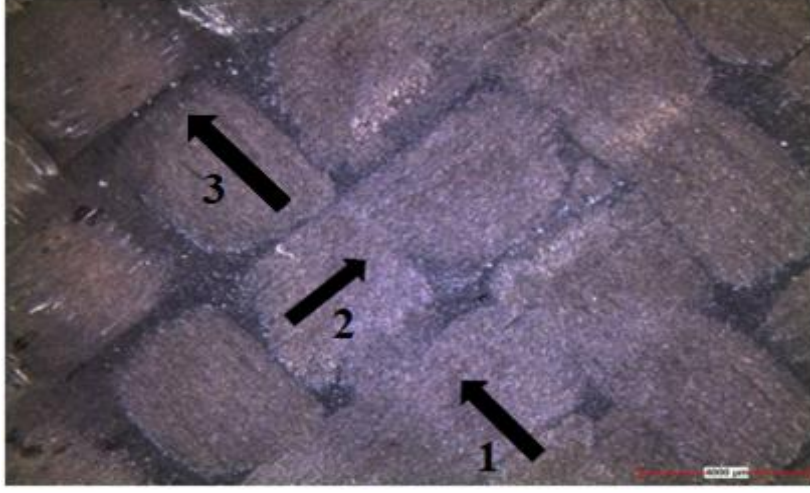


(b)



(c)

Şekil 5.11. a) 15° , b) 60° , c) 90° partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: 0/90, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.12. a) 15° , b) 60° , c) 90° partikül çarpma açısı ile aşındırılmış kompozit numunelerin stereo mikroskop görüntüleri (fiber yönlenmesi: $+45/-45$, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Katı partikül erozyonu karmaşık bir süreçtir. Bu süreç hedef malzeme özellikleri (hedef malzemenin rijitliği, dayanımı, kırılma davranışı, çekme modülü, yüzey özellikleri), aşındırıcı partikül özellikleri (aşındırıcı partikül sertliği, boyutu, şekli, türü), çevresel etkenler (sıcaklık, nem vb.), operasyon parametrelerine (partikül püskürtme basıncı, partikül çarpma açısı, kütleli debi, nozul mesafesi, nozul çapı, proses süresi) bağlıdır.

Tez kapsamında karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin katı partikül erozyonu mekanizmasına etki eden karbon fiber yönelmesinin etkisi, partikül çarpma açısının etkisi ve aşındırıcı partikül boyutunun etkisi incelenmiştir.

Farklı partikül çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°), farklı fiber yönelmesinde (+45/-45 ve 0/90) ve farklı aşındırıcı partikül boyutları (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin katı partikül erozyonu davranışı karakterize edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri hesaplanmış ve bulunan bu değerlerle birlikte aşındırılan numunelerin erozyon oranı hesaplanmıştır, böylelikle operasyon parametrelerinin erozyon oranına etkisi incelenmiştir. Karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin aşındırılan yüzeyleri optik profilometre cihazı ile taranarak elde edilen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri incelenmiştir. Son olarak aşındırılan yüzeylerin stereo mikroskop görüntüleri alınarak uygulanan parametrelerin yüzey morfolojisine olan etkisi incelenmiştir.

Bu bölüm içerisinde tez kapsamında gerçekleştirilen deneyler ve bunların sonuçları deneylerin uygulanış sırasına göre açıklanacaktır.

Farklı boyutlardaki alümina partiküllerin kütleli debilerinin incelenmesi;

Erozyon oranını hesaplamak için 3 bar basınçta 60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh boyutlarındaki aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri hesaplanmıştır. Ayrıca büyük boyutlu aşındırıcı partiküllerin, küçük boyutlu aşındırıcı partiküllere göre kütleli

debilerinin daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar erozyon oranı hesabında, her bir partikül taneciğinin hedef malzemeden ne kadar miktarda malzeme aşındırdığını belirlemek için kullanılmıştır.

Erozyon oranı sonuçlarının uygulanan parametrelere bağlı olarak incelenmesi;

Erozyon oranına partikül çarpma açısının etkisi;

15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° partikül çarpma açılarında farklı fiber yönlenmesinde ve farklı aşındırıcı partikül boyutlarında katı partikül erozyonu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm fiber yönlenmelerinde ve tüm aşındırıcı partikül boyutlarında en yüksek erozyon oranı 60° partikül çarpma açısında meydana gelmiştir. En düşük erozyon oranı ise 15° partikül çarpma açısında meydana gelmiştir. Partikül çarpma açısının artışı ile birlikte 60° partikül çarpma açısına kadar erozyon oranı da artmıştır. Ancak 75° ve 90° partikül çarpma açılarında ise 60° partikül çarpma açısına göre erozyon oranı azalmıştır. Bu sonuçlar ile karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin yarı sünek erozif aşınma davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Erozyon oranına aşındırıcı partikül boyutunun etkisi;

60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile farklı partikül çarpma açılarında ve farklı fiber yönlenmelerinde katı partikül erozyonu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm fiber yönlenmelerinde ve tüm partikül çarpma açılarında en yüksek erozyon oranı 80 mesh aşındırıcı partikül boyutunda meydana gelmiştir.

Erozyon oranının fiber yönlenmesine etkisi;

+45/-45 ve 0/90 karbon fiber yönlenmesi ile farklı partikül çarpma açılarında ve farklı aşındırıcı partikül boyutlarında katı partikül erozyonu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm partikül çarpma açılarında ve tüm aşındırıcı partikül boyutlarında +45/-45 karbon fiber yönlenmesinin en yüksek erozyon oranına sahip olduğu görülmüştür.

2 ve 3 boyutlu yüzey görüntülerinin incelenmesi;

Tüm karbon fiber yönlenmelerinde, tüm partikül çarpma açılarında ve tüm aşındırıcı partikül boyutlarında gerçekleştirilen katı partikül erozyonu deneyinden sonra aşınan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri incelenmiştir. Tüm partikül boyutları ve

tüm fiber yönlenmeleri ile 15^0 , 60^0 ve 90^0 partikül çarpma açılarında gerçekleştirilen numunelerin yüzey görüntüleri kullanılarak yorumlanmıştır. Bunun sonucunda düşük partikül çarpma açılarında (15^0) aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinde süpürme etkisi gösterdiği, yüksek partikül çarpma açılarında ise (60^0 ve 90^0) aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyini döverek derin çukurlar meydana getirdiği görülmektedir.

Yüzey morfolojilerinin incelenmesi;

Tüm karbon fiber yönlenmelerinde, tüm partikül çarpma açılarında ve tüm aşındırıcı partikül boyutlarında gerçekleştirilen katı partikül erozyonu deneyinden sonra aşınan yüzeylerin yüzey morfolojileri incelenmiştir. Tüm partikül boyutları ve tüm fiber yönlenmeleri ile yalnızca 15^0 , 60^0 ve 90^0 partikül çarpma açılarında gerçekleştirilen numunelerin yüzey morfolojileri yorumlanmıştır. Stereo mikroskop görüntüleri ile 15^0 , 60^0 ve 90^0 partikül çarpma açılarında gerçekleşen hasar mekanizmaları incelenmiştir. 15^0 partikül çarpma açısında aşınmış yüzeylerde mikrosürme ve mikrokesme şeklinde aşınma mekanizmaları gözlenirken, 60^0 ve 90^0 partikül çarpma açısında ise yüzeylerde dövmenin etkisiyle plastik deformasyonlar meydana gelmiştir. Dikleşen çarpma açılarında mikrosürme ve mikrokesmenin yanında mikrodövme erozif aşınma mekanizması gerçekleştiği görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar neticesinde bu tez çalışmasından çıkarılacak öneriler şu şekildedir;

Çalışma şartlarında karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin katı partikül erozyonuna uğradığı endüstriyel uygulamalar bu sonuçlar dikkate alınarak gözden geçirilebilir. Erozif aşınma deneyleri sonucunda görülmüştür ki karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeler 60^0 partikül çarpma açısında maksimum erozyon oranına sahip olmaktadır. Bu nedenle mekanik ve/veya termal özellikleri karşılması nedeni ile edinmiş olduğu kullanım alanlarında yapılan dizaynlarda erozif aşınmaya maruz kalacak parçaların 60^0 partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz kalmayacak şekilde tasarımlarının yapılması üzerinde durulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bora M.Ö., Polimer Kompozitlerin Tekrarlı Darbe Yüklemeleri Altındaki Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007, 233134.
- [2] Kaw A.K., *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., CRC Press, New York, 2006.
- [3] Umair S., Environmental Impacts of Fiber Composite Materials, Master Thesis, Kungliga Tekniska Högskolan Institute of Technology, Department of Urban Planning and Environment, Stockholm, 2006.
- [4] Daniel I.M., Ishai O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Oxford University Press, New York, 1994.
- [5] Kazanç V., Kompozit Malzemeler ve Mekanik Özellikleri, Bitirme Ödevi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, 2002.
- [6] Meyers M., Chawla K., *Mechanical Behavior of Materials*, 2nd ed., Cambridge University Press, United Kingdom, 2009.
- [7] Ali M., Joshi S.C., Thariq M., Sultan H., Palliatives for Low Velocity Impact Damage in Composite Laminates, *Advances in Materials Science and Engineering*, DOI: 10.1155.
- [8] Ekh J., Multi-Fastener Single-lap Joints in Composite Structures, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, Stockholm, 2006, C825856.
- [9] Campbell F.C., *Structural Composite Materials*, 1st ed., ASM International, United States, 2010.
- [10] Bayraktar Ö., Öngerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2016, 431090.
- [11] Sönmez F.C., Performance Analysis of Repaired Carbon Fiber Composite Materials Which Have Been Manufactured In Aerospace Industry, Master Thesis, University of Turkish Aeronautical Association, Institute of Science and Technology, Ankara, 2016, 438727.
- [12] Püskül H., Effects of Different Fibre Orientations of Composite Materials on The Performance of Adhesively Bonded Joints, Master Thesis, University of Turkish Aeronautical Association, Institute of Science and Technology, Ankara, 2016, 420289.

- [13] Fidan S., Polimer Matrisli Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi ve Oluşan Hasarların Mikro Tomografi Yöntemiyle İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 301641.
- [14] İçli S., Polimerik Kompozitler: Geleceğin Teknolojileri, I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu ve Sergisi, İzmir, Türkiye, 17-19 Kasım 2006.
- [15] Kutz M., Mechanical Engineer's Handbook Materials and Engineering Mechanics, 4th ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2015.
- [16] Ricker R.E., Escalante E., Stoudt M.R., Environmental Effects on Polymer Matrix Composites, *Tri-Service Conference on Corrosion*, Gaithersburg, MD USA, 12-14 May 1992.
- [17] Demirel A., Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007, 212872.
- [18] Sınmazçelik T., Makina Elemanlarında Kompozit Malzeme Kullanımı, Özellikleri ve Tasarım İlkeleri, *Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi*, Konya, Türkiye, 02-03 Kasım 2001.
- [19] Baker A., Dutton S., Kelly D., *Composite Materials for Aircraft Structures*, 2nd ed., AIAA Education Series, Virginia, 2004.
- [20] Vasiliev V.V., Morozov E.V., *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements*, 3rd ed., Elsevier, United Kingdom, 2013.
- [21] Vasiliev V.V., Morozov E.V., *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements*, 2nd ed., Elsevier, United Kingdom, 2007.
- [22] Mouritz A.P., *Introduction to Aerospace Materials*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2012.
- [23] Bolton W., *Engineering Materials Technology*, 2nd ed., Newnes, Great Britain, 1993.
- [24] Arabul H., Epoksi Reçine Maddesinin Yüksek Gerilim Altında Çalışan Ölçü Transformatörlerinde Kullanılışı, *Elektrik Mühendisleri Odası*, 1967, **126**, 47-57.
- [25] Akovalı G., *Handbook of Composite Fabrication*, 1st ed., Rapra Technology Limited, Shawbury, 2001.
- [26] Bingöl Y.C., Karbon-Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Bisiklet Kadrosu Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 243620.
- [27] Stokke D.D., Wu O., Han G., *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites*, 1th ed., John Wiley & Sons, New Delhi, 2014.

- [28] Bai J., *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, 1th ed., Woodhead Publishing, New Delhi, 2013.
- [29] Onat A., Kompozit Malzemeler Ders Notu, Scribd, <https://tr.scribd.com/document/360965390/Kompozit-Malzemeler-Ders-Notu> (Ziyaret Tarihi: 25.03.2018).
- [30] Inagaki M., Kang F., *Materials Science and Engineering of Carbon: Fundamentals*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014.
- [31] Kara F., Karbon Elyaf Takviyeli Otomotiv Fren Balata Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2011, 290905.
- [32] Davim J.P., *Tribology for Engineers*, 1st ed., Woodhead Publishing, New Delhi, 2011.
- [33] Yürüker E., Aşındırıcı Partikül Boyut Dağılımının Erozif Aşınmaya Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 259424.
- [34] Biswas S., Satapathy A., Erosion Wear Behavior of Polymer Composites: A Review, *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, DOI: 10.1177
- [35] Fischer T., *Materials Science for Engineering Students*, 1st ed., Academic Press, Canada, 2009.
- [36] Avcu E., Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu ile Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 348736.
- [37] Barkoula N. M., Karger J. K., Processes And Influencing Parameters of The Solid Particle Erosion of Polymers and Their Composites, *Journal of Materials Science*, 2002, **37**, 3807– 3820.
- [38] Kaundal R., Role of Process Variables on the Solid Particle Erosion of Polymer Composites: A Critical Review, *Silicon*, DOI 10.1007/s12633.
- [39] Barkoula N. M., Kocsis J. K., Processes and Influencing Parameters of The Solid Particle Erosion of Polymers and Their Composites, *Journal of Materials Science*, 2002, **37**, 3807-3820.
- [40] Yadav G., Tiwari S., Rajput A., Jatola R., Jain M.L., A Review: Erosion Wear Models, *International Conference on Emerging Trends in Mechanical Engineering*, Zhuhai, China, 27-28 Mayıs 2016.
- [41] Yıldırım Y., 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342538.

- [42] Amirthan G., Udayakumar A., Prasad B., Balasubramanian M., Solid Particle Erosion Studies On Biomorphic Si/Sic Ceramic Composites, *Wear*, 2010, **268**, 145–152.
- [43] Tewari U. S., Harsha A. P., Hager A. M., Friedrich K., Solid Particle Erosion of Carbon Fibre and Glass Fibre Epoxy Composites, *Composites Science and Technology*, 2003, **63**, 549-557.
- [44] Bhushan B., *Principles and Applications of Tribology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2013.
- [45] Çelik Y.H., Kılıçkap H., Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Çubukların Aşınma Davranışlarının Araştırılması, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2016, **13**(3), 69-74.
- [46] Zhang N., Yang F., Shen C., Castro J., Lee J.L., Particle Erosion on Carbon Nanofiber Paper Coated Carbon Fiber/Epoxy Composites, *Composites*, 2013, **54**, 209-214.
- [47] Rao K.S., Varadarajan Y.S., Rajendra N., Erosive Wear Behaviour of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite, *Materials Today: Proceedings*, 2015, **2**, 2975-2983.
- [48] Vijay B.R., Srikantappa A.S., Study on Erosive Wear Behaviour of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites With and Without Filler – An Ann Approach, *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering*, 2016, **4**, 156-166.
- [49] Hussein A.B.A., Hashim F.A., Erosion Wear behavior of Micro Material Reinforced Polymer Composites, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2016, **7**(2), 972-983.
- [50] Mohan N., Natarajan S., Kumaresh Babu S. P., Siddaramaiah S., Lee J.H., Studies on Erosive Wear Behavior of UHMWPE-Filled Aramid-Epoxy Hybrid Composites, *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, **27**(4), 430-435.
- [51] Mohan N., Maheshaa C.R., Rajaprakashb B.M., Erosive wear behaviour of WC filled glass epoxy composites, *Procedia Engineering*, 2013, **68**, 694 – 702.
- [52] Sarı N.J., Sınmazçelik T., Yılmaz T., Erosive Wear Studies of Glass fiber- and Carbon Fiber-Reinforced Polyetheretherketone Composites at Low Particle Speed, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2011, **24**, 333-350.
- [53] Karataş A., İkili Seramik Malzemelerin Birlikte Presleme-Sinterleme, Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2014, 373788.
- [54] Deliwala A.A., Peter M.R., Yerramalli C.S., A Multiple Particle Impact Model for Prediction of Erosion in Carbon-Fiber Reinforced Composites, *Wear*, 2018, **406**, 185-193.

ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Çanakkale’de doğdu. 2011 yılında Biga Mehmet Akif Ersoy Lisesi’nden mezun olarak, aynı sene Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde öğrenimine başladı. 2013 yılında yatay geçiş programı kapsamında Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümün’de öğrenimine devam etti ve 2016 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

