



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KOROZİF ORTAMIN GRAFEN KATKILI
BAZALT/EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN
MEKANİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

Emine Feyza ŞÜKÜR

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Emine Feyza ŞÜKÜR tarafından hazırlanan “Korozif Ortamın Grafen Katkılı Bazalt/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik ve Aşınma Özelliklerine Etkisi” adlı tez çalışması 12/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL

Üye

Prof. Dr. Behçet DAĞHAN

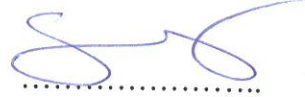
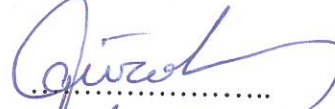
Üye

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZTÜRK

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması S.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından 17401100 nolu proje ve S.Ü. Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı Koordinatörlüğü (ÖYP) tarafından 2015-ÖYP-139 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Emine Feyza ŞÜKÜR

12.07.2019

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KOROZİF ORTAMIN GRAFEN KATKILI BAZALT/EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN MEKANİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Emine Feyza ŞÜKÜR

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL

2019, 165 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Behçet DAĞHAN
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZTÜRK

Bu tezde; grafen nanoplatelet (GNP) katkısının bazalt fiber takviyeli polimer (BFRP) kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Epoksi matris (EP) içerisine ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5 ve 0.7 oranlarında GNP katkısı yapılmıştır. Nanokompozitler el yatırması ve vakum torbalama yöntemleri birlikte kullanılarak iki aşamada üretilmiştir. Katkısız bazalt fiber takviyeli epoksi (Epoksi/BF) kompozit ve GNP katkılı bazalt fiber takviyeli epoksi (GNP-Epoksi/BF) nanokompozitlerin sertlik ve yoğunluk ölçümleri, çekme ve aşınma testleri ASTM standartlarına uygun olarak oda sıcaklığında (25±3 °C) gerçekleştirilmiştir. Tribolojik özellikler ball-on-disk aşınma test cihazında, yüksek sertlik (62 HRC) ve aşınma direncine sahip krom çeliği bilye kullanılarak 0.75 ms⁻¹ kayma hızında, sabit yükler (10 N ve 15 N) altında incelenmiştir. Korozif ortamın etkilerini incelemek için BFRP kompozit malzemeler 2, 4 ve 6 ay süresince tuzlu suda yaşlandırılmıştır. Her iki aylık periyot sonunda çekme ve aşınma testleri tekrarlanarak normal ortam test sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. GNP katkısının termal kararlılık üzerindeki etkileri TGA analizleriyle belirlenmiştir. Çekme ve aşınma testlerine tabi tutulan kompozitlerin hasar mekanizmaları, tuzlu suda yaşlandırılan kompozitlerde meydana gelen bozunma, tuzlu suyun matris ve fiberler üzerindeki tahrip edici etkileri, SEM görüntüleriyle incelenmiştir. Kompozitlerin yüzeylerinde meydana gelebilecek elementer çökelmeler, kimyasal etkileşimler veya yapıdaki yeni bağ oluşumları, EDX, FT-IR analizleri ve AAS ölçümleriyle yorumlanmıştır.

GNP katkısı EP/BF kompozitlerde fiber-matris arayüz etkileşimini güçlendirerek, çekme mukavemeti, % uzama ve elastisite modülü değerlerinde belirgin artışlar sağlamıştır. Katı yağlayıcı özelliğiyle bilinen GNP'ler temas bölgelerinde sürtünmeyi azaltarak sürtünme katsayısının düşürülmesinde etkili olmuştur. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin Epoksi/BF kompozitlerle kıyaslandığında aşınma miktarları düşük, aşınma dirençleri yüksektir. Tuzlu suda yaşlandırma sırasında GNP'ler bariyer etkisi göstermiş, matris içerisine su alımını azaltmıştır. Su absorpsiyonu düşük olan nanokompozitlerde daha az hasara uğrayan EP matris fiberleri korumaya devam ederek, hasarın fiberlere ulaşmasını geciktirmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, bazalt fiber, epoksi, grafen nanoplatelet, nanokompozit, tuzlu su, yaşlandırma

ABSTRACT

PhD THESIS

THE EFFECT OF CORROSIVE ENVIRONMENT ON MECHANICAL AND WEAR PROPERTIES OF GRAPHENE FILLED BASALT/EPOXY NANOCOMPOSITES

Emine Feyza ŞÜKÜR

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assistant Professor Gürol ÖNAL

2019, 165 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Gürol ÖNAL
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Behçet DAĞHAN
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Asst. Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

The effects of graphene nanoplatelet (GNP) additive on the mechanical and tribological properties of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) composites were investigated experimentally in this thesis. The weight percentage of 0.1, 0.3, 0.5 and 0.7% GNP was added to the epoxy matrix (EP). Nanocomposites were produced in two stages using hand lay-up and vacuum infusion methods. Hardness and density measurements, tensile and wear tests of pure basalt fiber reinforced epoxy (Epoxy/BF) composite and GNP filled basalt fiber reinforced epoxy (GNP-Epoxy/BF) nanocomposites were carried out at room temperature (25 ± 3 °C) in accordance with ASTM standards. Tribological properties were investigated in the ball-on-disk wear tester under constant loads (10 N and 15 N) at a sliding speed of 0.75 ms^{-1} using chromium steel balls with high hardness (62 HRC) and wear resistance. BFRP composite materials were aged in salt water for 2, 4 and 6 months, in order to investigate the effects of corrosive environment. At the end of the two-month period, tensile and wear tests were repeated and the results were compared with the normal ambient test results. The effects of GNP contribution on thermal stability were determined by TGA analysis. The damage mechanisms of the composites subjected to tensile and wear tests, degradation of the composites aged in salt water, and the destructive effects of salt water on the matrix and fibers were examined by SEM images. Elementary sedimentation, chemical interactions or new bond formation in the structure, which may occur on the surfaces of composites, were interpreted by EDX, FT-IR analysis and AAS measurements.

GNP additive strengthened fiber-matrix interface interaction in Epoxy/BF composites, resulting in significant increases in tensile strength, % elongation and modulus of elasticity. GNPs, known as solid lubricant, have been effective in reducing the coefficient of friction in contact areas. GNP-Epoxy/BF nanocomposites have lower wear and higher wear resistance compared to Epoxy/BF composites. During salt water aging, GNPs showed a barrier effect and reduced water intake into the matrix. EP matrix fibers, which showed less damage in nanocomposites with low water absorption, continued to protect and delayed damage to the fibers.

Keywords: Aging, basalt fiber, epoxy, graphene nanoplatelet, nanocomposite, salt water, wear

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamda bana her türlü bilimsel katkı ve desteği veren, çalışmalarım konusunda beni teşvik ve motive eden danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gürol Önal'a değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Tez çalışmam süresince öneri ve tavsiyeleriyle tezime katkı sağlayan Tez İzleme Komitesi Üyesi hocalarım Prof. Dr. Behçet Dağhan ve Dr. Öğr. Üyesi Ali Öztürk'e teşekkürlerimi sunarım. Tezle ilgili görüş ve önerilerini hiçbir zaman esirgemeyen, birikim ve tecrübelerini her daim paylaşan hocalarım Prof. Dr. Ahmet Avcı ve Prof. Dr. Ömer Sinan Şahin'e teşekkür ederim. Tezimde kompozit malzemelerin üretiminden, deneysel çalışmaların yürütülmesine kadar bana her aşamada yardımcı olan, tezimin tamamlanmasında her türlü katkı ve desteği sağlayan Arş. Gör. Halil Burak Kaybal ve Öğr. Gör. Hasan Ulus'a sonsuz teşekkür eder, minnetlerimi sunarım. Çalışmalarımda fikir ve önerileriyle bana destek olan Dr. Okan Demir ve Arş. Gör. Ahmet Caner Tatar'a teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her anında sevgilerini ve her türlü desteklerini sonsuz hissettiğim, bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan kıymetli anne ve babama, kardeşlerime sonsuz teşekkür eder, sevgi ve minnetlerimi sunarım.

Emine Feyza ŞÜKÜR
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	7
2.1.1. Termoplastikler	8
2.1.2. Termosetler	9
2.2. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	11
2.3. Bazalt Fiber Takviyeli Polimer (BFRP) Kompozit Malzemeler	14
2.3.1 Bazalt	14
2.3.2. Bazalt fiber üretimi	16
2.3.3. Bazalt ve bazalt fiberlerin kullanım alanları	19
2.4. Nanokompozit Malzemeler.....	23
2.4.1. Grafen nanopartiküller (GNP)	25
2.4.2. Grafen nanopartiküllerin termal iletkenliği	27
2.4.3. Bariyer plastikleri ve GNP'lerin bariyer etkisi	28
2.4.4. GNP bazlı polimer nanokompozitler	29
2.5. Polimer Kompozit ve Nanokompozit Malzemelerin Aşınması.....	32
2.6. Korozif Ortamın Kompozit Malzemeler Üzerindeki Etkileri.....	36
2.6.1. Su absorpsiyonu	36
2.6.2. Polimer matrise etkileri.....	37
2.6.3. Bazalt fiberlere etkileri	38
2.7. Literatürde Yapılan Çalışmalar.....	40
2.7.1. BFRP kompozitlerin mekanik özellikleri	40
2.7.2. BFRP kompozitlerin tribolojik özellikleri	45
2.7.3. Korozif çalışma şartları altında BFRP kompozitler.....	49
2.8. Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri.....	54
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	56
3.1. Malzemeler	56
3.1.1. Epoksi	56
3.1.2. Bazalt fiber.....	56
3.1.3. Grafen nanoplatelet (GNP)	57
3.2. Nanokompozit Malzeme Üretimi	59
3.2.1. Grafen katkı oranlarının belirlenmesi	59
3.2.2. Nanokompozit levhaların üretimi	60

3.3. Mekanik Karakterizasyon	62
3.3.1. Yoğunluk Ölçümü.....	62
3.3.2. Sertlik Ölçümü.....	63
3.3.3. Çekme Testi	64
3.4. Tribolojik Karakterizasyon	67
3.4.1. Sürtünme ve aşınma testleri.....	67
3.4.2. Temas bölgesi sıcaklıklarının ölçümü	71
3.5. Tuzlu Suda Yaşlandırma Testi.....	72
3.6. Analizler.....	73
3.6.1. Termogravimetrik analiz.....	73
3.6.2. Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi analizi.....	74
3.6.3. X-ışını difraktometresi analizi	76
3.6.4. Taramalı elektron mikroskobu görüntü analizi.....	76
3.6.5. Enerji yayımlı x-ışını analizi	77
3.6.6. Atomik absorpsiyon spektroskopisi analizi	78
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	79
4.1. GNP-Epoksi Nanokompozitlerin Karakterizasyonu.....	79
4.2. GNP-Epoksi/BF Nanokompozitlerin Termal ve Mekanik Karakterizasyonu	85
4.2.1. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin çekme testleri	85
4.2.2. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin çekme testleri.....	88
4.2.3. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin hasar analizleri	94
4.2.4. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin termal özellikleri	100
4.3. GNP-Epoksi/BF Nanokompozitlerin Tribolojik Karakterizasyonu	103
4.3.1. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin sürtünme ve aşınma testleri.....	103
4.3.2. Aşınma yüzeylerinin hasar analizi.....	116
4.3.3. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin sürtünme ve aşınma testleri.....	120
4.3.4. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin hasar analizleri.....	128
4.3.5. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin EDX analizleri	134
4.3.6. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin FTIR analizleri.....	138
4.3.7. Aşınma kalıntılarının XRD analizi	142
4.3.8. Tuzlu suyun atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS) ölçümleri.....	144
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	145
5.1 Sonuçlar	145
5.2 Öneriler	148
ÖZGEÇMİŞ	165
KAYNAKLAR	149

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	: Temas alanı (mm^2)
A	: Ortalama kesit alanı (mm^2)
d	: Derinlik (mm)
E_1	: Aşındırıcı bilyenin elastisite modülü (GPa)
E_2	: Kompozit malzemenin elastisite modülü (GPa)
E_f	: Çekme elastisite modülü (MPa)
F_N	: Uygulanan yük (N)
L	: Ekstansometre gage uzunluğu (mm)
L	: Kayma mesafesi (m)
m_i	: Numunenin yaşlandırma öncesinde başlangıçtaki kütlesi (g)
m_k	: Numunenin havadaki kuru ağırlığı (g)
m_s	: Numunenin yardımcı sıvıdaki ağırlığı (g)
m_t	: Numunenin t yaşlandırma zamanındaki kütlesi (g)
p_{max}	: Maksimum yüzey basıncı (MPa)
P	: Yük (N)
P_{max}	: Numunenin taşıyabildiği maksimum yük (N)
V_b	: Kompozitlerin boşluk hacim oranları
w_f	: Fiber ağırlık fraksiyonu
w_m	: Matris ağırlık fraksiyonu
w_p	: Partikül ağırlık fraksiyonu
W_s	: Özgül aşınma miktarı (mm^3/Nm)
ρ	: Numune yoğunluğunu (g/mm^3)
ρ_d	: Numunenin deneysel yoğunluğu (g/cm^3)
ρ_f	: Fiberin yoğunluğu (g/cm^3)
ρ_m	: Matrisin yoğunluğu (g/cm^3)
ρ_p	: Partikülün yoğunluğu (g/cm^3)
ρ_{ct}	: Kompozitlerin yoğunluğu (g/cm^3)
ρ_s	: Yardımcı sıvının (su) yoğunluğu (g/cm^3)
ρ_h	: Havanın yoğunluğu (g/cm^3)
δ	: Yer değiştirme (mm)
δ_i	: Yer değiştirme (mm)
σ_i	: Numunede i'inci kuvvet anında oluşan gerilme (MPa)
σ_{max}	: Numunede oluşan maksimum gerilme (MPa)
ε_i	: i'inci yer değiştirme noktasındaki şekil değiştirme miktarı
$\Delta\sigma$: Seçilmiş iki gerilme noktası arasındaki fark (MPa)
$\Delta\varepsilon$: Seçilmiş iki şekil değiştirme miktarı arasındaki farkı
Δ_m	: Aşınan numunenin ağırlık kaybı (g)
v_1	: Aşındırıcı bilyenin poison oranı
v_2	: Kompozit malzemenin poison oranı

Kısaltmalar

AAS	: Atomik absorpsiyon spektroskopisi
ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BF	: Bazalt fiber
BFRP	: Bazalt fiber takviyeli polimer
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
EDX	: Enerji yayımlı x-ışını
EP	: Epoksi matris
FRP	: Fiber takviyeli polimer
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi
GFRP	: Cam fiber takviyeli polimer
GNP	: Grafen nanoplatelet
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik analiz
VARI	: Vakum destekli reçine infüzyonu
XRD	: X-ışını difraktometresi

1. GİRİŞ

İnsanlığın gelişimi tarih boyunca malzemelerdeki gelişmeler ile yakından ilgili olmuştur. Yeni malzemelerin keşfi dönemlere adını vermiş, tarihte birçok çağ ilk defa o dönemde kullanılan malzemelere atfedilerek yani taş çağı, bronz çağı ve demir çağı gibi isimler almıştır. 20. yüzyıldan itibaren çeşitli endüstrilerin odağı yapısal rijitliği feda etmeden daha hafif ve yüksek özgül mukavemetli yeni malzemelerin geliştirilmesi olmuştur (Karthikeyan, 2017). Yeni nesil malzemelere duyulan ihtiyaç, geleneksel yapı malzemelerine alternatif olabilecek kompozit malzeme sınıfını malzeme bilimine kazandırmıştır. Kompozit malzemeler, birbiri içerisinde çözünmeyen birden fazla malzemenin makroskopik düzeyde bir araya getirilmesiyle, her birinin sahip olduğu üstün özellikleri tek bir malzemede sunabilmektedir. Kompozit malzemelere artan ilgi yalnızca sektörün yapısal bileşenlerin ağırlığını azaltma talebiyle değil aynı zamanda kompozitler tarafından sunulan kayda değer “ek işlevsellikler” ile yakından ilgilidir. Endüstriyel alanda 1930’lu yıllardan itibaren kullanılan kompozit malzemelerin tarihi daha eskilere dayanmaktadır. Dövme kılıçlar, samanla takviye edilmiş kilden yapılan kerpiç evler bilinen en eski kompozit malzeme uygulamalarıdır. Yapısında, lignin ve selüloz bulunan tahta; kalsiyum, fosfat ve kolajen bulunan kemik doğal kompozitlere örnek olarak verilmektedir.

Termoset, termoplastik ve elastomer gibi çeşitli polimer matrisler, cam, aramid/kevlar ve karbon gibi yüksek performanslı sentetik fiberlerle takviye edilerek üstün mekanik özelliklere sahip mühendislik malzemeleri üretilmektedir. Yaygın olarak kullanılan sentetik fiber takviyelerin tamamının petrol kaynaklı olmaları araştırmacıları doğal kaynaklardan elde edilebilecek fiber çeşitlerini araştırmaya yöneltmiştir. Bitkisel, hayvansal ve mineral kaynaklı fiberler doğal fiberlere örnek olarak gösterilebilir. Polimer kompozitlerde takviye olarak kullanılan önemli fiberlerden biri de bazalt fiberdir. Bazalt fiberin en önemli özelliği şüphesiz mineral kaynaklı olmasıdır (Kaya, 2016). Bazalt, 1923’te Amerikalı bilim adamları tarafından keşfedilmesinden itibaren ikinci dünya savaşı sırasında Birleşik Devletler (ABD), Avrupa ve Sovyetler Birliği tarafından savunma ve havacılık uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmıştır. Bazalt fiberleri cam ve karbon gibi diğer sentetik fiberlerden avantajlı kılan yüksek sıcaklıklara ve kimyasallara karşı gösterdiği direncin yanında toksik olmamaları, çevre dostu ve ucuz olmalarıdır (Dhand ve ark., 2015).

Cam, karbon ve bazalt gibi fiber takviyeli kompozit malzemeler kanolar, balıkçı tekneleri, devriye botları, mayın avlama gemileri gibi deniz taşıtlarında, deniz altı gövdelerinde ve dirseklerinde, sonar kubbelerde kullanılmaktadır. Güverte ızgaraları, açık deniz sondaj platformları, alçak basınçlı borular, depolama tankları, köprü ve iskele direkleri kullanım alanları arasındadır (Kootsookos ve Mouritz, 2004). Ancak deniz suyu ortamında uzun süreli bir hizmetten sonra kompozitlerin özelliklerinin bozulması kaçınılmazdır. Su gibi küçük moleküllerin polimer matrisine kolayca yayılabilmesi, polimer molekülleri arasındaki ve fiber-matris ara yüzündeki bağın kuvvetini değiştirmektedir (Rege ve Lakkad, 1983). Polimer matrisi ve fiber-matris ara yüzü, reçine içindeki doymamış grupların hidroliz reaksiyonu ile bozunabilmektedir. Deniz suyu maruziyeti matrisin şişmesine ve plastikleşmeye, fiber-matris ara yüzünde ayrılmaya neden olmakta, mekanik özellikleri zayıflatmaktadır. Bu problem, deniz suyunda genellikle üstün kimyasal stabiliteye sahip olan fiber takviyeler ve vinil ester bazlı kompozitler kullanılarak hafifletilebilir (Kootsookos ve Mouritz, 2004). Ancak deniz suyu gibi korozif ortamlarda hizmet verirken uzun vadeli dayanıklılık ve performans verilerinin olmayışı kompozitlerin kullanım alanlarını kısıtlamakta (Wei ve ark., 2011) ve bu alandaki araştırmalara olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Malzemelerin mekanik ve tribolojik özellikleriyle birlikte neme ve kimyasallara karşı dirençlerinin iyileştirilerek, kullanım ömürlerinin uzatılmasında yapılacak çalışmalardan biri temas yüzeylerinin kaplanmasıdır. Kaplama işlemleri genellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Bazı polimer matrislerin yüksek sıcaklıklarda eriyebilmeleri ve fiber takviyelerin ısıya olan duyarlılıkları metallere uygulanan standart kaplama prosedürlerinin kompozit malzemelere uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Kaplama işlemi sırasında önlemler alınmazsa aşırı ısı kompozit malzemeye zarar verebilmektedir (Akçin ve ark., 2013). Son yıllarda nano (10^{-9}) boyutlardaki partiküllerin matris içerisine dispersiyonu ile kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin yanı sıra kaplamaya ihtiyaç duymadan ısı, nem ve korozyon dayanımlarında da önemli ölçüde iyileştirme sağlanmıştır. Nanokompozit olarak adlandırılan bu hibrit malzemelerde, takviye edilen nano partikülün özelliklerine bağlı olarak hem fiber-matris arasındaki bağlanma iyileşmekte, hem de yük transferi kolaylaşmaktadır. Geniş yüzey alanlarına sahip olan karbon nanotüp, grafen ve grafen oksit gibi nano katkılar matris içerisinde homojen olarak dağıtıldıklarında bariyer görevi görerek su emilimini de azaltmaktadır (Starkova ve ark., 2013a; Starkova ve ark., 2013b).

Son zamanlarda, grafen üstün mekanik ve taşınım özellikleri nedeniyle büyük dikkat çekmiştir. Grafen, mükemmel geçirmezlik özelliğine sahip ultra ince iki boyutlu (2D) bir plakadır. Ayrıca, grafenin aromatik halkalarının elektron yoğunluğu, su ve gaz moleküllerinin penetrasyonunu itecek kadar yüksektir (Peretz Damari ve ark., 2018).

“Mucize materyal” olarak adlandırılan grafenin üstün mekanik ve bariyer özelliklerinin dışında bilinen en önemli özelliği katı yağlayıcı maddesi olmasıdır. Geleneksel organik yağlayıcı katkı maddeleri ile karşılaştırıldığında, yağlayıcı katkı maddesi olarak nanopartiküller birtakım avantaja sahiptir; örneğin küçük boyut nanoparçacıkların tribolojik ara yüzlere kolayca girmesine izin verir. Daha da önemlisi, nanopartiküllerin mükemmel kimyasal kararlılığı, daha az zararlı emisyonlara katkıda bulunur ve geleneksel organik katkı maddelerine göre toksisiteyi önemli ölçüde azaltır. Bu da çevresel sürdürülebilirliğin gelişimi açısından çekici olmalarını sağlar. Çeşitli nanoparçacıklar arasında, iki boyutlu grafen ve GO yüksek mukavemet, kolay kayma kabiliyeti, mükemmel Young modülü, yüksek ısıl kararlılık ve iyi iletkenlik gibi yağlama açısından istenen özelliklere sahiptir (Xie ve ark., 2018).

Dünya çapında, araçlarda, makinelerde ve diğer ekipmanlarda sürtünmeyi azaltma ve aşınmaya karşı koruma sağlamak için yeni yüzey, malzemeler ve yağlama teknolojilerinden yararlanarak, sürtünme ve aşınma nedeniyle ortaya çıkan enerji kayıplarının uzun vadede (15 yıl) % 40, kısa vadede (8 yıl) % 18 oranında azaltılabileceği öngörülmektedir. Küresel ölçekte, bu tasarruflar yıllık gayrisafi yurt içi hasılanın (GSYİH) % 1,4'ünü ve uzun vadede toplam enerji tüketiminin % 8,7'sini oluşturmaktadır (Holmberg ve Erdemir, 2017).

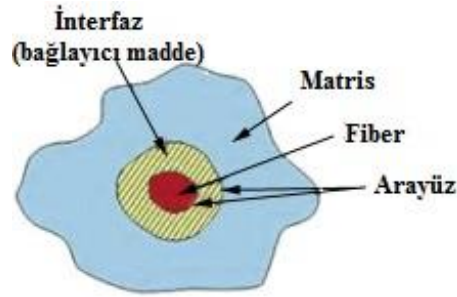
Bu tez çalışmasında korozif ortamın (tuzlu su) ve ağırlıkça farklı grafen nanoplatelet katkı oranlarının (%0.1, 0.3, 0.5, 0.7) bazalt fiber takviyeli epoksi nanokompozitlerin mekanik özellikleri ve aşınma davranışları üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Korozif ortamın etkileri, tuzlu su ortamında yaşlandırma sürelerinin (2,4 ve 6 ay) değişimine bağlı olarak verilmiştir. Kayma aşınmasını etkileyen hız, yük, aşındırıcı ortam gibi parametrelerdeki değişkenliğin aşınma miktarı üzerine etkileri araştırılmıştır. Çekme ve aşınma testlerinin, kompozit malzemelerin hem normal ortamda hem de korozif ortamda yaşlandırılmasından sonra yapılmasıyla, BFRP kompozitlerin özellikle deniz araçlarında, tersanelerde, açık deniz platformlarında, gemi kızakları gibi aşınma ve korozyona uğrayan sistemlerde, korozif malzeme ve kimyasal atık taşıyan boru hatlarında kullanılabilirliği yorumlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Malzemeler, tüm doğal ve insan yapımı yapıların temel unsurlarıdır. Teknolojik ilerleme beraberinde mevcut malzeme özelliklerinin ve performansının iyileştirilmesi zorunluluğunu getirmiş ve yeni malzemelere olan ihtiyaç gündeme gelmiştir. Kompozit malzemeler, 20. yüzyılın ortalarında, modern teknoloji için umut verici yeni bir mühendislik malzemeleri sınıfı olarak ortaya çıkmıştır (Vasiliev ve Morozov, 2018).

Önemli ölçüde farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip olan iki veya daha fazla sayıdaki malzemenin bir araya getirilmesiyle üretilen farklı özelliklerdeki yeni malzemeye kompozit malzeme adı verilmektedir. Bir malzemenin kompozit malzeme olarak sınıflandırılabilmesi için; kimyasal bileşimleri birbirinden farklı belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemedен oluşması, farklı malzemelerin üç boyutlu olarak bir araya getirilmesi ve bileşenlerin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması gibi şartları sağlaması gerekmektedir (Askeland, 1998). Kompozit malzemeleri karışımlardan ve katı çözeltilerden ayıran, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin yapı içerisinde birbirlerinden ayrı ve farklı kalmasıdır. Kompozit bir yapı oluşturarak malzemelerin mukavemet, sertlik, korozyon direnci, aşınma direnci, yorulma ömrü, ısı yalıtımı, termal iletkenlik ve akustik yalıtım gibi çeşitli özellikleri geliştirilebilmektedir (Jones, 2014). Gelişmiş kompozitler, çelik gibi geleneksel malzemelerle kıyaslandığında yüksek akma sınırı, yüksek kopma uzaması, yüksek korozyon direnci, yüksek yorulma direnci, titreşim absorbe edebilme, düşük ağırlık, azaltılmış bakım ve dolayısıyla düşük ömür maliyeti gibi birçok avantaj sunmaktadır. En büyük dezavantajı ise üretim ve ilk maliyetinin yüksek olmasıdır (Hollaway ve Head, 2000).

Kompozit malzemelerin yapısı, matris ve takviye olmak üzere iki bileşenden oluşur ve bu iki bileşen arasında spesifik özelliklere sahip üç boyutlu bölge, interfaz bölgesi olarak bilinir. Diğer taraftan arayüz, iki boyutlu yapısıyla bileşenler arasındaki sınırı oluşturmaktadır (Şekil 2.1). Matris fazla çevrili takviye fazından oluşan kompozit malzemelerin iki aşamalı yapısı, her iki malzemenin de üstün özelliklerinden yararlanılmasını sağlar (Altın Karataş ve Gökkaya, 2018).



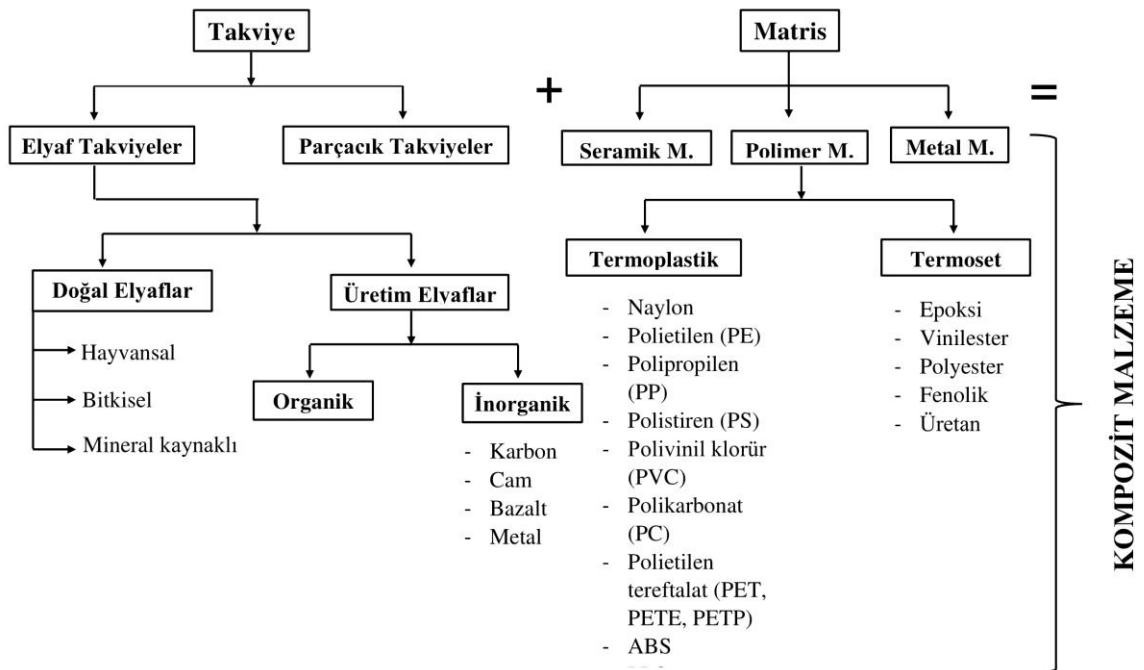
Şekil 2.1. Kompozit malzeme yapısının şematik gösterimi (Mitchell, 2004)

Genel olarak, takviyeler (fiberler) ana yük taşıma elemanı olarak işlev görürken, matris fiberleri içine alır ve onları istenen yönde korur. Matrisler, fiberler arasında yük transfer elemanları olarak görev yapar ve yapıyı, yüksek sıcaklık ve nem gibi sert çevre koşullarına karşı korur (Mallick, 2007; Altın Karataş ve Gökkaya, 2018). Matrisin özellikleri kompozitin maksimum kullanım sıcaklığını, neme ve sıvılara karşı direncini, termal ve oksidatif kararlılığını belirler (Campbell, 2004a).

Farklı matris ve fiber takviyeler kullanarak sayısız kombinasyonda yeni kompozit malzemeler üretmek mümkündür. Üretilen bu kompozit malzemeler sahip oldukları özelliklerle sağladıkları avantajlara göre çeşitli yapılarda (bacalar, kapı paneli, pencereler, bölmeler, yüzme havuzları, mobilyalar ve banyolar); elektrik ve elektronikte (elektrik konstrüksiyonlarının yalıtımı, zırh, kutular, kapaklar, kablo rayları, radomlar, antenler, televizyon kulelerinin üst kısımları ve rüzgâr türbinleri); genel mekanik parçalarda (dişliler, rulmanlar, karter muhafazaları, krikö gövdesi, robot kolları, volanlar, doküma makinesi çubukları, açık deniz platformları için borular); demiryolu taşımacılığında (güç üniteleri, vagonlar, kapı, koltuk, iç paneller ve havalandırma muhafazası); karayolu taşımacılığında (gövde parçaları, komple gövde, tekerlek, kalkanlar, radyatör ızgaraları, şanzıman mili, süspansiyon yayı, şasi, süspansiyon kolları, kasa, kabin, koltuklar, karayolu tankerleri ve izotermal kamyonlar); deniz taşıtlarında (hovercraft, kurtarma gemileri, devriye botları, balıkçı tekneleri, yarış tekneleri, eğlence tekneleri ve kanolar); uzay araçlarında (nozullar, besleme roketi, rezervuarlar ve atmosfer gerilimi için kalkanlar); hava taşımacılığında (tüm kompozit yolcu uçakları ve paraşütleri, helikopter bıçakları, pervaneler, şanzıman milleri ve uçak fren diskleri); kablolu taşıyıcı sistemlerde (teleferikler ve telekabinler); spor aletleri ve rekreasyonda (atlamada kullanılan direkler, tenis ve squash raketleri, balıkçılık direkleri, bisiklet çerçeveleri, tekerlekli patenler, skiler, yelkenler, ciritler, sörf tahtaları,

yaylar ve oklar, koruyucu kasklar, golf sopaları ve kürekler) kullanılmaktadır (Daniel Gay, 2002; Mishra, 2014).

Kompozit malzemeler, literatürde farklı sınıflandırmaları bulunmakla birlikte en temel ve basit haliyle matris ve takviye malzemelerine göre iki ana başlık altında kategorize edilmektedir (Şekil 2.2). Matris malzemesine göre kompozitler; polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozitler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. İçlerinden kullanım ve araştırma alanı en yaygın olan polimer matrisli kompozitlerdir. Takviye malzemeler de kendi içerisinde fiber ve parçacık takviyeler olmak üzere iki başlık altında sınıflandırılmaktadır. Fiber takviyeler doğal ve sentetik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal fiberler hayvansal (yün, ipek), bitkisel (pamuk, hasır, sisal, keten, kenevir, jüt, bambu vb.) ve mineral (asbest) kaynaklardan elde edilmektedir. Cam, karbon, aramid/kevlar, bazalt ve boron gibi sentetik fiberler ise endüstriyel proseslerle üretilmekte, yapay veya üretim fiberler olarak da adlandırılmaktadır. Parçacık takviyeler matris yapı içerisine mikro veya nano boyutlarda dahil edilmektedir. Uygulamalarda metal ve seramik esaslı partikül takviyeler tercih edilmektedir. Nanokil, karbon nanotüp, grafen ve grafen oksit gibi nano boyutlardaki partikül katkıları üstün özellikleriyle dikkat çekmekte, son yıllarda akademik ve endüstriyel alandaki çalışmalarda kullanımları yaygınlaşmaktadır.

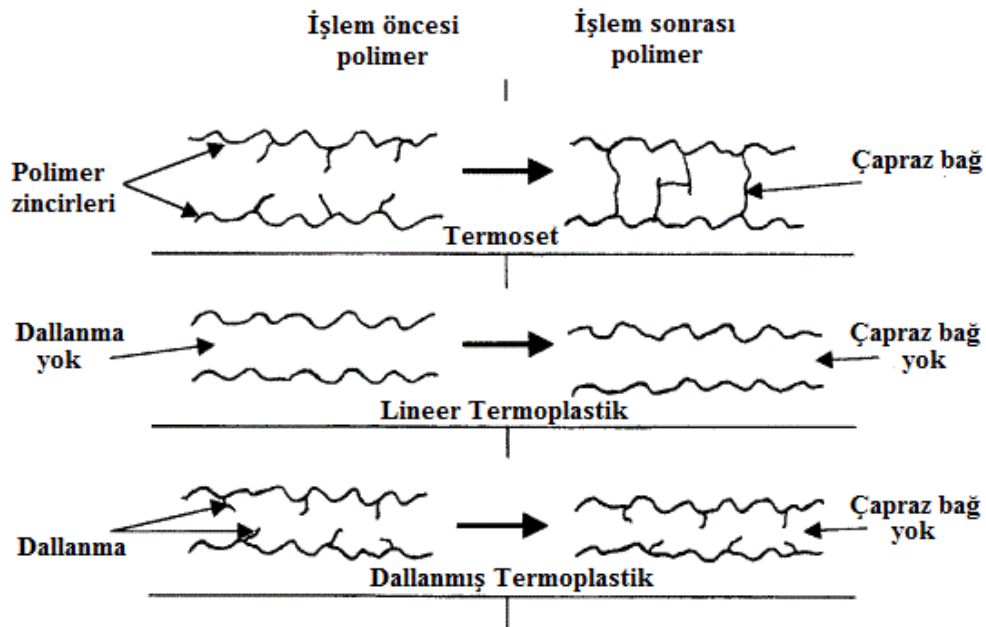


Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin temel sınıflandırması

2.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Teknolojik problemlerin çözümünde kompozit malzemeler çok uzun zamandır kullanılmaktadır, ancak polimer esaslı kompozitlerin farklı endüstrilerde kullanımı, 1960'larda dikkati çekmeye başlamıştır. Polimer kompozitler o yıllardan itibaren, ortak bir mühendislik malzemesi haline gelmiştir. Ürün performansı konusundaki farkındalığın artması ve dünya pazarında hafif bileşenler için artan rekabetle kullanım alanları giderek artmış ve yaygınlaşmıştır (Tyagi, 2011; Mishra, 2014)

Polimer matrisli kompozit malzemelerde kullanılan matrisler, sıcaklığa tepkilerine bağlı olarak, termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Birbirleriyle kıyaslandıklarında (Şekil 2.3), termoset polimerleri genellikle bir reçine, kürlleme maddesi, katalizör veya başlatıcı ile formüle edilmektedir. Polimerizasyon işlemi geri dönüşü olmayan kimyasal çapraz bağlanma reaksiyonları içerir ve geri dönüşümlü olarak yumuşatılamayan, yüksek sıcaklık direncine sahip üç boyutlu bir makro moleküler zincir ağı oluşturur. Termoset ağlarının fiziksel ve mekanik özellikleri genellikle elde edilen çapraz bağlantı yoğunluğuna bağlıdır. Buna karşılık, termoplastik matrisler, sadece zayıf van der Waals etkileşimleriyle birbirine bağlanan uzun moleküler zincirlerden oluşur. Erimiş halde yüksek sıcaklıkta işlenebilirler, katılaşırlar ve oda sıcaklığına soğutulduklarında şekillerini korurlar (Benzarti ve Colin, 2013).



Şekil 2.3. Termoset ve termoplastik polimer yapılarının karşılaştırılması (Campbell, 2004b)

2.1.1. Termoplastikler

Termoplastikler ısı ile eritilebilen, soğutulurken katılaştırılabilen yüksek moleküler ağırlıklı polimerlerdir, kimyasal olarak ısıyla çapraz bağlı değildir ve bu nedenle uzun kütleme döngüleri gerektirmez. Bununla birlikte, yüksek viskoziteleri ve yüksek erime noktaları nedeniyle, tabii tutuldukları işlemler için yüksek sıcaklıklar ve basınçlar gerekmektedir (Campbell, 2004a).

Termoplastiklerin temel farkı ve faydası eritme ve yeniden biçimlendirme yoluyla geri dönüşüm kolaylığıdır. Ticari olarak kullanılan iki termoplastik sınıfı vardır. İlki polipropilen ve naylon gibi düşük performanslı emtia plastikleri, ikincisi polietereterketon (PEEK) gibi yüksek sıcaklık performans malzemeleridir (Sims ve Broughton, 2000). Çizelge 2.1’de yaygın olarak kullanılan termoplastik reçine çeşitleri, temel özellikleri, avantajları ve dezavantajları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Matrisler için kullanılan termoplastik reçinelerin çeşitleri ve temel özellikleri
(Sims ve Broughton, 2000)

Termoplastik Çeşitleri	Temel Özellikleri
ABS	Zayıf asitlere ve alkalilere son derece dirençlidir, çoğu organik çözücüye iyi direnç sağlar, sülfürik ve nitrik asit saldırısına uğrar, esterlerde, ketonlarda ve etilen diklorürde çözünür.
Poliamid (Naylon)	Çoğu organik çözücüye etkisizdir, alkali ve tuz çözeltilerine dirençlidir, güçlü mineral asitler ve oksitleyici maddelerin saldırısına uğrar.
Polikarbonat	Zayıf asitlere ve alkalilere, yağlara ve greslere karşı direnç gösterir, güçlü asitler, alkaliler, organik çözücüler ve yakıtlar tarafından saldırıya uğrar.
Polietereterketon	Yüksek sıcaklık kapasitesine sahiptir.
Polifenilen sülfid	Organik çözücülere karşı mükemmel dirençlidir, güçlü alkalilerden veya sulu organik tuz çözeltilerinden etkilenmez.
Polipropilen	Klorlu hidrokarbonlarda çözünen asitlere, alkalilere ve organik çözücülere karşı dirençlidir.

Termoset kompozitlere kıyasla, termoplastik kompozitlerin işlem sürelerinin daha kısa olması avantaj sağlamaktadır. Ancak sahip oldukları doğal özellikler özellikle havacılık endüstrisi gibi uygulama alanlarında kullanımlarını kısıtlamaktadır. Yüksek işlem sıcaklıkları (500-800 °F), prepreg maliyetini artırır ve geleneksel işleme ekipmanlarının kullanımını zorlaştırır. Sürekli fiber takviyeli termoplastikler ısıllı şekillendirilme işlemleri sırasında, gerilim altında tutulmadığı takdirde fiberler buruşma

ve bükülme eğilimi göstermektedir. Solvent ve sıvı direnci özellikleri amorf termoplastik kompozitlerin kullanımını kısıtlamaya devam etmektedir. Yüksek tokluk ve hasar toleransı gerektiren uygulamalarda termoplastik kompozitler, çok daha sert termoset reçinelerin geliştirilmesiyle yerini termoset kompozitlere bırakmıştır (Campbell, 2004b).

2.1.2. Termosetler

Termosetler, sertleşme sırasında erimeyen ve çözünmeyen üç boyutlu (3D) çapraz bağlı yapılara dönüştürülen düşük moleküler ağırlıklı, düşük viskoziteli monomerlerdir (≈ 2.000 cP). Çapraz bağlama, ekzotermik reaksiyonlar ile açığa çıkan veya dışarıdan verilen ısı ile aktif edilen kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Sertleşme ilerledikçe reaksiyonlar hızlanır ve moleküler düzenleme içindeki mevcut hacim azalır, böylece moleküllerin daha az hareket etmesi sağlanır ve viskozitede bir artış olur. Reçine jelleşip kauçuksu bir katı oluşturduktan sonra yeniden eritilemez. Daha fazla ısıtma, reçine tamamen sertleşene kadar ek çapraz bağlanmaya neden olur.

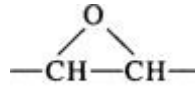
Termoset kompozit matrisler arasında polyesterler, vinil esterler, epoksiler, bismaleimidler, siyanat esterler, poliimidler ve fenolikler bulunur. Epoksiler düşük ve orta dereceli sıcaklıklarda (275 ° F'ye kadar) yaygın olarak kullanılan reçinelerdir. Bismaleimidler esas olarak 275 – 350 °F sıcaklık aralığında kullanılır. Çok yüksek sıcaklık uygulamaları için (550 – 600 °F'ye kadar) genellikle poliimidler tercih edilmektedir. Epoksilerle yaklaşık aynı sıcaklıkta kullanılabilen polyesterler ve vinil esterler, ticari uygulamalarda oldukça yaygın olarak kullanılırken, düşük özelliklerinden dolayı yüksek performanslı kompozit matrisler için nadiren kullanılır. Siyanat esterleri hem epoksiler hem de bismaleimidlerle rekabet edebilecek şekilde tasarlanmış, daha düşük nem emilimi sağlayan ve yüksek elektriksel özelliklere sahip olan, ancak fiyatı diğer termosetlere kıyasla oldukça yüksek nispeten yeni bir reçine sınıfıdır. Fenolikler, duman ve yangına olağanüstü dayanıklılık sunan ve çoğu zaman uçak iç bileşenleri için kullanılan yüksek sıcaklık reçine sistemleridir (Campbell, 2004b). Yaygın olarak kullanılan termoset reçine çeşitleri, temel özellikleri, avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Matrisler için kullanılan termoplastik reçinelerin çeşitleri ve temel özellikleri
(Sims ve Broughton, 2000)

Termoset Çeşitleri	Temel Özellikleri
Epoksi	Yüksek Tg, iyi kimyasal direnç (özellikle alkaliler ve organik çözücüler için), düşük su absorpsiyonu, birçok uygulamada kullanılabilirlik, asitlere ve güçlü oksidantlara karşı orta derecede direnç
Fenolik	Yüksek ısı direnci, iyi asit direnci, yangına dayanıklılığın önemli olduğu durumlarda kullanılabilirlik
Polyester	İyi elektriksel ve kimyasal direnç (özel asitler, zayıf alkaliler ve organik çözücüler), güçlü alkalilere karşı düşük direnç
Vinil-ester	Polyesterlere kıyasla daha yüksek maliyetle geliştirilmiş özellikler, esterlere ve ketonlara karşı iyi direnç, epoksiye kıyasla düşük maliyet

2.1.2.1. Epoksi reçine

Epoksi reçinesi, monomer başına iki veya daha fazla epoksit grubu (Şekil 2.4) içeren kimyasal bir bileşiktir ve bu molekül sıkı bir C-O-C halka yapısına sahiptir (Mouritz, 2012). Epoksit, oksiran veya etoksin grubu olarak da adlandırılır ve temsili bir epoksi polimer birimi olarak kabul edilir. Epoksi reçinesinin temel bileşenleri bisfenol A ve epiklorohidridir. Bisfenol A, temel olarak işlevsizdir (Dixit ve ark., 2016).



Şekil 2.4. Epoksit grubu (Brydson, 1999)

Epoksi reçine; kaplamalar, yapıştırıcılar, karbon ve cam fiber takviyeli kompozit malzemeler için kapsamlı uygulama alanlarına sahiptir. Epoksi, kimyası ve piyasada satılan varyasyonlarının çeşitliliği ile kür polimerlerinin çok geniş bir özellik yelpazesinde üretilmesini sağlar. Genel olarak epoksiler mükemmel yapışma, kimyasallara ve ısıya dayanıklılık, mükemmel mekanik özellikler ve çok iyi elektriksel yalıtım özellikleri ile bilinir. Kullanılan kürlenme ajanlarının çeşitleri, katkı oranları ve kürlenme sıcaklıklarına bağlı olarak hemen hemen her özellik değiştirilebilir (Patel, 2008).

Genel olarak, epoksi reçineler diğer termoset polimerlerden daha pahalıdır, ancak vinilester reçinelerle karşılaştırıldığında, daha iyi mekanik özelliklere, nem emilimine, korozif sıvılara ve çevre etkenlerine karşı daha yüksek dirence sahiptirler. Epoksi reçinelerin bir başka olumlu yönü, kürleştirme işlemi sırasında düşük çekme payına sahip olmalarıdır; diğer bir deyişle, vinilester reçineleri hacim olarak % 12'ye kadar küçülürken, epoksi reçinelerde bu oran % 5'ten daha aşağıya düşmektedir. Stiren yokluğundan dolayı epoksi reçineler kür işlemi sırasında vinilesterden daha az toksik emisyonu sahiptir. Bu da epoksi reçinelerin "açık kalıp" imalat teknolojileriyle (örn., el yatırma veya vakum torbalama) de kullanımını mümkün kılmaktadır (Liu ve ark., 2006).

Bununla birlikte, termoset plastiklerin çoğu gibi, epoksi kendinden gevrektiler ve çatlak büyümesine karşı direnci zayıftır. Kauçuk ve termoplastikler gibi polimerik partiküllerin ikinci faz olarak epoksiye eklenmesi, bu istenmeyen özelliklerin üstesinden gelir. Ancak camsı geçiş sıcaklığı, çözücü direnci ve sertlik değerlerinde düşüşler olur. Gevrekliği azaltmanın bir başka yöntemi, epoksi matrisi fiberler ile takviye etmektir. Bu yöntemle hem epoksi reçinenin hem de fiber takviyenin fiziksel ve kimyasal özellikleri muhafaza edilir (Puggal ve ark., 2016).

2.2. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Matris malzemeler yüksek mukavemet ve modüle sahip çeşitli fiber takviyelerle güçlendirilerek, termal, mekanik ve tribolojik performans bakımından üstün özelliklere sahip olan fiber takviyeli kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Fiber takviyeli polimer matris kompozitler, hafiflik, biyolojik bozunabilirlik (Thakur ve ark., 2014), yüksek mukavemet (Ku ve ark., 2011; Barari ve ark., 2016), yüksek sertlik (Unterweger ve ark., 2014), iyi korozyon direnci (Santos ve ark., 2015) ve düşük sürtünme katsayısı (Pei ve ark., 2015) gibi özellikleri sayesinde mekanik ve tribolojik performansın önemli olduğu birçok uygulamada kullanılmakta, evlerden havacılık uygulamalarına kadar günlük yaşamın hemen hemen her alanında karşımıza çıkmaktadır (Menezes ve ark., 2011; Omrani ve ark., 2015; Yang ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2015; Omrani ve ark., 2016).

Kompozitlerde takviye olarak doğal ve sentetik fiberler kullanılmaktadır. Doğal fiberler hayvansal (yün, alpaka, ipek, tüy); bitkisel (keten, kenevir, kenaf, jüt, abaka, sisal, hindistan cevizi lifi, palmiye) ve mineral (asbest) kaynaklıdır. Sentetik fiberler ise

kendi içinde organik (aramid/kevlar, polietilen, aromatik polyester) ve inorganik (cam, karbon, bor) olmak üzere ikiye ayrılır (Namvar ve ark., 2014). Doğal fiber takviyeli polimerler genellikle düşük mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte doğal fiberlerden yüksek verim ve yüksek spesifik yüzey alanı elde edilmesi nispeten kolaydır. Kimyasal işlemlerden geçirildiklerinde sentetik fiberlerle rekabet edebilirler (Ghalia ve Abdelrasoul, 2019). Fiber takviyeli polimerler, polimerlere kıyasla daha az karmaşıktır. Fiberler polimeri stabilize etmektedir. Polimerler tek başına viskoelastik davranış gösterirken fiberlerle takviye edildiklerinde elastik özelliklere sahip olurlar. Ek olarak, sıcaklık ve yük süresindeki değişikliklerden daha az etkilenirler (Hollaway ve Head, 2000).

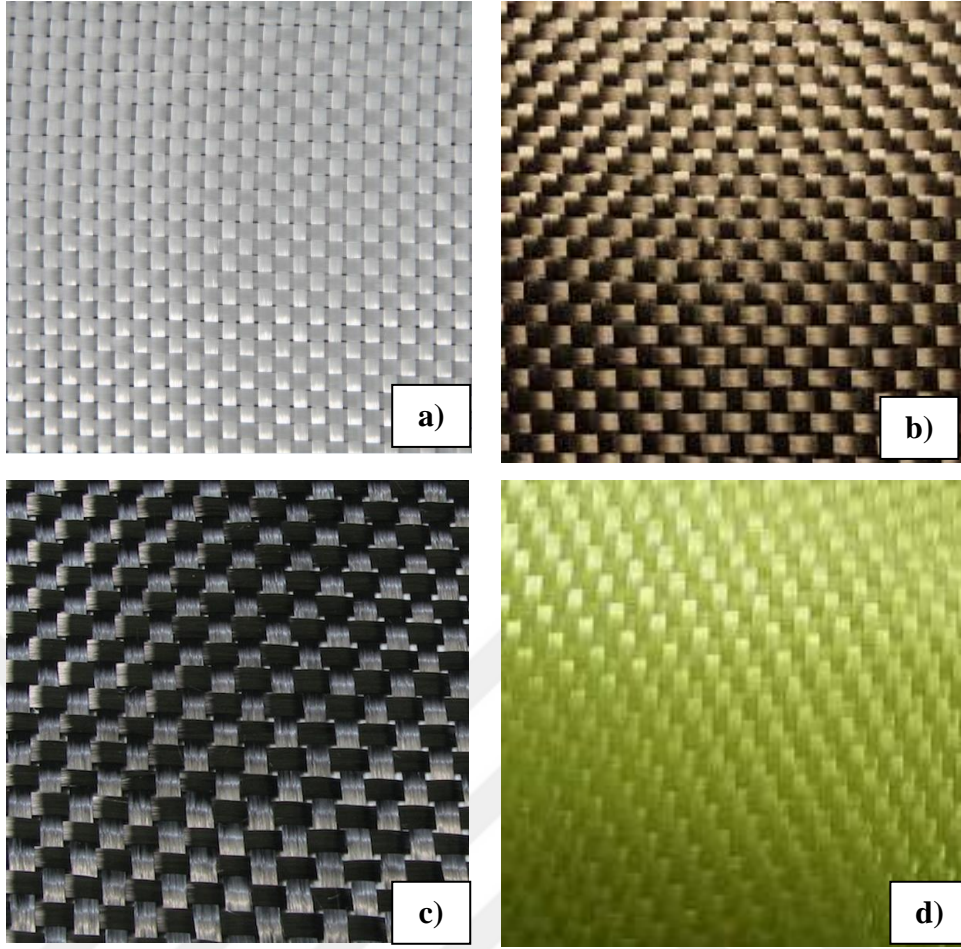
Bir fiber takviyeli kompozitte;

- i) takviyenin verimli kullanımı için yüksek elastikiyet modülü,
- ii) yüksek nihai mukavemet,
- iii) fiberler arasında düşük mukavemet değişimi,
- iv) taşıma sırasında yüksek stabilite ve dayanıklılık,
- v) fiberler arasında çap ve yüzey boyutlarında yüksek homojenlik

fiberlerin arzu edilen fonksiyonel gereksinimleridir (Hollaway ve Head, 2000).

Polimer matrisli kompozitlerde takviye olarak genellikle cam, bazalt, karbon ve aramid fiberler kullanılmaktadır (Şekil 2.5). En yaygın kullanım alanına sahip olan cam fiberler iyi mukavemet özelliklerine ve iyi ara yüzey yapışmasına sahiptir. Karbon fiberler ise genellikle uzay teknolojisi, uçak endüstrisi gibi gelişmiş uygulamalarda kullanılır. Üretim maliyeti cam fiberden daha yüksektir ve matris ile karbon fiber arasında iyi bir yapışmanın elde edilmesi daha zordur (Jamshaid ve Mishra, 2016). Bunun yanında mukavemeti oldukça yüksektir ve yüksek yük koşullarında kullanılacak kompozit malzemelerde genellikle karbon fiberler tercih edilmektedir.

Bazalt fiberler biyobozunur değildir, sentetik fiberler sınıfında yer alsa da doğal volkanik bir kayaç olan bazalttan, herhangi bir katkı yapılmadan üretildiği için literatürde mineral esaslı doğal fiber olarak da geçmektedir (Vikas, 2017). Bazalt fiberler çevre dostu olup, geri dönüşümü cam fiberlerden çok daha verimlidir. Bazalt fiber hem doğal hem de sürdürülebilir bir materyal olarak sınıflandırılabilir, çünkü bazalt fiberler doğal malzemeden yapılır ve üretimi sırasında herhangi bir çözücü, pigment veya tehlikeli madde eklenmemesinin yanı sıra hiçbir kimyasal katkı maddesi yoktur (Jamshaid ve Mishra, 2016).



Şekil 2.5. Kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan fiber takviyeleri
a) Cam fiber, b) bazalt fiber, c) karbon fiber d) aramid (kevlar) fiber

Çizelge 2.3'te çeşitli fiberlerin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri verilmiştir. Cam, karbon ve diğer fiberlerle kıyaslandığında bazalt fiberler çok iyi özelliklere ve uygun fiyatlara sahiptir. E-cam fiberlerden daha yüksek çekme mukavemetine, karbon fiberden daha büyük kopma uzamasına sahip olan bazalt fiberler performans açısından karbon fiber ve cam fiber arasında durmaktadır. Bazalt fiberlerin çekme özellikleri yapıdaki SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği ile korelasyon göstermektedir. Sürekli bazalt fiberler cam fiberler ile rekabet edebilirken, kısa bazalt fiberler kalite ve mekanik özellikler bakımından daha zayıftır (Deák ve Czigány, 2009).

Üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra kimyasal saldırıya karşı dirençleri iyi, yangına karşı dayanımları yüksektir. Bazalt bazlı kompozitler, çelikten ve bilinen tüm güçlendirilmiş plastiklerden (1 kg bazalt takviyesi 9.6 kg çeliğe eşittir) daha iyi performans gösterir. Bazalt fiberler sürdürülebilir tasarım ve yeşil bina uygulamalarında dikkati çekmektedir. (Dhand ve ark., 2015). Çelik takviye çubukları yerine bazalt fiber inşaat demiri kullanılarak daha hafif bir bina yapılması mümkündür. Bazalt fiber

üretiminde çeliğe nazaran enerji ihtiyacının daha az olması enerji tasarrufu sağlar. Enerji talebinin azaltılması, atmosferde daha düşük CO₂ emisyonuna neden olur (Singha, 2012).

Çizelge 2.3. Çeşitli fiberlerin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri (Singha, 2012; Jamshaid ve Mishra, 2016)

Özellikler	Bazalt fiber	Cam fiber (E-camı)	Cam fiber (S-camı)	Aramid	Karbon fiber
Yoğunluk (g/cm ³)	2.63–2.8	2.54–2.57	2.54	1.45	1.78
Fiber çapı (µm)	6 - 21	6 - 21	6 - 21	5–15	5 - 15
Çekme mukavemeti (MPa) (Tek bir filament için)	3000 – 4840	3100– 3800	4020–4650	2900–3450	3500– 6000
Elastisite modülü (GPa)	79.3 – 93.1	72.5 – 75.5	83 - 86	70–140	230 - 600
Kopma uzaması (%)	3.1	4.7	5.3	2.8~3.6	1.5 ~2.0
Özgül ağırlık	2.65–2.8	2.5–2.62	2.46	1.44	1.75–1.95
Sıcaklık dayanımı (°C)	-260....+700	-50....+380	-50....+300	+205	-50....+700
Maks. uygulama sıcaklığı (°C)	700–720	380	500	250	400
Erime sıcaklığı (°C)	1450	1120	1550	erimez	erimez
Termal iletkenlik (W/m K) (+25/-5)	0.031–0.038	0.034–0.04	0.034–0.04	0.04	-
Ses absorpsiyon katsayısı	0.95–0.99	0.8–0.93	-	-	-

2.3. Bazalt Fiber Takviyeli Polimer (BFRP) Kompozit Malzemeler

2.3.1 Bazalt

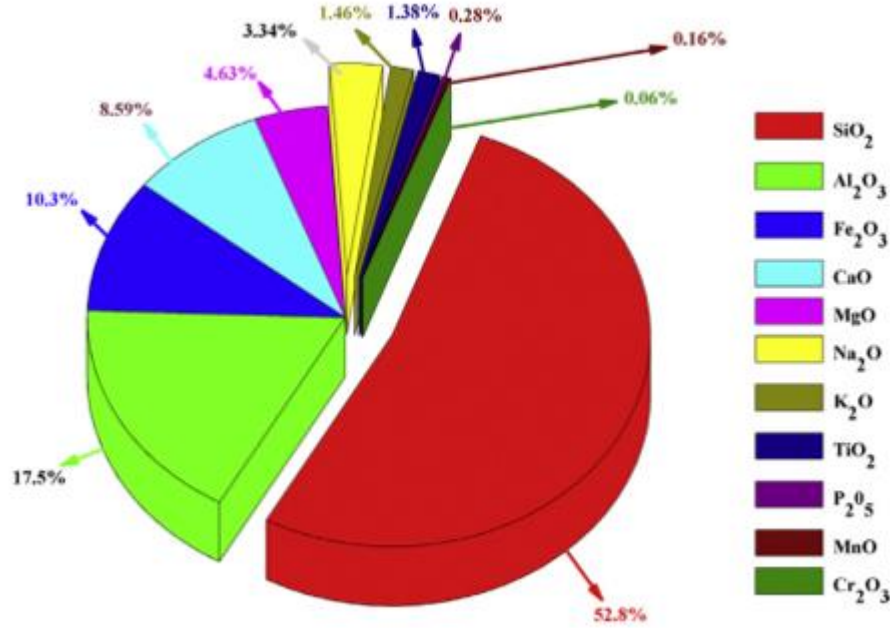
Bazalt, 1923'te Amerikalı bilim adamları tarafından keşfedilmesinden itibaren ikinci dünya savaşı sırasında Birleşik Devletler (ABD), Avrupa ve Sovyetler Birliği tarafından savunma ve havacılık uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmıştır (Dhand ve ark., 2015). Rusya, sadece aktif olarak kullanılan otuz ocakta yaklaşık 197 milyon m³ ile en zengin bazalt rezervine sahip ülkelerin başında gelmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nin Washington, Oregon ve Idaho eyaletlerinde bazalt lavlarla kaplı binlerce mil karelik alan bulunmaktadır. Bu bölgede bulunan Columbia Bazalt Platosu, bazalt ile kaplı yaklaşık 100.000 mil kare alana sahiptir (Parnas ve ark., 2006).

Bazalt yer kabuğunun üçte birini oluşturan, donmuş lav kaynaklı volkanik kayalarda (Şekil 2.6) bulunan doğal bir malzemedir. Erime sıcaklığı 1500 ile 1700 °C arasında değişmektedir. Yer kabuğundaki çatlaklar, yarıklar ya da volkan bacaları aracılığı ile yeryüzüne çıkan magmatik bir kayaç olan bazalt; koyu gri -siyah renkli, ince taneli, sert, mukavemetli ve özellikle alkalilere karşı yüksek kimyasal dirençlidir. (Akıncı ve ark., 2009).



Şekil 2.6. Volkanik kayaç bazalt (Militký ve ark., 2018)

Bazalt kimyasal olarak magnezyum, kalsiyum, sodyum, potasyum, silisyum ve demir oksitleri ile birlikte alüminyum bakımından zengindir. Şekil 2.7 bazalttaki kimyasal bileşenlerin toplam yüzde dağılımını göstermektedir. Bazalt malzemeler, SiO₂ içeriğine göre bazik bazaltlar (% 42'ye kadar SiO₂), hafif asidik bazaltlar (% 43 ila 46 SiO₂) ve asidik bazaltlar (% 46'dan fazla SiO₂) olarak sınıflandırılır. Bazaltın rengi kimyasal bileşime bağlı olarak kahverengi-gri ile mat yeşil arasında değişmektedir. (Deák ve Czigány, 2009). Lav türevli olması sebebiyle bazaltın yapısını oluşturan bileşikler ve bu bileşiklerin bazaltta bulunma yüzdeleri; lavın kimyasal bileşimi, çevreyle olan etkileşimi, soğuma hızı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Kimyasal bileşenler coğrafi dağılıma bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 2.7. Bazaltın kimyasal kompozisyonu (Dhand ve ark., 2015)

2.3.2. Bazalt fiber üretimi

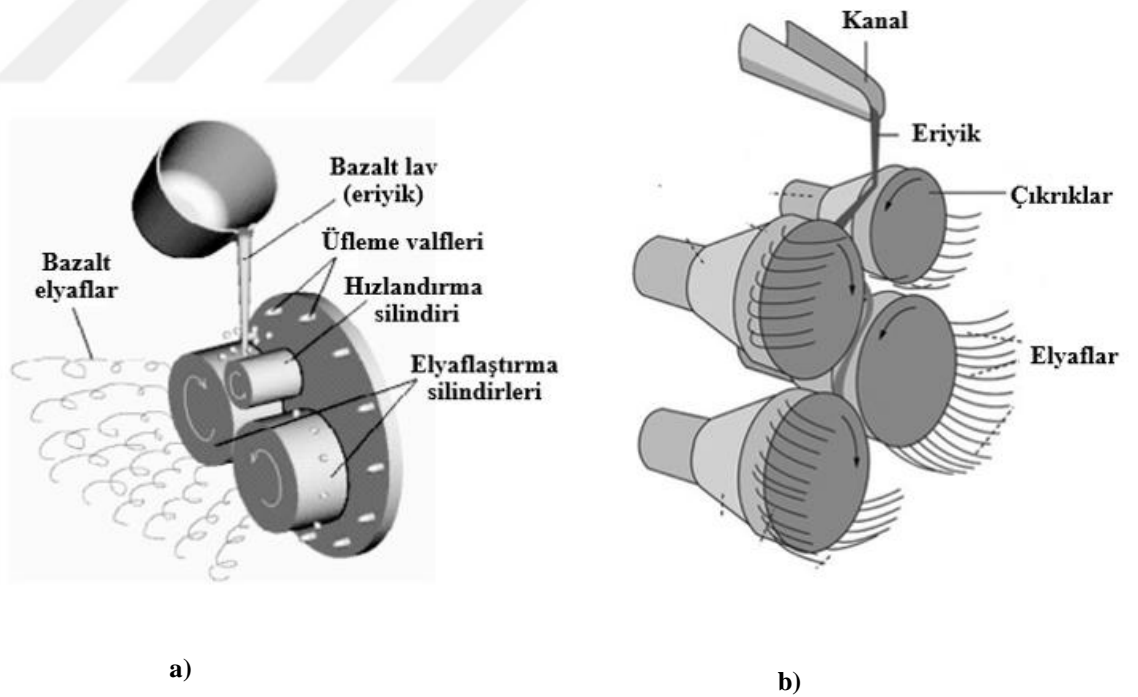
1953-1954 yıllarında Moskova Cam ve Plastik Araştırma Enstitüsü tarafından geliştirilen bazalt fiber, eski Sovyetler Birliği tarafından 30 yıllık araştırma ve geliştirme çalışmalarından sonra üretilmiş yüksek teknoloji ürünü bir fiber çeşididir. Endüstriyel bazalt fiber üretim fırını ilk 1985 yılında Ukrayna fiber laboratuvarında geliştirilmiştir (Fiore ve ark., 2015). İlk bazalt tesisleri 1980'lerin sonunda Sovyetler Birliği ülkeleri Sudogda, Ukrayna ve Gürcistan'da inşa edilmiş, bazalt fiber üretimi ile ilgili patent 1991 yılında tescil edilmiştir (Parnas ve ark., 2006). Rusya, Ukrayna ve Çin bazalt fiber üretimi yapan ve tedarik sağlayan ülkeler arasındadır.

Bazalt, nispeten homojen kimyasal yapısı, dünyadaki geniş çaplı mevcudiyeti ve erimiş halde fiber oluşturma kabiliyetinden dolayı fiber üretimi için çekici bir hammaddedir (Jamshaid ve Mishra, 2016).

Bazalt fiberlerin maliyeti, hammaddenin kalitesine ve türüne, üretim sürecine ve nihai ürünün özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Farklı bazalt kaynaklarından üretilen bazalt fiberlerin değişen kimyasal bileşenler ve çekme sıcaklığı gibi işleme koşulları nedeniyle termal ve kimyasal stabiliteleri, mekanik ve fiziksel özellikleri de farklılıklar göstermektedir. Bazalt fiber üretim prosesinde, 1200 ~ 1375 °C arasında değişen çekme sıcaklıklarında, fiberlerin çekme mukavemeti, 1.5 ile 2.9 GPa arasında

artma eğilimi göstermektedir. Değişen çekme sıcaklıklarında üretilen bazalt fiberlerin SEM görüntüleri incelendiğinde bu mukavemet artışının nedeni, düşük sıcaklıklarda bazalt kristal çekirdeklerinin oranlarının artmasına bağlanmıştır (Parnas ve ark., 2006).

Bazalt fiberler kırılmış ve sürekli fiber olmak üzere iki farklı forma ayrılmaktadır. Kısa bazalt fiberler doğrudan ufalanmış bazalt taşlardan tek adımda üretilir ve üretim teknolojileri oldukça basittir. Bu nedenle kısa bazalt fiberler nispeten daha ucuzdur, ancak oldukça düşük ortalama çapa ve mekanik performansa sahiptir. Bazalt fiber üretim teknolojileri henüz çok yenidir ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Kısa bazalt fiber üretiminde üfleme teknolojileri (santrifüj üfleme ve santrifüj multiroll) kullanılmaktadır (Şekil 2.8). Üfleme teknolojilerinde, gazla ısıtılan fırından gelen 1450 °C sıcaklıktaki bazalt taş eriyiği bir hızlandırıcı ikisi fiberleştirici olmak üzere dönen bir çelik silindir grubuna dökülür. Üfleme, silindirlere hava jetleri ile üflenir. Hava üfleme esnasında oluşan fiberler camsı şekilsiz bir fazda hızla katılır. Bu yöntemin bir diğer adı Junkers tipi üretimdir. Bu yöntemle 60-100 mm uzunluğunda, 6-10 µm çapında fiberlerin üretilmesi mümkündür.



Şekil 2.8. Bazalt fiber üretimi a) Junkers metodu, b) Santrifüj çoklu rulo sistemi (Jamshaid ve Mishra, 2016)

Kısa ve kırılmış bazalt fiber üretiminde kullanılan bir diğer teknoloji ise bir dizi yüksek hızlı döner tekerlektan oluşan santrifüjlü çoklu rulo sistemidir. Gazla ısıtılan fırından gelen bazalt taş eriyiği, ilk tekerleğin yüzeyine dikey olarak aşağı doğru gönderilir, daha sonra mevcut diğer tekerleğin hareketiyle yana doğru iletilir. Stratejik olarak yerleştirilmiş diğer tekerlekler, yaklaşık 10 mikronluk çapa sahip fiberler üretilinceye kadar harekete devam eder (Jamshaid ve Mishra, 2016).

Sürekli bazalt fiberlerin üretimi için geliştirilen çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler üretim prensibi olarak aynı olmakla birlikte kullanılan fırın ve besleyicilerin, soğutma ve sarım mekanizmalarının tasarımları birbirinden farklıdır. Prensip olarak, tüm üretim yöntemleri;

- Hammadde hazırlığı,
- Bazalt taşların ergitilmesi,
- Eriyik homojenizasyonu ve burçlara iletimi,
- Burç ünitelerinden fiberlerin çekilmesi,
- Çekilen fiberlere bağlayıcı uygulanması ve fiberlerin bobinlere sarılması

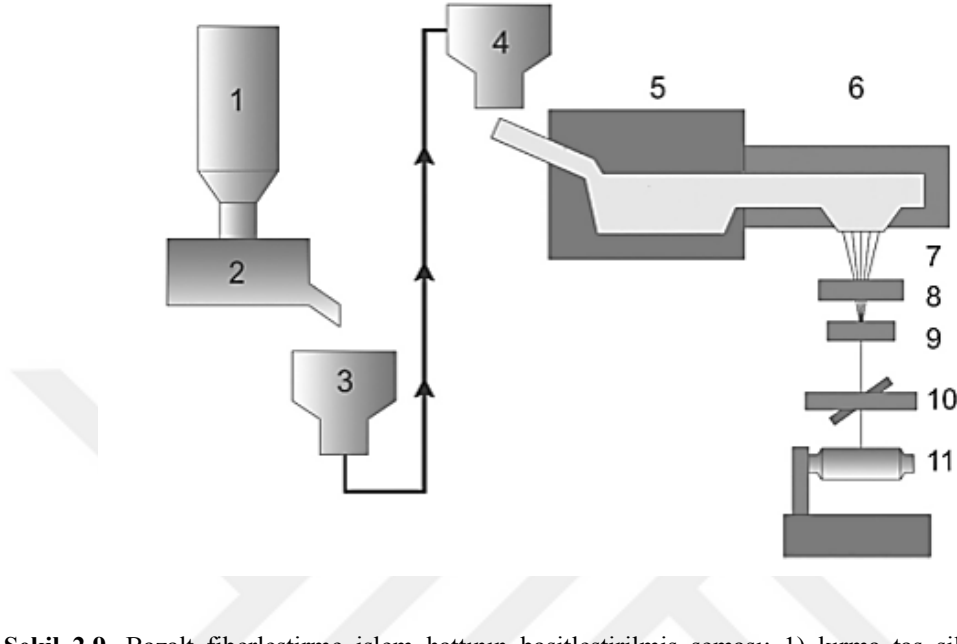
aşamalarını takip etmektedir.

Bazalt fiberlerin üretim süreci genel olarak cam fiberlerin üretim sürecine benzemektedir. Cam fiber üretiminde, cam fiberlerin kullanılacağı alanlara göre özelliklerini iyileştirmek için ilave katkı maddeleri (borik asit gibi) ihtiyacı varken bazalt fiber üretiminde herhangi bir harmanlama işlemi yapmadan hammadde olarak sadece ufalanmış bazalt kayaları kullanılmaktadır. Bu da bazalt fiberin hammadde bakımından değerlendirildiğinde cam ve karbon fiberlerden daha ucuz olmasını sağlamaktadır.

Katkısız bazalt malzemesi, gazla çalışan bir fırına beslenir (Şekil 2.9). Bazalt yaklaşık 1450 ° C'ye (2650 ° F) ısıtılır ve eritilir. Cam fiber üretiminde olduğu gibi ergimiş ham maddenin düzgün ve sabit bir akışa sahip olması için sıcaklık kontrolü oldukça önemlidir. Eriyik bazalt, erimiş malzemenin sıcaklığının daha kesin bir şekilde kontrol edildiği ikincil ısı bölgesinden filament oluşturucu burçlara iletilir. Genellikle platin malzemedan yapılan burçlarda 200-3000 arasında değişen sayıda çok ince delikler mevcuttur. Eriyik halde burçlara iletilen bazalt malzeme, burçlardaki ince deliklerden ince filamentler halinde çıkar ve gerdirilerek bobinlere sarılır.

Bazalt fiber üretimi sırasında sıkça karşılaşılan ana problem plajiyoklaz, manyetit, piroksen gibi çeşitli yapısal ürünlerin kademeli kristalleşmesidir. Bu durum

bu temel bileşenlerin 720 °C ile 1010 °C arasında değişen farklı kristalleşme sıcaklığına (manyetit; $T_c=720$ °C, piroksen $T_c=830$ °C ve plajiyoklaz $T_c=1010$ °C) sahip olmalarından kaynaklanmaktadır (Saravanan, 2006).



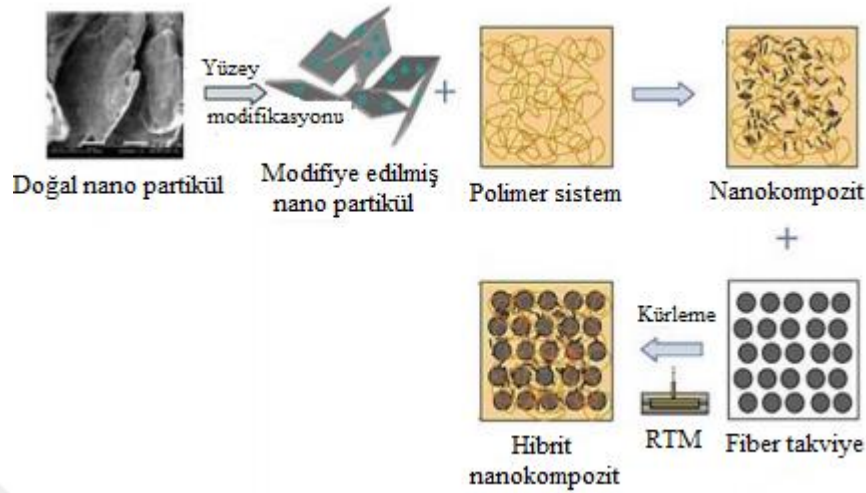
Şekil 2.9. Bazalt fiberleştirme işlem hattının basitleştirilmiş şeması: 1) kırma taş silosu (hammadde temini); 2) yükleme istasyonu (tartım, dozajlama ve karıştırma); 3) taşıma sistemi; 4) toplu şarj istasyonu; 5) ilk erime bölgesi; 6) hassas sıcaklık kontrollü ikincil ısı bölgesi; 7) filament oluşturucu burçlar; 8) boyutlandırma aplikatörü; 9) iplikçik oluşturma istasyonu; 10) fiber gerdirme istasyonu; 11) otomatik sarma istasyonu (Fiore ve ark., 2015).

2.3.3. Bazalt ve bazalt fiberlerin kullanım alanları

Bazalt fiberler çeşitli uygulamalar için hafif, yüksek performanslı hibrit kompozit malzeme imalatında kullanılmaktadır. Genel olarak, hibrit nanokompozitler, iki veya daha fazla birleştirilmiş farklı malzemenin ortak bir ana matris içine gömülmesi veya takviye edilmesiyle imal edilmektedir (Şekil 2.10). Bazalt fiberler yüksek sıcaklık direnci, yüksek mukavemet, iyi kimyasal direnç ve kolay işlenebilirlik gibi özelliklerinin yanı sıra toksik olmamaları, çevre dostu ve ucuz olmaları sebebiyle özellikle hibrit nanokompozit malzemelerde takviye elemanı olarak tercih edilmektedir (Dhand ve ark., 2015).

Literatür incelendiğinde bazalt fiberlerin çeşitli yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanıldığı görülmektedir. Sıcak gaz/partikül ayırma endüstrileri bazalt fiberlerin kullanım alanına bir örnektir. Burada sızıntılara ve tehlikelere neden olan aşırı ısıya bağlı olarak filtre torbaları sıklıkla hasar görmektedir. Kazaları önlemek için, bu filtre

torbalarının sızdırmaz olmaları gerekmektedir. Meydana gelen olası sızıntıların giderilmesinde bazalt fiber esaslı dikiş iplikleri kullanılmaktadır (Militky ve ark., 2002).



Şekil 2.10. Hibrit nanokompozit malzeme üretim şeması (Prabhakar ve ark., 2018)

Termal reçinelerin varlığında bazalt, inşaattan uzay sanayisine kadar çeşitli sektörlerde başarıyla kullanılmıştır (Şekil 2.11). Otomobil endüstrisinde, bazalt fiberler otomobil frenlerinin imalatında kullanılmaktadır. Doğal bir jeo-mineral olduğu için, bazaltın geri dönüşümü kolaydır ve çevre için tehdit oluşturmamaktadır. Bugüne kadar bilinen bir toksisite bildirilmemiştir. Tıbbi araştırma alanında, organik bağlayıcılar varlığında bazalt fiberler, biyolojik numuneleri depolamak ve taşımak için ideal bir kriyojenik saklama kabı oluşturabilmektedir (Novitskii ve V. Sudakov, 2004). Epoksi içeren dokunmamış bazalt fiberler yanmaz özelliğe sahiptir. Bu özelliği nedeniyle beton köprülerin yapımında ve deniz uygulamalarında kullanılmaktadır (Larrinaga ve ark., 2013; Fiore ve ark., 2015).

Bazalt fiberler akustik özellikleri bakımından incelendiklerinde, fiberlerin bir bariyer (Lopresto ve ark., 2011) görevi yapabildikleri ve 1800 Hz frekansında yayılmakta olan seslerin % 80-95'ini emebildikleri sonucuna varılmıştır. Mineral olarak bazalt; sulama boruları, toprak drenajı, tohum ekimi, sebze yetiştirme gibi tarımsal çalışmalar ve uygulamaların yanında (Novák ve Prach, 2010; Nunes ve ark., 2014) çini endüstrisinde yüzeyin sınırlarını arttırmak ve renkleri ortaya çıkarmak için kullanılmaktadır (Andrić ve ark., 2012; Poznyak ve ark., 2012).



Şekil 2.11. Bazalt fiberlerin çeşitli kullanım alanları (Jamshaid, 2017)

Bazalt fiberler, her türlü nükleer radyasyonu absorbe edebilme özellikleriyle nükleer maddelerin taşınması ve depolanması uygulamalarında faydalıdır. Bazalt esaslı jeo kompozitler, nükleer atık imha alanları için radyasyona dayanıklı kapak yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kapaklar insan sağlığını ve çevreyi, nükleer yeraltı atık sızıntılarına karşı birkaç yüzyıl boyunca koruma sağlayabilmektedir (Baştürk ve ark., 2014). Yüksek termal sürdürülebilirlik özelliği ve kafes yapısı olarak metallere daha hafif olması sebebiyle asfalt içerisine yapılan cam ve metal takviyelerin yerine kullanılabilir (Subramanian ve Austin, 1980). Bazalt çevre dostu olduğu için, toprak ve dolgu stabilizasyonu için uygun bir malzemedir. Ayrıca, bazalt fiber esaslı jeopolimer betonlar, geleneksel çimentoya kıyasla arttırılmış mekanik özelliklere sahiptir (Sim ve ark., 2005; Dhand ve ark., 2015).

Bazalt fiberlerin bir diğer kullanım alanı endüstriyel borular için aşınma direnci uygulamalarıdır. Sertlikleri ile bilinen (8-9 Mohs) bazalt astarlı boruların kullanımı 1980'li ve 1990'lı yıllarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu borular genellikle yüksek darbe dayanımı gerektiren sistemler ve aşınma üniteleri yapımında kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2009). Taşımacılık endüstrisinde, borularda ve bileşenlerinde gerinime neden olan cürufun taşınması önemli bir sorundur. Bazalt fiber takviyeli polimer esaslı yüksek basınç boruları, çelik borularla karşılaştırıldığında 1000 atm'ye kadar daha yüksek basınçlara dayanmaları ile bilinmektedir. Bu bazalt borular, jeotermal kuyularda ve korozif kimyasalların taşınmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazalt astarlı boruların metalik borulara nispeten 60-80 yıla kadar daha uzun bir raf ömrü vermesi beklenmektedir. Bazalt astarlı borular oldukça dirençlidir ve kömür çamuru gibi aşındırıcı malzeme taşınmasında bile neredeyse ihmal edilebilir bir bakım gerektirmektedir (Daood ve ark., 2014). Düşük sülfürlü kömür yüksek sıcaklıklarda

sıvılaştırıldığında aşındırıcı özellik kazanmaktadır. Dolayısıyla bu işlemde kullanılan kazanlardaki bazalt astar aşınmayla mücadele etmeye yardımcı olmaktadır. Bazalt astarlı borular benzer şekilde madencilikte de yaygın olarak kullanılmaktadır. Sodyum ve potasyum klorürleri gibi maden kimyasallarının çamur formunda oldukça aşındırıcı ve korozif olduğu bilinmektedir. Bu kimyasallar sıradan borularla taşındığında ve bazalt ile astarlama yapılmadığında ciddi onarılamaz hasarlara ve erken yıpranmaya neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra bazalt daha düşük ısı iletkenliğine sahip olduğundan boru içindeki tuz ve parafin miktarı azalmaktadır (Subramanian ve Austin, 1980; Wei ve ark., 2010b; Jamshaid ve Mishra, 2016).

Bazalt döküm, madencilik endüstrisinde yüksek aşınma ve yıpranmaya maruz kalan ekipmanlar için iyi bir çözüm olarak görülmektedir. Bazalt üstün anti korozyon ve sürtünme karşıtı özelliklere sahip olduğundan, aşınmaya dirençli pürüzsüz bir yüzey oluşturmak için sürtünen parçaların temas yüzeyi üzerine kaplanabilmektedir. Örnek verecek olursak, Portland çimentosu üretimi sırasında, kireç, silis, alümina ve magnezyum içeren granüle edilmiş fırın cürufu taşıyan borular, aşındırıcı özelliklerinden dolayı yüksek hasara neden olmaktadır. Bu problem bazalt astarlı döküm borularla çözülebilmekte ve boru ömrü 8 yıla kadar arttırılabilmektedir (Wang ve ark., 2009).

Bazalt fiberler ayrıca ısı, sürtünme ve kimyasal direnç nedeniyle bazı makinelerin imalatında da kullanılmaktadır (Milman ve ark., 1996). Benzersiz kimyasal dayanım özellikleri nedeniyle bazalt kaplamalı borular ve ekipmanlar hidrojen sülfür, mineral/organik asitler ve alkali kimyasallar gibi oldukça korozif kimyasalların taşınması ve depolanması için idealdir. Bazaltın genellikle elektrokimyasal korozyona karşı dirençli bir yalıtkan olduğu söylenmektedir. Bazalt fiberler mantar ve mikroorganizma saldırılarına karşı dirençlidir (Regar ve Amjad, 2016).

Bazalt, izolasyon özellikleri ile bilinmekle birlikte, elektrik kabloları ve cihazlarının etrafında uzun süredir bir izolasyon örtüsü olarak kullanılmaktadır. Bazalt sıcaklığa karşı oldukça dayanıklıdır. Özellikle, 260 °C'den 800 °C'ye kadar olan geniş sıcaklık aralığına dayanabilmekte ve bu da cam fiberden üstün olmasını sağlamaktadır (Milman ve ark., 1996). Bu örneklerin yanı sıra, bazaltik bantlar/kumaşlar, güç iletimi sırasında yüksek gerilimli tellerin yalıtılması ve hasarlara karşı korunması için de ideal malzemelerdir (Hao ve Yu, 2010; Fiore ve ark., 2011).

2.4. Nanokompozit Malzemeler

Nanokompozitler, fazlardan en az birinin nanometre ($1 \text{ nm}=10^{-9} \text{ m}$) aralığında boyutlar gösterdiği kompozitlerdir (Camargo ve ark., 2009). Geleneksel katkı polimerlere yeni bir alternatif olarak geliştirilmiş polimer nanokompozitler, polimerik bir matriste dağılmış olan 1 ila 100 nm aralığında nanometre ölçeğinde inorganik parçacıklardan oluşan iki faza sahiptir (Luo ve Daniel, 2003). Katkı malzemesinin kompozit içerisinde nanometre boyutlarında dağıtılması nano kompozitlere, saf polimerlere ve geleneksel kompozitlere kıyasla geliştirilmiş özellikler kazandırır. Parçacıkların nanometre boyutundan ötürü, nanopartiküller, birim hacim başına karşılaştırmalı geniş yüzey alanlarından dolayı dikkate değer özellikler gösterir (Alamri ve Low, 2012). Arttırılmış modül ve mukavemet, üstün bariyer özellikleri, çözücülere ve ısıya karşı yüksek direnç ve düşük yanıcılık nano katkılarla geliştirilen özelliklere örnek olarak verilebilir (Lagashetty ve Venkataraman, 2005). Bu özellikler, birçok temel kimyasal ve fiziksel etkileşimin yüzeyler tarafından yönetilmesinden dolayı, polimer matrisi ile ara yüzlerdeki nanoparçacıklar arasında gerçekleşen faz etkileşimlerinin sonuçlarıdır (Alamri ve Low, 2012).

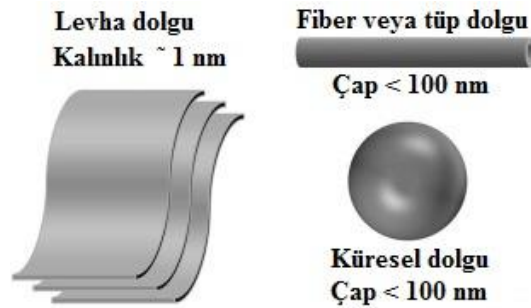
Nano katkılarda, partikül büyüklüğünün belirli bir seviyeden küçük olması 'kritik boyut' olarak adlandırılır ve partikül özelliklerinde değişikliklere neden olur (Çizelge 2.4). Ek olarak, boyutlar nanometre seviyesine ulaştığında, faz ara yüzlerindeki etkileşimler büyük ölçüde iyileşir. Nano katkı ile malzeme özelliklerinin geliştirilmesi temelde faz ara yüzlerindeki bu iyileşmeye bağlıdır. Bu bağlamda, nanokompozitlerin hazırlanmasında kullanılan takviye malzemelerinin yüzey alanı/hacim oranı, yapı-özellik ilişkilerinin anlaşılması açısından önemlidir (Camargo ve ark., 2009).

Çizelge 2.4. Nanokompozit sistemlerde çeşitli özelliklerde değişikliklerin beklenebileceği partikül boyutları (Camargo ve ark., 2009)

Özellikler	Değişikliklerin beklenebileceği boyut (nm)
Katalitik aktivite	<5
Sert malzemelerin yumuşak hale getirilmesi	<20
Kırılma indisi değişikliği	<50
Süper paramanyetizma ve diğer elektromanyetik olaylar	<100
Mukavemet kazandırma ve toklaştırma	<100
Sertlik ve plastisitenin değiştirilmesi	<100

Polimer nanokompozitlerin özellikleri, matris ve dağılık faz arasındaki ara yüzey etkileşimlerinin yanı sıra nano katkının şekil ve özelliklerine bağlıdır. Nano katkının en boy oranı, matris ve katkı maddesi arasındaki yapışmanın iyileştirilmesi, kompozitlerin elektriksel, mekanik ve ısıl gibi birçok özelliklerinin geliştirilmesi için oldukça önemlidir. Çalışmalarda yüksek en boy oranına sahip kil, karbon nanotüp ve nano fiberler gibi takviyelerin polimer matris içindeki nano ölçekli dispersiyonlarının çok düşük oranlarda dahi polimerlerin özelliklerini geliştirdikleri ifade edilmiştir (Puggal ve ark., 2016).

Polimer nanokompozitler, dağılık nano ölçekli dolgu maddelerinin boyutlarına bağlı olarak genel olarak üç ana tipte sınıflandırılabilir. Birinci tipte tabakalı silikat ve grafen gibi iki boyutlu (2D) nano ölçekli dolgular yer alır. İki boyutlu bu nano dolgu malzemeleri polimer matris içerisinde bir ila birkaç nanometre kalınlığında ve yüz ila binlerce nanometre uzunluğunda tabakalar halinde bulunur. Bu dolgular ile takviye edilen polimer nanokompozitler, tabakalı polimer nanokompozitler olarak adlandırılır. İkinci tipte, iki boyut nanometre ölçeğindedir ve üçüncü boyut daha büyüktür. Karbon nano fiberler, karbon ve halosit nanotüpler uzatılmış bir tek boyutlu yapı oluşturan bu nano ölçekli dolgu maddelerine örnek olarak verilebilir. Üçüncü tipte üç boyutta nano ölçeklidir. Bu nano ölçekli dolgular küresel silika ve yarı iletken nano kristal gibi en boy oranı düşük nanoparçacıklardır (Fu ve ark., 2019). Şekil 2.12'de çeşitli nano ölçekli dolgu maddelerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.12. Nano ölçekli dolguların şematik gösterimi (Fu ve ark., 2019)

Nanokompozitlerin formülasyonunda kullanılan ve literatürde tanımlanan birçok nano parçacık vardır. Bunlar genellikle nano ölçekte gösterdikleri boyut sayısına bağlı olarak fiberler (1D), levhalar (2D) veya partiküller (3D) olarak sınıflandırılırlar ve sahip oldukları daha büyük yüzey alanları ile endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılan

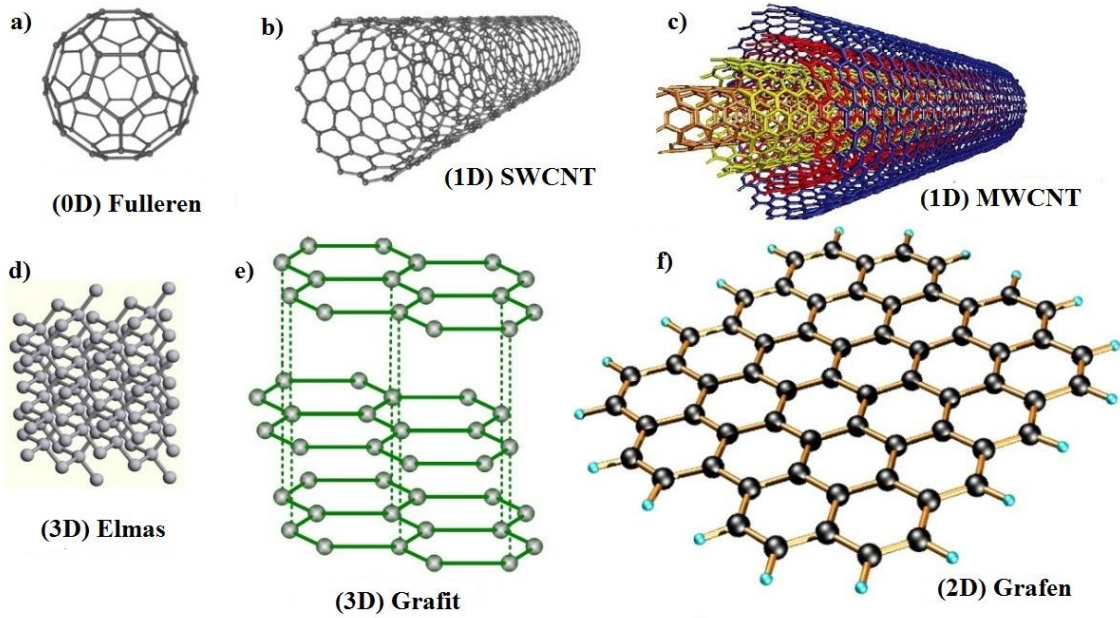
mikro partiküllerden ayrılırlar. Nanokiller, polimerik matrisli nanokompozitlerde, endüstriyel olarak kolayca temin edilebildikleri ve düşük maliyetli oldukları için, bilimsel olarak en çok çalışılan nano dolgular arasındadır. Ticari olarak ilk denemeler 1989 yılında Toyota'nın otomobil ekipmanlarında naylon 6-kil hibritleri kullanılmasıyla başlamıştır. TiO₂, ZnO, SiO₂ gibi nano oksitler sırasıyla kendi kendini temizleme özellikleri, UV koruması ve özel reolojik davranışlar sağlamak amacıyla literatürde ve ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon nanotüpler ve son zamanlarda grafen, mükemmel içsel özellikleri ve benzersiz yapıları nedeniyle daha fazla dikkat çekmektedir. Üretim süreçleri daha verimli hale geldikçe daha düşük maliyetler ile kullanılabilirlikleri artış göstermektedir (Müller ve ark., 2017).

2.4.1. Grafen nanopartiküller (GNP)

2010 yılı nobel fizik ödülünün grafen hakkındaki ‘‘Çığır açan deneyleri’’ dolayısıyla Hollandalı Andre Geim ve Rus kökenli İngiliz vatandaşı Konstantin Novoselov’a verilmesi dikkatleri ‘‘mucize materyal’’ olarak da bilinen bu malzeme üzerine çekmiştir. Tek atom inceliğinde olan ve bu özelliğiyle iki boyutlu kabul edilen grafen, üstün özelliklere sahip bir nano malzemedir. Temel yapısını oluşturan karbon atomları birbirine kovalent bağlıdır ve altılı bal peteği örgüsünde dizilmiştir. Grafen yapısında karbon-karbon arası bağ uzunluğu 0,142 nm’dir. Grafenin temel üstün özellikleri geniş yüzey alanı (2630 m²g⁻¹) yüksek elektron mobilitesi (200000 cm²/(Vs)) yüksek ısı iletkenliği (5000 Wm⁻¹K⁻¹), yüksek Young modülü (~1100 GPa), yüksek kopma mukavemeti (125 GPa) (Park ve Ruoff, 2009) ve optik geçirgenliği (~97.7 %) (Bhuyan ve ark., 2016) olarak sıralanabilir. Sahip olduğu bu üstün özellikler nedeniyle grafen birçok uygulama alanı bulmaktadır. Bunların başlıcaları transparan elektrotlar, alan etkili transistörler, sensörler, temiz enerji cihazları, nanokompozitler ve organik fotovoltaj cihazlar olarak sayılabilir (Çelik Bedeloğlu ve Taş, 2016).

Fulleren (0D), karbon nanotüp (1D), grafen (2D), grafit (3D) ve elmas (3D) doğada çok çeşitli allotropları bulunan karbonun farklı formlarını ifade etmektedir (Şekil 2.13). Karbonun çok sayıda bilinen allotropunun olması, karbon atomlarının sp, sp² ve sp³ bağlanma şekillerinden her üçünü de yapabilmesinin bir sonucudur. Bu allotroplardan fulleren, karbon nanotüp, grafen ve grafit farklı karbon atomlarının sp² hibritleşmesiyle meydana gelirken, elmas sp³ hibritleşmesinin bir sonucudur. Grafenin; fulleren, karbon nanotüp ve grafitin yapı taşı olduğu söylenebilir. Tek bir grafen

tabakanın silindirik sarılmasıyla oluşturulan form tek duvarlı (cidarlı) karbon nanotüp (SWCNT) olarak tanımlanmaktadır. Eş merkezli iki veya daha fazla grafen tabakası silindirik olarak sarıldığında çok duvarlı (cidarlı) karbon nanotüpler (MWCNT) elde edilir. Fulleren karbon atomlarından (20, 40, 60 veya 70 adet) meydana gelen kapalı bir kafes yapısıdır. Küre, elipsoit veya silindir şekilde bulunabilir. Grafen oksit ise grafitin farklı metotlarla oksidasyonu ile üretilen, hidrofilik özelliğe sahip, yapısında karboksil, hidroksil ve hidronilin yanı sıra epoksi grupları bulunduran bir grafen türevidir. Bahsedilen bu karbonik malzemelerin tümü karakteristik yüksek ısı iletkenlik, elektrik iletkenliği ve mekanik mukavemet değerlerine sahiptir (Su Kim ve ark., 2016).



Şekil 2.13. Nano ölçekli karbon dolguların şematik gösterimi (Atta ve ark., 2015)

Grafen temelde grafen oksitin indirgenmesi, eksfoliasyon (grafitin tabakalarının ayrılması), kimyasal buhar biriktirme ve epitaksiyel büyütme olmak üzere dört farklı yöntemle üretilmektedir (Park ve Ruoff, 2009). Bu yöntemler içerisinde grafen oksitin indirgenmesi, potansiyel ölçeklenebilirliği, yüksek verim, çeşitli solventlerde mükemmel dağılma özelliği gibi avantajları nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Yöntemin temeli grafen oksitin yapısında oksijen bulunan grupların ayrıştırılarak sadece karbon içeren bir forma dönüştürülmesidir. Birbirine van der Waals bağlarıyla bağlı olan grafen tabakalarının bir arada bulunduğu form grafit olarak tanımlanmaktadır. Eksfoliasyon yönteminde grafitin yapısındaki zayıf bağların mekanik veya kimyasal enerjiler

kullanılarak kırılmasıyla grafen elde edilebilir. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) metodunda, karbon atomları bakır, nikel, paladyum ve iridyum gibi geçiş metalleri üzerine buhar fazda biriktirildikten sonra ayırıcı bir ajan yardımıyla yüzeyden alınarak kusursuz grafen katmanları üretilebilir. Bu yöntemle elde edilen grafen tabakalarının diğer yöntemlere kıyasla daha kusursuz, verimin de daha yüksek olduğu bilinmektedir. Ancak kullanılan ekipman ve cihazların yüksek maliyetli olmaları yöntemi diğerlerinden pahalı kılmaktadır. Epitaksiyel büyütmede karbon kaynağı (SiC) bir tabaka, 1150-2000 °C sıcaklığı kadar ısıtılır, Si yapıdan ayrılır ve karbon atomları epitaksiyel olarak bir araya gelerek grafen tabakalarını oluşturur. Yöntemin dezavantajı yapıdan ayrılan Si atomlarının uzaklaşmaması durumunda büyütme işleminin sonlanmasıdır (Çelik Bedeloğlu ve Taş, 2016)

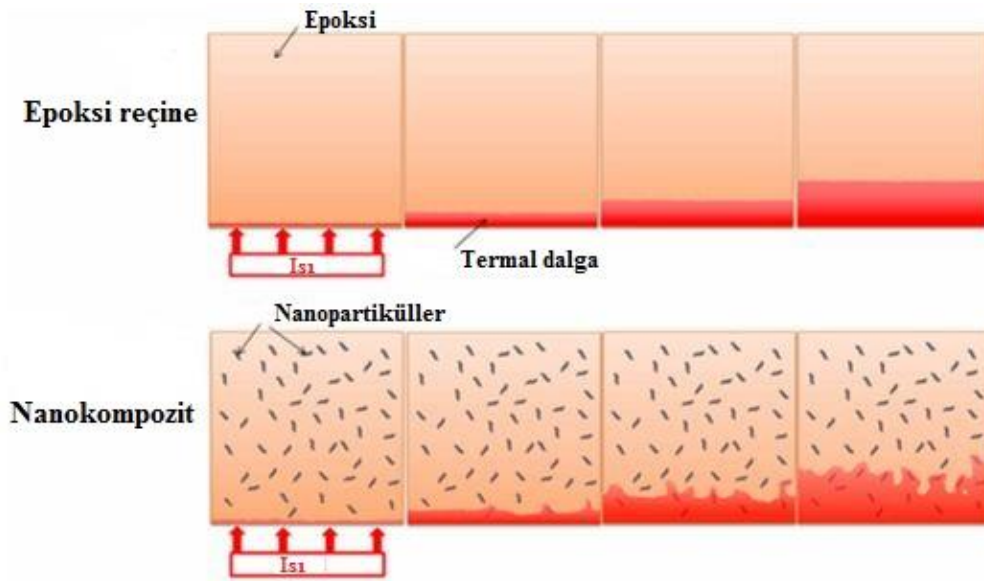
2.4.2. Grafen nanopartiküllerin termal iletkenliği

Sahip olduğu yüksek termal iletkenlik değerleri, grafenin ısı iletimi açısından karbon nanotüpleri geride bırakabileceğini göstermektedir. Grafenin bu özelliği kendisine optoelektronik, fotonik ve biyo-mühendislik alanlarında geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır (Balandin ve ark., 2008). Grafen nanopartikül takviyesiyle kompozit malzemelerde termal özelliklerin geliştirilmesi farklı polimer matrisler için hala araştırılmaya devam eden bir konudur.

Polimerler, hafif, düşük maliyetli, işlenmesi kolay ve korozyon direnci iyi olan malzemelerdir. Bununla birlikte, çoğu polimer ısı yalıtıcıdır ve amorf durumlarından dolayı $0,1-0,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ arasında değişen ısı iletkenliğine sahiptir (Huang ve ark., 2011). Katılarda enerji taşınımı fononlar, elektronlar ve fotonlar olmak üzere üç tür taşıyıcı ile gerçekleştirilir (Han ve Fina, 2011). Çoğu polimerde temel ısı iletimi mekanizması olan fononlar, rijit bir kristal kafes içerisindeki titreşim modları olarak tanımlanabilir. Amorf durumdaki polimerlerin genellikle çok sayıda fonon dağılmasına katkıda bulunduğu ve düşük ısı iletkenliğe yol açan çok fazla kusura sahip olduğu kabul edilir (Li ve ark., 2017a). Polimerlere yapılan nano katkılar ile mevcut kusurlar iyileştirilmekte ve birçok özellik gibi termal iletkenlikte de gelişme sağlanabilmektedir.

Grafen nanopartikül katkılı kompozit malzemeler ısı kaynağı ile temasa geçtiğinde (Şekil 2.14), grafende ısı transferi çok hızlı bir şekilde gerçekleşmekte, bu da kompozitlerin termal iletkenliğini artırmaktadır. Katı maddelerde ısı “fononlar” (ısı titreşim dalgaları) ve “serbest elektronlar” tarafından iletilmektedir. Kompozit

malzemelerde grafen, yüksek derecede termal iletken bir kanal görevi görürken, modifiye edilmiş yüzey, polimer matrisinin moleküler zincirleri ile kovalent ve kovalent olmayan bağlanma sağlarken, grafenden polimere fonon transferini kolaylaştıracak ve aynı zamanda fononun polimerden grafene aktarımını destekleyecektir (Li ve ark., 2017a). Böylelikle grafen katkılı kompozitlerin de termal iletkenlikleri artacak, mevcut ısı daha hızlı bir şekilde transfer edilerek yayılacaktır.

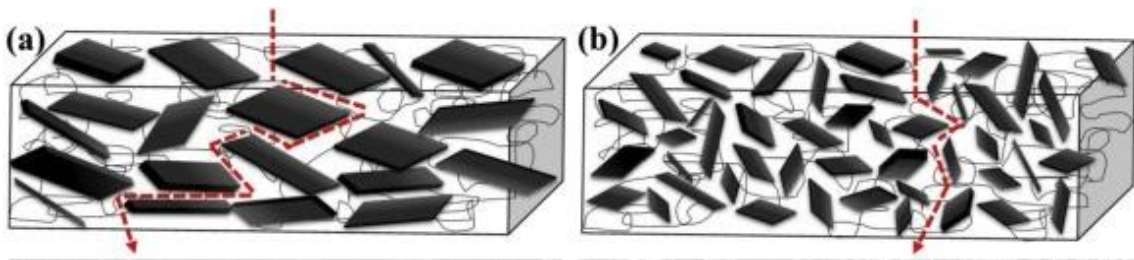


Şekil 2.14. Epoksi reçine ve grafen takviyeli polimer nanokompozit malzemede ısı iletimi (Li ve ark., 2017a)

2.4.3. Bariyer plastikleri ve GNP'lerin bariyer etkisi

“Bariyer plastikleri” terimi, gazlara veya su buharına düşük geçirgenlik gösteren polimer grubuna verilen yeni bir isimdir. Bariyer polimerleri, yüksek mekanik dayanımın yanı sıra termal ve kimyasal kararlılığın gerekli olduğu gıda endüstrisi (Lange ve Wyser, 2003; Ray ve ark., 2006; Choudalakis ve Gotsis, 2009), farmasötikler ve elektronik cihaz koruması (Yoo ve ark., 2014) gibi birçok paketleme ve koruyucu uygulamada kritik bir rol oynar. Polimerik malzemelerdeki bariyer özelliklerini geliştirmek için bir takım yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin birçoğu yüksek maliyet, nem hassasiyeti ve düşük mekanik mukavemet gibi dezavantajlara sahiptir (Lange ve Wyser, 2003). Küçük bir molekülün bir polimer film boyunca geçirgenliği difüzyon hızı ve çözünürlük olmak üzere iki faktör tarafından belirlenir. Moleküler seviyede difüzyon, zincirlerin segmental hareketine ve sonuçta polimer

serbest hacminin hızlı bir şekilde yeniden dağılımına, çözünürlük ise polimer ile etkileşime bağlıdır (Nir ve ark., 2000). Su buharı, gaz moleküllerinden daha yüksek çözünürlüğe ve bu nedenle daha yüksek bir geçirgenliğe sahiptir (Metz ve ark., 2005). Polimerlerin zayıf nem bariyeri, geçirgenlikte önemli bir azalma sağlayan talk veya mika gibi geçirimsiz mikron boyutunda dolgu maddelerinin eklenmesi ile geliştirilebilir. Bariyer özelliklerinin bu şekilde iyileştirilmesi eğilme ve darbe dayanımı gibi temel özellikleri olumsuz etkilemektedir (Peretz Damari ve ark., 2018).



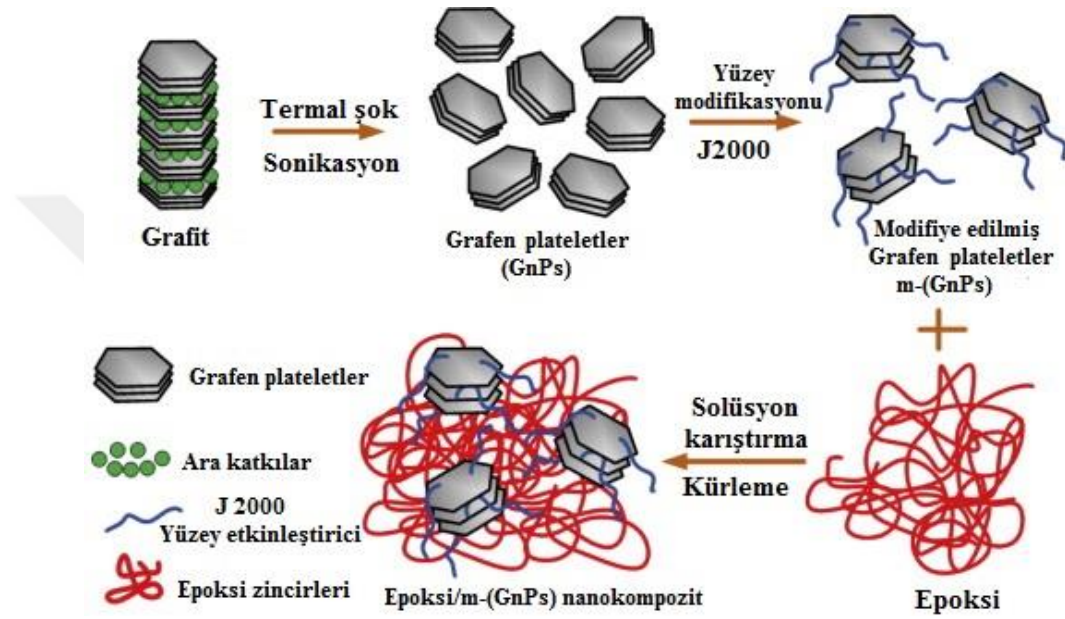
Şekil 2.15. a) kısmen hizalanmış büyük boyutlu, b) rastgele yönlendirilmiş küçük boyutlu GNP katkılı polimer nanokompozitlerde difüzyon mekanizması (Peretz Damari ve ark., 2018)

Gelişmiş bariyer özelliklerine sahip polimer üretmek için alternatif bir yaklaşım, nanometre aralığında en az bir boyuta sahip olan nano dolgu maddeleri ilave ederek polimer nanokompozitler üretmektir (Zhang ve ark., 2016b). Bu durumda, mikron ölçekli dolgulara göre çok daha düşük bir yükleme işleminde önemli bir gelişme elde edilebilir (Nadiv ve ark., 2016). Büyük boy oranına sahip nanoplateletler geçirgenlikte daha çarpıcı bir azalma sağlar (Choudalakis ve Gotsis, 2009). Büyük plateletler gaz ve su moleküllerini levha katmanlarının etrafındaki polimer matrisinde daha kıvrımlı bir yol izlemeye zorlayarak (Şekil 2.15), çok daha büyük difüzyon mesafeleri meydana getirir (Lu ve Mai, 2005). Mükemmel geçirmezlik özelliğine sahip olan grafenin aromatik halkalarının güçlü elektron yoğunluğu, yapı içerisine girmeye çalışan su ve gaz moleküllerini iterek bariyer etkisi oluşturabilmektedir (Peretz Damari ve ark., 2018).

2.4.4. GNP bazlı polimer nanokompozitler

3 boyutlu, karbon allotropu olan grafitten farklı metotlarda elde edilen grafen nano takviyelerin, epoksi, vinilester, polyester gibi polimer matris içerisine ağırlıkça veya hacimce farklı oranlarda dispersiyonuyla, geliştirilmiş özelliklere sahip olan,

grafen bazlı nanokompozit malzemeler üretilmektedir (Şekil 2.16). Birçok özellik bakımından avantajlı olan grafen ile bazı polimer matrisler arasında uygun bir yapışma sağlamak zor olabilmektedir. Polimer matris ile grafen arasında uygun veya daha güçlü bir bağlanma sağlanabilmesi, matris/grafen ara yüzünün geliştirilmesi için grafen nano partiküller matrise dahil edilmeden önce bazı kimyasal ajanlar ile modifiye edilmektedir.



Şekil 2.16. GNP ile modifiye edilmiş epoksi nanokompozit malzeme üretim şeması (Ma ve ark., 2014)

Grafenin polimerlere kıyasla sahip olduğu üstün özellikler takviye edildikleri polimer/grafen nanokompozitlere de yansır. Polimer/grafen nanokompozitler saf polimer ile karşılaştırıldığında üstün mekanik, termal, gaz bariyeri, elektrik ve alev geciktirici özellikler gösterir. Ayrıca grafen bazlı polimer nanokompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerindeki iyileşmenin, kil veya karbon dolgu bazlı polimer nanokompozitlere göre çok daha iyi olduğu bildirilmiştir. CNT'ler, grafene kıyasla karşılaştırılabilir mekanik özellikler gösterse de grafen termal ve elektriksel iletkenlik gibi belirli özelliklerde hala CNT'den daha iyi bir nano dolgu maddesidir (Kuilla ve ark., 2010). Polimer matrise (örneğin polistiren), hacimce sadece % 1 oranında grafen takviyesiyle elde edilen nanokompozit malzeme, birçok elektriksel uygulama için fazlasıyla yeterli olan elektriksel iletkenliğe ($\sim 0.1 \text{ Sm}^{-1}$) sahip olmaktadır (Wang ve ark., 2012).

Çizelge 2.5'te grafenin mekanik, termal ve elektriksel özellikleri üzerine CNT, çelik, plastik, kauçuk ve fiber ile karşılaştırmalı değerleri verilmiştir. Grafenin, CNT, çelik ve kevlar fiberler gibi farklı takviyelerle karşılaştırıldığında, daha yüksek en boy oranı ve daha geniş spesifik yüzey alanına sahip olduğu bilinmektedir (Wang ve ark., 2012). Çizelgedeki değerler karşılaştırıldığında çekme mukavemeti, termal ve elektriksel iletkenlik de dahil olmak üzere grafenin özellikler bakımından açık ara önde olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.5. Grafen, CNT, nano boyutlu çelik ve polimerlerin özellikleri (Kuilla ve ark., 2010)

Malzemeler	Çekme Mukavemeti	Termal İletkenlik (W/mK), 25 °C'de	Elektriksel İletkenlik (S/m)
Grafen	130 ± 10 GPa	$(4.84 \pm 0.44) \times 10^3$ $(5.30 \pm 0.48) \times 10^3$	7200
CNT	60–150 GPa	3500	3000–4000
Nano boyutlu çelik	1769 MPa	5–6	1.35×10^6
Plastik (HDPE)	18–20 MPa	0.46–0.52	Yalıtkan
Kauçuk (Doğal)	20–30	0.13–0.142	Yalıtkan
Fiber (Kevlar)	3620 MPa	0.04	Yalıtkan

Daha önce belirtildiği gibi, oldukça geniş yüzey alanına sahip grafen, grafen-polimer ara yüzünün maksimize edilmesine yardımcı olur, polimer kompozitlerin termal iletkenliği üzerinde önemli etkiye sahiptir (Su Kim ve ark., 2016).

Grafenin yapısı, hazırlama yöntemi, dolgu maddesinin matristeki dağılımı, dolgu maddesi ile matris etkileşimleri ve dolgu maddesi oryantasyonu gibi parametreler grafen bazlı nanokompozitlerin mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Young modülü, çekme dayanımı ve tokluk, çok küçük bir miktarda dolgu maddesiyle bile önemli artışlar göstermektedir. Bununla birlikte çekme mukavemeti, dolgunun aglomerasyonundan ciddi bir şekilde etkilenir (Papageorgiou ve ark., 2017). Bu nedenle özelliklerin geliştirilmesinde grafenin polimer matris içerisinde homojen olarak dağıtılması büyük önem taşımaktadır. Yüksek oranlarda yapılan katkıların homojen bir şekilde dispersiyonu oldukça zordur.

Literatürde grafenin nano tüplere kıyasla toklaştırma etkisinin daha belirgin ve anlamlı olduğu ifade edilmiştir. Cam fiber ile güçlendirilmiş polimerlerde, epoksiler grafen ile modifiye edildiğinde yorulma ömrü ve kırılma tokluğundaki gelişmeler dikkat çekici düzeydedir. (Kuilla ve ark., 2010). Rafiee ve ark., farklı ağırlık oranlarında GNP,

SWCNT ve MWCNT ile modifiye ettikleri epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırdıkları çalışmalarında GNP katkısının nanokompozitlerin kırılma tokluğunu % 53 arttırdığını belirtmişlerdir. Grafen levhaların mekanik özelliklerin geliştirilmesi açısından karbon nanotüplere göre üstünlüğü, yüksek spesifik yüzey alanlarına, buruşuk (pürüzlü) yüzeyleri sayesinde nano dolgu-matris arasındaki yapışmayı/kenetlenmeyi güçlendirmelerine ve iki boyutlu (düzlemsel) geometrilerine atfedilmiştir (Rafiee ve ark., 2009b).

Katı yağlama için iyi bir aday olan grafen, mikro ve nano ölçekte temas yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetini azaltır. Temas yüzeyi üzerinde sert, güçlü ve yağlayıcı özellikte nanometre kalınlığında grafen bir yüzey tabakası temas hasarı direncinde büyük bir iyileşme sağlayabilir. Grafen nanoplateletler ile güçlendirilmiş seramik nanokompozitlerin aşınma hacminde belirgin düşüşler olduğu çeşitli çalışmalarda belgelenmiştir (Gutiérrez-González ve ark., 2015). Grafen oksit ve CNT'lerle takviye edilmiş polimer bazlı kompozitlerin aşınma miktarlarında da önemli düşüşler gözlenmiştir (Yazdani ve ark., 2015). Shen ve arkadaşları, grafen oksit ve CNT ile takviye edilmiş hibrit epoksi nanokompozitlerin özgül aşınma miktarlarında sadece CNT içerenlere kıyasla % 40 ek azalma elde edildiğini bildirmiştir (Shen ve ark., 2014). Bu azaltıcı etki GO'lerin epoksi içerisinde CNT dispersiyonunu geliştirmesiyle açıklanmıştır (Yazdani ve ark., 2015).

2.5. Polimer Kompozit ve Nanokompozit Malzemelerin Aşınması

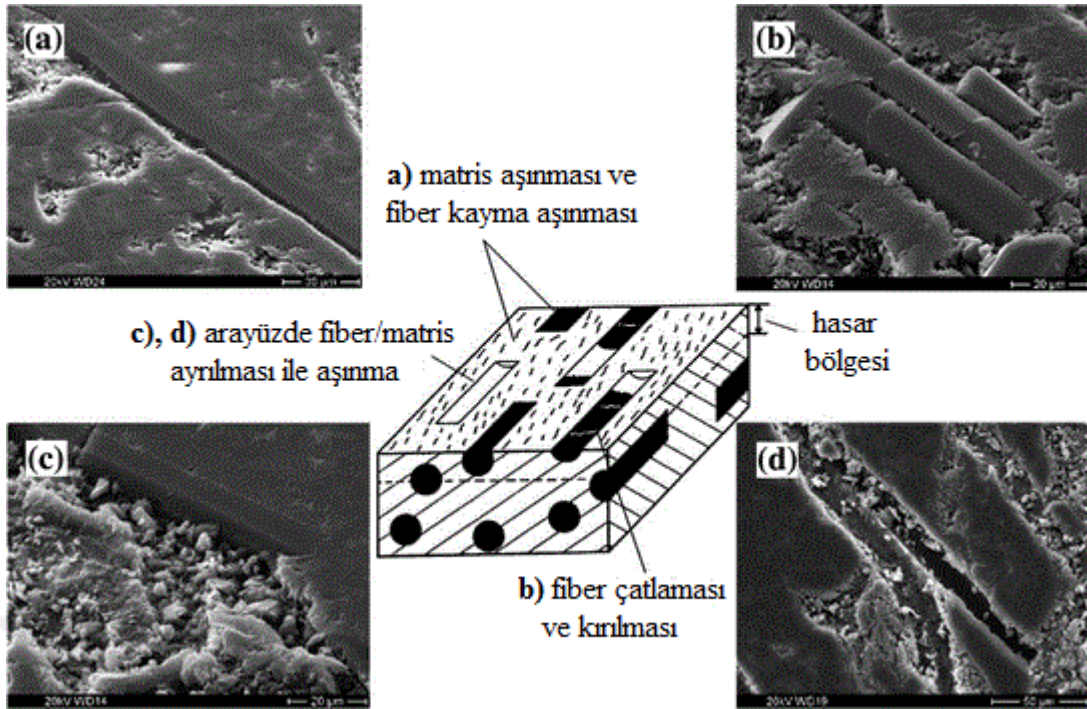
Aşınma; izafi hareket halinde olan ve temas eden iki yüzey arasında mekanik etkilerle meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır (Tsujiimoto ve ark., 2018). Malzeme kaybı, mikro taneciklerin yüzeyden kopup ayrılmasıyla, bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi yoluyla veya aşınma sonucu meydana gelen aşınma kalıntılarının yüzeyi kazınmasıyla meydana gelebilmektedir. Günlük kullanımdaki malzemeler üzerinde baskın bir etkiye sahip olan aşınma mekanizmalarını oluşum şekillerindeki farklılığa göre adhezyon, abrazyon, korozyon, yorulma (pitting) ve erozyon aşınması olarak sınıflandırmak mümkündür. Dış etkenler malzemenin temas yüzeyinde çok farklı fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana getirebilmektedir. Buna bağlı olarak özellikle tribolojik uygulamalarda farklı aşınma mekanizmaları tek başına baskın olabildiği gibi, sisteme ikili kombinasyonlar (abrazyon+korozyon vb.) şeklinde de etki edebilmektedir. Çelik ve dökme demir gibi geleneksel malzemeler, korozif

ortam dolayısıyla kısa sürede kullanım dışı kalmaktadır. Dolayısıyla, bu tür ortamlarda çalışan malzemelerin aşınmanın yanı sıra üstün korozyon özellikleri sebebiyle polimerik malzemeler grubundan seçilmesi uygun görülmektedir.

Polimer nanokompozitler sıvı ve gres yağlama maddelerinin başarısız olduğu uygulamalarda geleneksel polimer kompozitlere göre üstün tribolojik performans göstermektedir. Polimerik nanokompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını kapsayan tribolojik sistem, partikül dispersiyonu, malzemenin mekanik özellikleri, kalıntı morfolojisi, transfer filmi yapışması, morfolojisi, bileşimi ve kimyası gibi önemli sistem parametreleriyle birlikte değerlendirilmesi gereken karmaşık bir yapıya sahiptir (Burris ve ark., 2007).

Polimerleri güçlendirmek için sıklıkla kullanılan sert, mikrometre büyüklüğündeki partikül ve fiber dolgu maddelerinin dezavantajı, karşı yüzeyi aşındırmalarıdır. Bu takviyeler koruyucu bir transfer filminin oluşumunu önler, sürtünme katsayısını ve karşı yüzey pürüzlülüğünü artırır ve kompozitin üç gövdeli aşınmasına yol açar. Polimer kompozitlerde takviye olarak kullanılan nanopartiküller (100 nm'den küçük karakteristik boyutlara sahip bir partikül olarak tanımlanmaktadır) bu problemleri azaltma potansiyeline sahiptirler. Nanopartikül dolgu maddeleri çok düşük yükleme oranlarında dahi polimer matrisin aşınma miktarında belirgin düşüşler sağlamaktadır. Çoğunlukla yüzey pürüzleriyle aynı boyutta olan nanopartiküller, tribolojik olarak uygun transfer filmlerinin gelişimini teşvik edebilirler. Bir kez oluşturulduktan sonra transfer filmleri kompoziti doğrudan temas ve hasara karşı korumaktadır (Bahadur, 2000). Transfer filmleri, plastik olarak deforme olmuş döküntülerin mekanik olarak kilitlemesi, yapışma veya polimerin çıplak karşı yüzey ile doğrudan kimyasal bağlanması yoluyla oluşabilir (Burris ve ark., 2007).

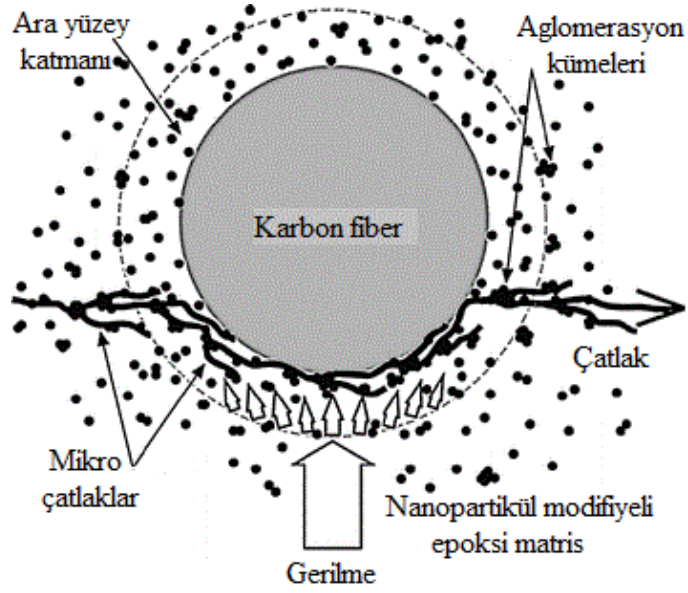
Şekil 2.17'de, kısa fiber takviyeli polimer kompozitlerde aşınma sonucu meydana gelen dört farklı tipik hasar mekanizması verilmiştir. Kayma aşınması sırasında matris malzeme soyularak, fiberler metal aşındırıcıyla birebir temas haline geçer ve aşınmaya maruz kalır. Fiberler kırılana kadar yavaş yavaş inceltir, fiber/matris ara yüzünde meydana gelen yoğun gerilme fiber/matris ayrılmasına sebebiyet verir. Fiberler matristen dışarı çekilir ve bu da yapıda büyük boşlukların oluşmasına neden olur (Chang ve Zhang, 2006).



Şekil 2.17. Kısa fiber takviyeli kompozitlerde aşınma sonucu meydana gelen hasar mekanizmaları; a) matrisin aşınması ve fiberlerin incelmesi, b) fiberlerin kırılması, c) fiberler ve matris arasında ara yüzey ayrılması, d) fiber soyulması (Chang ve Zhang, 2006)

Polimer kompozitlerde aşınma sırasında hasarın büyük ölçüde sürünme ve yorulma nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Nanoparçacıkların dahil edilmesiyle polimer matrisinin sertleştirilmesi ve toklaştırılması, fiberler ve matris arasındaki ara yüzey yapışma kuvvetine fayda sağlamaktadır (Jiang ve ark., 2008). Matris içindeki nano dolgu maddelerinin varlığı, daha etkili bir gerilme transferine katkıda bulunabilir ve fiber/matris ara yüzü boyunca gerilme konsantrasyonunu hafifletebilir. Eş zamanlı olarak, nanopartiküller ve polimer matrisi arasındaki bağlanmanın ve mikro çatlakların ayrılması, Şekil 2.18'de gösterildiği gibi mikro çatlakların gelişimi ve yayılması için daha fazla deformasyon enerjisi tüketebilir. Güçlendirilmiş bir fiber/matris bağlanması, esas olarak takviye edici fiberlerin aşınma sırasında matristeki tutulmasına yardımcı olur (Jiang ve Zhang, 2013).

Nanopartiküllerin eklenmesinin, modül, sertlik, mukavemet ve kırılma tokluğu gibi polimerlerin çeşitli mekanik özelliklerinde önemli bir artışa yol açtığı çeşitli çalışmalarda kanıtlanmıştır. Arttırılmış modüllü nanokompozit matrisin, sürtünme sırasında fiberlere daha güçlü destek verdiği düşünülmektedir. Fiber çevresindeki plastik deformasyonun azalması, fiberlerin matris içinde sıkı bir şekilde tutulmasını sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2009a; Jiang ve Zhang, 2013).



Şekil 2.18. Fiber / matris ara yüzü boyunca enerji yayılımının gerilme aktarımının gösterimi (Jiang ve ark., 2008)

Dolgu maddesi olarak dahil edildiklerinde mikron ve nano ölçekli parçacıkların polimer kompozitlerin aşınma davranışları üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri vardır. Olumlu tarafta: (1) sert nano dolgu maddelerinin eklenmesiyle polimerin sertliği, modülü ve kuvveti artırılabilir, bu nedenle aşınma direnci artırılır; (2) parçacıkları içeren aşınma kalıntısı, eş yüzeyler arasındaki sürtünmeyi hafifleten, karşıt yüzey üzerinde yumuşak ve kompakt transfer filmi oluşturmak için faydalıdır. CuS ve CuO gibi bazı parçacıklar (Friedrich ve ark., 2005), çelik karşıt yüzey ile tribo-kimyasal reaksiyonları indükleyebilme yeteneğine sahiptir, böylece transfer filminin karşı yüzeye yapışması güçlendirilir. Olumsuz tarafta: (3) parçacıklar, özellikle aglomerasyon kümeleri halinde, aşındırıcı bir gövde rolü oynayabilir ve kayma aşınmasının şiddetini artırabilir; (4) dahası, parçacıklar ayrıldıktan sonra matristeki süreksizlikleri artırabilir. Bu olumsuz etkiler, parçacıkların ve polimerlerin doğasından dolayı kaçınılmazdır. Parçacık dolgulu kompozitlerin kayma aşınması sırasında, yukarıda bahsedilen faydalı ve zararlı etkiler aynı anda meydana gelir ve birbirlerine karşı rekabet eder. Baskın olan, kompozitin nihai aşınma performansının yükseltilip yükseltilmeyeceğini belirler (Jiang ve Zhang, 2013).

2.6. Korozif Ortamın Kompozit Malzemeler Üzerindeki Etkileri

2.6.1. Su absorpsiyonu

Su absorpsiyonu polimer kompozitlerin bozunmasında önemli bir parametredir ve genellikle sıcaklık ve nem gradyanları varlığında gerçekleşir. Atomlar, yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye göç eder. Difüzyon hızı, sıcaklıktaki artışla birlikte hızla artar. Kusurların ve iç gerilmelerin varlığı da difüzyon sürecini hızlandırır. Epoksi reçine, yüzey katmanındaki atmosferden gelen suyu çok hızlı bir şekilde emerek kendini çevreleyen ortamla dengeye ulaşır ve ardından suyun tüm malzemeye yayılmasını sağlar. Emilen su genellikle sıvı halde değildir, hidrojen bağları ile polimere bağlanmış moleküller veya molekül grubundan oluşur.

Polimer kompozitlerde suyun emilimi ve taşınımı;

- 1) polimer matrisinde difüzyonla,
 - 2) üretim sırasında meydana gelen matris içindeki kusurlarla (mikro çatlaklar ve gözenekler)
 - 3) fiber/matris ara yüzü boyunca kılcallık yoluyla
- olmak üzere üç temel mekanizma ile gerçekleşebilir (Ma ve ark., 2018)

Genel olarak, bu mekanizmalara dayanarak, polimerik kompozitlerin difüzyon davranışı Fickian, Fickian olmayan (veya anormal) ve ortası olarak sınıflandırılmaktadır. Doğal fiber kompozitlerin oda sıcaklığında su emme modelinin genellikle Fickian davranışını (kimyasal reaksiyon meydana gelmez) takip ettiği, yüksek sıcaklıklarda ise kimyasal reaksiyonların meydana gelebileceği ve artan yaşlandırma sürelerinde emme davranışının Fickian olamayacağı bildirilmiştir. Fickian davranışı, su absorpsiyonunun kompozit içinde hızlı bir şekilde dengeye ulaşması ve zamanın bağımsızlığı ile korunmasıyla karakterize edilir (Assarar ve ark., 2011).

Su, Fickian olmayan difüzyona sebep olan kendine özgü bir karaktere sahiptir. Suyun, hidrojen bağı nedeniyle benzersiz bir madde olduğu iyi bilinmektedir. Hidrojen bağlanma bölgesi olmayan hidrofobik polimerlerde, su molekülleri arasındaki yüksek etkileşim enerjileri nedeniyle su molekülleri kümelenmesi meydana gelebilir. Bu, su konsantrasyonu arttıkça difüzyon katsayısının düşmesine neden olur. Hidrofilik polimerlerde ise, plastikleşme etkilerinden dolayı artan su konsantrasyonu ile difüzyon katsayıları artacaktır (Tan ve Thomas, 2016).

2.6.2. Polimer matrise etkileri

Polimerlerin su emme davranışı, serbest hacim, polimerik ağdaki çapraz bağlanma derecesi, morfoloji, penetrant ve konağın kimyasal afinitesi gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Polimerlere nano boyutlu hidrofobik katkı maddeleri dahil edilerek nem veya su emilimine karşı dirençleri arttırılabilmektedir (Kumari ve Liu, 2004; Ladhari ve ark., 2010). Polimerlere yapılan nano katkıların polimer içerisine su alım seviyesi üzerindeki etkileri farklılık gösterebilmektedir. Su seviyesi neredeyse hiç değişmeden kalabilir, katkısız polimerden daha düşük olabilir (Liu ve ark., 2008) veya ara yüzey etkisinden dolayı artış gösterebilir. Yani kompozitlerin difüzyon hızı katkı içeriğine göre artan veya azalan bir fonksiyon olarak tanımlanabilmektedir.

Polimer ile nano katkı arasında zayıf bağlanma durumunda, nano kompozitlerde inklüzyonların varlığı, polimer ve nanopartiküller arasındaki arayüz bölgesinde mikro gözeneklerin oluşumunu teşvik etmektedir. Güçlü bağlanma durumunda, yüksek spesifik alan ile karakterize edilen nano katkılar, nanopartikülü çevreleyen polimer zincirinin moleküler dinamiklerini kısıtlayarak polimer zincirlerinin gevşemesini geciktirmektedir. Böylece su moleküllerinin nano kompozitlerden difüzyonu polimerin geciktirilmiş gevşemesi ile azalmakta ve ara yüzey bölgesi su emiliminde olumlu bir rol oynamaktadır.

Son derece yüksek spesifik yüzey alanlarına ve iki boyutlu geometrilerine bağlı olarak grafen ve/veya grafen oksit partikülleri, polimerlerin bariyer özelliklerini geliştirmek için karbon nanotüplerden daha etkili katkı maddeleri olarak kabul edilmektedir (Starkova ve ark., 2013b). Nanotüplerin veya grafen oksit tabakalarının eklenmesiyle su alım seviyesinin büyük ölçüde azaltılması, nano katkıların epoksinin moleküller arası hareketlerini engellemesiyle açıklanmaktadır. Yüksek spesifik yüzey alanına sahip katkı maddeleri ile modifiye edilen epoksi saf epoksiden daha kompleks bir yapıya sahiptir. Polimer yapı ne kadar kompleks ise serbest hacim içeriği o kadar düşüktür (Abdelkader ve White, 2005; Prolongo ve ark., 2012). Serbest hacim içeriği azaldıkça su moleküllerini yaymak için kullanılabilir alan da azalmakta böylelikle su emilimi seviyesi düşmektedir. Sonuç olarak nano kompozitlerde, düşük serbest hacim içeriği dolayısıyla saf epoksi ile karşılaştırıldığında daha az su emilimi olmaktadır. Nano partikül katkısı epoksi reçine içerisinde homojen dağıtıldığında, partiküller ile epoksi matris arasındaki ara yüzey yapışmasının kalitesi artmaktadır. Homojen olarak dağıtılamayan partiküllerin neden olduğu aglomeralardaki boşluk oluşumu ara yüzeyi

zayıflatmaktadır. Bu durumda polimere yapılan katkı hem difüzyonu hem de su alım seviyesini arttırmaktadır (Starkova ve ark., 2013b).

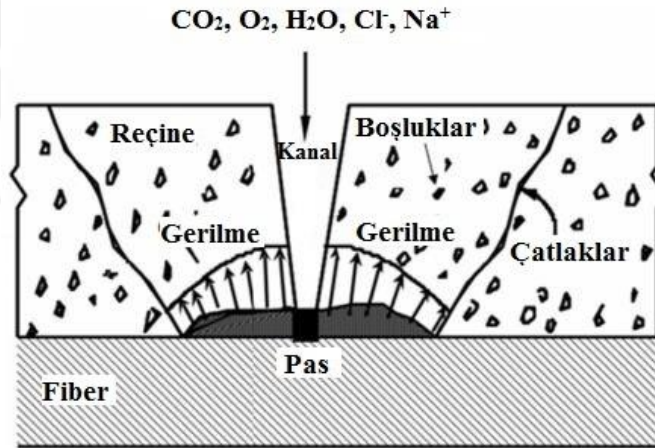
2.6.3. Bazalt fiberlere etkileri

Kompozit malzemelere nem girişi su moleküllerinin matrise ve bazı durumlarda fiberlere taşınmasını içeren difüzyonla gerçekleştirilir (Tsenoglou ve ark., 2006). Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemeler için, reçine matrisleri (Starkova ve ark., 2013a), fiber-matris ara yüzleri (Tsenoglou ve ark., 2006) ve/veya boşluklar (Zhang ve ark., 2011) ile gelişen üç çeşit su difüzyon mekanizması önerilmiştir. Ek olarak, fiber ve matrisin termal genleşme katsayılarındaki büyük fark nedeniyle kürleştime sırasında oluşan mikro çatlakların su alımını arttırdığı bildirilmiştir (Thwe ve Liao, 2002). Suya daldırma süresince, mikro çatlaklar makro çatlaklara dönüşebilir ve bu sırada şişmeye (swelling) bağlı bazı yeni mikro çatlaklar oluşabilir, bu da su alımının artmasına neden olur (Karbhari ve Xian, 2009). Çekme ve basma gerilmesi dahil dış baskılar, FRP kompozitlerin su alımında önemli bir rol oynar (Kafodya ve ark., 2015). Çekme gerilmesi, reçine matrisinin serbest hacim içeriğini (polimer moleküllerin boş hacmi, yani "boşluk") artırır ve mikro-çatlakların oluşumuna ve hatta fiber-matris ara yüzünün ayrılmasına yol açarak su alımında artışa neden olur. Çekme gerilmesinin aksine, basma gerilmesi serbest hacim içeriğini ve buna bağlı olarak su alımını azaltır. Eğilmede ise durum biraz daha karmaşıktır ve FRP'nin su alımını nasıl etkilediği konusunda çalışmalar sınırlıdır (Hong ve ark., 2017).

NaCl moleküllerinin tercihli difüzyonunun olduğu veya tuz varlığının numunede daha fazla su emilimi için ek bir kapasite oluşturduğu ifade edilmiştir. Deniz suyunda yaşlandırma, matrisin şişmesine, plastikleşmesine ve mekanik özellikleri azaltabilecek fiber-matris ara yüzünde ayrılmaya neden olabilir. Su emilimi tuzun konsantrasyonuna bağlıdır. Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde sıvı girişinin bir sonucu olarak meydana gelen değişiklikler geri dönüşüm süresine ve koşullarına bağlı olarak geri dönüşümlü, kısmen geri dönüşümlü, geri döndürülemez veya bu türlerin bir kombinasyonu olabilir. Polimer matrisinin plastikleştirilmesini ve şişmesini içeren geri dönüşümlü işlem için, mekanik özellikler genellikle kurutularak geri kazanılabilir. Fiberlere zarar veren geri dönüşü olmayan işlemlerde, matris kırılması, fiber-matris arayüz bölgesinin ayrılması, şişme ve iç stres oluşumunun neden olduğu delaminasyonlar ile mekanik özelliklerde kalıcı değişiklikler meydana gelir. Sıvıların

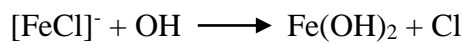
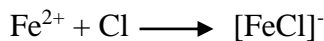
fiberlere zarar vermesi, absorbe edilen sıvı ile fiber arasındaki fiziksel veya kimyasal reaksiyonlarla başlar. Hasarın derecesi, sıvının türü, sıvı konsantrasyonu ve saldırı altındaki fiberlerin bileşimine bağlıdır.

Şekil 2.19’da deniz suyu ortamında bazalt fiber takviyeli polimerlerin korozyon mekanizmasının şematik diyagramı verilmiştir. Bazalt fiber yapısında Fe^{+2} formunda Fe elementi bulunmaktadır. Tuzlu suya daldırma sırasında H_2O , O_2 , CO_2 molekülleri ve Cl^- , Na^+ iyonları kanallar ve/veya boşluklar yoluyla matrise (reçine ve arayüz dahil) nüfuz edebilir, reçine ve/veya fiberlerle reaksiyona girebilir. Aynı zamanda fiberden Ca, Mg, Al ve K dahil olmak üzere bazı bileşenler ayrılır. Bu elementler, ara yüzde hidratlı bir tabaka oluşturabilir. Tüm bu etkiler kompozitin mikro yapısını değiştirerek çatlak oluşumuna ve mekanik teste fiberlerin kırılmasına neden olur. Bu sonuç, matrisin fiberler üzerindeki bağlanma etkisinin büyük ölçüde azaldığını göstermektedir (Wei ve ark., 2011).



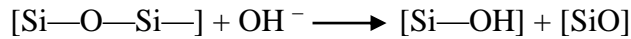
Şekil 2.19. Deniz suyu ortamında bazalt fiber takviyeli polimerlerin korozyon mekanizması (Wei ve ark., 2011)

Bazalt fiber takviyeli polimerlerdeki bozulma mekanizmasındaki temel fark Cl^- ve Fe^{2+} içeren kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanır. İlgili kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:



Yukarıda ifade edilen kimyasal reaksiyonlardan yola çıkarak, reaksiyon ürünü olarak meydana gelen ara yüzdeki pasın ($\text{Fe}_2\text{O}_3 - n\text{H}_2\text{O}$) daha fazla H_2O molekülü absorbe edebileceği söylenebilir. Bu durum, matrisin genişmesini tetikleyerek, bir çekme gerilmesi altında mikro çatlakların oluşumunu kolaylaştırmakta ve kompozitin mukavemet değerlerinde düşüşe neden olmaktadır (Wei ve ark., 2011).

Bazalt fiberler alkali çözelti ile yaşlandırıldığında, fiberin yüzeyinde bir korozyon tabakası oluşur. Hidroksil iyonu silika ağına doğrudan saldırır ve alkalinin hidroksit iyonları Si-O-Si bağlantısını bozar (Afroz ve ark., 2017):



Böylece çözeltilerdeki hidroksil iyonu konsantrasyonu ve nihai pH değeri azalır. Alkali çözelti aynı zamanda bazalt fiberlerin yüzeyinde sodyum, potasyum, alüminyum ve silisyumun (Na^+ , K^+ , Al^{3+} , Si^+) azalmasına yol açar. Bununla birlikte $-\text{Si}-\text{O}-$ yapısı tuza karşı etkisizdir ancak su ile temas ettiğinde, bazı alkali iyonlar fiberin iç yapısına girebilir (Afroz ve ark., 2017)

2.7. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Bazalt fiberler özellikle epoksi, polyester ve vinilester reçineleri gibi termoset polimerlerin güçlendirilmesinde kullanılmakta ve bu yöntemle çeşitli uygulamalar için yararlı kompozit yapılar üretilmektedir. Bu bölümde literatürde bazalt fiber takviyeli kompozitler üzerine yapılan önemli çalışmalar özetlenmiş ve bu tez çalışmasının literatürdeki yeri ifade edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar (Singha, 2012; Dhand ve ark., 2015; Fiore ve ark., 2015; Jamshaid ve Mishra, 2016); bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, bazalt fiber takviyeli kompozitlerin tribolojik özellikleri ve korozyon çalışma şartları altında bazalt fiber takviyeli kompozitler olmak üzere üç başlık altında sunulmuştur.

2.7.1. BFRP kompozitlerin mekanik özellikleri

Bazalt fiber takviyeli kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda, üstün mekanik özellikleri, nem emilimine, aşındırıcı sıvılara ve çevresel koşullara karşı dayanıklılığı, çok yönlülüğü gibi özellikleri nedeniyle, epoksi reçinesi matris olarak en fazla

incelenen termoset polimeri olmuştur (Fiore ve ark., 2015). Czigány ve ark, vinilester ve vinilester/epoksi hibrit reçineli bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik ve hasar davranışlarını reçine hibridizasyonunun ve bazalt fiber yüzeyinin işlenmesinin bir fonksiyonu olarak araştırmışlardır. Kompozitler reçine transfer kalıplama yöntemiyle üretilmiştir. Bazalt fiberlerin, kullanılan reçinelere yapışmasını iyileştirmek için epoksi ve vinil fonksiyonel grup olmak üzere iki farklı bağlama ajanı kullanılmıştır. Hibrit reçine sistemlerinde vinil ester/epoksi oranları sırasıyla 1-3, 1-1 ve 3-1'e eşit olarak ayarlanmıştır. Deneysel sonuçlar, kırılğan vinilesterin uygun bir epoksi reçinesiyle hibridize edildiğinde tokluğunun etkili bir şekilde geliştirildiğini göstermiştir. En iyi gelişme 1-1 oranındaki vinilester/epoksi hibrit reçineli kompozitlerde görülmüştür. Bunun yanı sıra akustik emisyon aktivitesinin yeri ile tespit edilen kompozitlerdeki hasar bölgesinin şekil ve boyutunun, bazalt fiber yüzeyine yapılan işlemlerden ve reçine kompozisyonundan bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır (Czigány ve ark., 2005).

Chenghong ve ark. S-2 camı, aramid ve bazalt fiber takviyeli üç farklı epoksi kompozitin darbe sonrası oluşan hasar modlarını ve mekanik özelliklerini (post-impact) analiz etmişlerdir. Tüm tek yönlü tabakalar sıcak pres kalıplama yöntemiyle, aynı fiber hacim fraksiyonunda (% 60) üretilmiştir. Darbe hasar testleri çentiksiz numunelerle Charpy test düzeneğinde yapılırken, post-impact etkisi üç noktalı eğilme testi ile belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar düşük çarpma hızında, cam takviyeli kirişte meydana gelen hasarın mutasyonel bir değişime uğradığını, buna karşılık hasarın ilk aşamada bazalt ve cam kırışlerdeki ile benzer olduğunu göstermiştir. Enerjisi yüksek olan darbelerde, bazalt ve aramid numunelerde hasarın ilerlediği gözlenmiştir (Chenghong ve ark., 2008).

Chen ve ark., fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüplerin, bazalt fiberler ve fonksiyonelleştirilmiş çok katlı karbon nanotüplerle takviye edilmiş çapraz katlı epoksi tabakaların özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Araştırma sonuçları, çok duvarlı CNT takviyesinin kompozitin elastisite modülü üzerine etkilerinin yüzeyin fonksiyonelleştirilmesinden bağımsız olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, bazalt fiberlerle takviye edilmiş epoksi esaslı tabakalar içinde fonksiyonelleştirilmiş nanotüplerin hizalanması ve dağılmasına yönelik bir fizibilite çalışması niteliğindedir (Chen ve ark., 2009).

Lee ve ark., yaptıkları çalışmada, silanize edilmiş CNT/dokuma bazalt/epoksi kompozitlerin, modifiye edilmemiş ve asit ile modifiye edilmiş CNT esaslı

kompozitlerle karşılaştırıldığında daha iyi çekme ve termal özellikler gösterdiğini vurgulamışlardır (Lee ve ark., 2010).

Yusriah ve ark., içi boş polimerik mikro kürelerin, cam, bazalt ve karbon dokuma kumaş takviyeli vinil ester kompozitlerin spesifik mekanik özellikleri ve termal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, kompozitlerin eğilme ve darbe mukavemetlerinin, içi boş polimerik mikro kürelerin ilavesi ile az miktarda arttığını göstermiştir. Öte yandan eğilme modülünde bir miktar azalma gözlenmiştir. Saf vinilesterin termal kararlılığı dokuma camı ve karbon eklenmesiyle geliştirilmiş, fakat içi boş polimerik mikro kürelerin ilave edilmesiyle azalmıştır (Yusriah ve ark., 2010).

Lopresto ve ark. çalışmalarında, vakum torbalama yöntemi ile ürettikleri, e-camı ve bazalt düz örgü kumaş takviyeli iki farklı epoksi tabakanın yarı-statik mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Fiber hacim fraksiyonları matris yanma testleri ile ölçülmüş, bazalt ve cam tabakalar için sırasıyla % 51 ve % 46 değerlerinde bulunmuştur. Deneysel sonuçlara göre elastisite modülü, basma ve eğilme mukavemeti, çarpma kuvveti ve enerji bakımından bazalt malzeme daha yüksek performans sergilemiştir. Ayrıca kısa kiriş mukavemet testleri, bazalt fiberler ile epoksi matris arasında oldukça iyi bir ara yüzey yapışması olduğunu, bu yapışmanın E-cam ve epoksi matris arasındakinden daha kötü olmadığını göstermiştir (Lopresto ve ark., 2011).

Kim ve ark., yüzeyi düşük sıcaklıklarda atmosferik oksijen plazma işlemine tabi tutulmuş bazalt fiberin, dokuma bazalt/epoksi kompozitlerin tabakalı kırılma davranışına etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan bazalt dokuma kumaşlar önce bir aseton banyosuna koyulmuş ve damıtılmış suyla yıkanmış daha sonra düşük sıcaklıkta atmosferik oksijen plazmasına maruz bırakılmıştır. Deneysel sonuçlar, fiziksel dağlama ve fiber yüzeyinde oksijen ve azot içeren kimyasal fonksiyonel grupların oluşturulmasıyla birlikte bazalt fiberin ıslanabilme özelliğinin belirgin şekilde arttığını göstermiştir. Bunun yanı sıra oksijen plazma işlemiyle fiber/reçine ara yüzleri arasındaki yapışma kuvvetinin iyileştiği ve bunun dokuma bazalt/epoksi kompozitlerin katmanlar arası kırılma tokluğunu arttırdığı belirtilmiştir (Kim ve ark., 2011).

Dorigato ve Pegoretti yaptıkları çalışmada aynı alan yoğunluğuna sahip (200 g/m²) bazalt, E camı ve karbon fiber takviyeli epoksi esaslı tabakalı kompozitlerin statik çekme ve yorulma özelliklerini karşılaştırmışlardır. Tüm tabakalı kompozitler, vakum torbalama tekniği ile üretilmiştir. Karbon, cam ve bazalt takviyeli epoksiler sırasıyla % 63.5, % 56.3 ve % 61.3 hacimde fiber içermektedir. Deneysel sonuçlar,

bazalt fiber tabakaların karbon fiber bazlı tabakaların çekme mukavemet değerlerine yakın, cam fiber takviyeli tabakalardan ise daha yüksek elastik modül ve mukavemet değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Yorulma davranışları incelendiğindeyse bazalt fiber takviyeli tabakalar, cam fiber takviyelilere oranla daha yüksek performans göstermiştir (Dorigato ve Pegoretti, 2012).

Kim ve ark., silan ve asit ile işlenmiş çok duvarlı CNT'lerin, epoksi/bazalt kompozitlerin eğilme ve kırılma davranışları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla CNT/epoksi/bazalt kompozitlere mod I kırılma testi uygulanmadan önce CNT'lere sırasıyla asit ve silan uygulanmıştır. Sonuçlar, silan ile işlenmiş CNT/epoksi/bazalt kompozitlerin eğilme özellikleri ve kırılma tokluğunun, asit ile işlenmiş CNT/epoksi/bazalt kompozitlerinkinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. SEM görüntüleri, silan ile işlenmiş CNT/epoksi/bazalt kompozitlerin eğilme ve kırılma özelliklerindeki iyileşmenin, silan ile modifiye edilmiş CNT'ler ile matris olarak kullanılan epoksi reçine arasındaki dispersiyon ve ara yüzey etkileşiminin artması nedeniyle meydana geldiğini ortaya koymuştur (Kim ve ark., 2012).

Colombo ve ark., matris olarak vinilester ve epoksi reçine kullandıkları bazalt fiber kompozitlerin statik ve yorulma özelliklerini incelemiştir. Kompozitlerin imalatında vakum infüzyon tekniği kullanılmıştır. Üretilen her iki panelin fiber hacim oranı % 50 'ye eşittir. Statik çekme ve basma testleri, statik delaminasyon testleri, klasik ve kademeli yorulma testleri olmak üzere farklı türde mekanik testler planlanmış ve uygulanmıştır. Epoksi kompozitlerin vinilester kompozitlerle kıyaslandığında daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca hasar modları daha kompakt ve fiber kopma eğilimleri daha düşüktür. Yorulma eğrileri göz önüne alındığında, her iki kompozit numune için yorulma eğrilerinin benzer bir eğilim gösterdiği vurgulanmıştır (Colombo ve ark., 2012).

Varley ve ark., yaptıkları çalışmada matris-fiber etkileşiminin epoksi-bazalt kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini daha iyi anlamak için farklı modifikasyon yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilkinde fiberin yüzey pürüzlülüğünü arttırmak için koloidal silika uygulanmış, ikincisinde ise fiber yüzeyine sol jel yöntemi kullanılarak kimyasal olarak epoksi silan bağlanmıştır. Buna ek olarak, bu iki stratejiyi birleştiren karma bir yaklaşım kullanılmış ve son olarak fonksiyonelize edilmiş hibrit yüzeye, trietilentetramin eklenerek modifiye edilmiştir. Tek katlı kompozitlerden elde edilen sonuçlara göre, sol/jel ve epoksi silan yönteminde gerilme mukavemeti sırasıyla % 66 ve % 27 oranında artarak özelliklerin

iyileştirilmesi bakımından en büyük ilerlemeyi göstermiştir. Birleştirilmiş yüzey düzeltme yöntemleri uygulandığında ise, aynı tabakalarda % 45 ve % 13 oranlarında artış görülmüştür (Varley ve ark., 2013).

Ary Subagia ve ark., farklı mikro/nano turmalin partikül yüklemesinin, bazalt fiberlerle takviye edilmiş epoksi kompozit levhanın mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. İncelenen tüm kompozitler vakum destekli reçine transfer kalıplama metoduyla üretilmiştir. Deneysel sonuçlar bazalt/epoksi kompozite turmalin partikülleri ilave edildiğinde çekme, eğilme mukavemetinde ve eğilme modülünde belirgin iyileşme sağlandığını göstermiştir. En iyi sonuç %1'lik yüklemde elde edilmiştir (Ary Subagia ve ark., 2014).

Zhang ve ark., deformasyon hızı ve sıcaklığın bazalt fiber takviyeli polimerin (BFRP) gerilme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kompozitler, vakum destekli reçine infüzyonu (VARI) kullanılarak üretilmiştir. BFRP kompozitlerin dinamik çekme testleri, servo-hidrolik yüksek hızlı test sistemi kullanılarak $19-133 \text{ s}^{-1}$ arasında değişen deformasyon hızlarında yapılmıştır. Ek olarak, -25 ile $100 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklığın etkisi, 19 s^{-1} deformasyon hızında incelenmiştir. Sonuçlar, deformasyon hızı 19 'dan 133 s^{-1} 'e yükselirken, çekme mukavemeti, tokluk ve maksimum strain değerlerinin sırasıyla % 45.5, % 17.3 ve % 12.9 arttığını göstermiştir. Çekme mukavemeti, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar sıcaklık değişiminden bağımsızken, $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de azalmıştır. Bu azalmanın, epoksi matrisin yumuşaması ve camsı geçiş sıcaklığı aşıldığında fiberler ile matris arasındaki ara yüzeylerin zayıflamasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir (Zhang ve ark., 2016a).

Lu ve ark., çalışmalarında yüksek sıcaklığın bazalt fiber takviyeli polimer (BFRP) plakaların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Karşılaştırma için, cam fiber takviyeli (GFRP) plakalar aynı koşullar altında test edilmiştir. Sıcaklık oda sıcaklığından $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye arttığında, BFRP plakaların çekme mukavemeti ve elastisite modülü değerlerinin sırasıyla % 37,5 ve % 31 oranında azaldığı görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda bazalt fiber ve epoksi reçine matris arasındaki bağlanma kötüleşmekte, bu durum BFRP kompozitlerin belirgin bir şekilde bozunmasına neden olmaktadır. GFRP plakaları ile karşılaştırıldığında, BFRP plakaların çok daha iyi mekanik özelliklere ve sıcaklık direncine sahip olduğu görülmüştür (Lu ve ark., 2016).

Kuzmin ve ark., yaptıkları çalışmada yüzey modifikasyonunun kompozit malzeme performansı üzerindeki rolünü incelemiştir. Bu fikirden yola çıkarak, silan

ve nano-hibrit kaplamaların bazalt fiberlerin ve kompozitlerinin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitin ara yüz bağımlı güçlendirmek için fiber yüzeyine SiO_2 nanopartikülleri eklenmiştir. Kızılötesi spektroskopi bazalt fiber yüzeyinin ve nano- SiO_2 modifikasyonunun başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir. Yüzey modifikasyonu, bazalt fiberlerin çekme mukavemetinde kaplanmamış fibere kıyasla belirgin bir artışa neden olmuştur. Silan ile muamele edilmiş fiberlerin çekme mukavemeti, kaplanmamış fiberlerden % 23 daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu, silanın bazalt fiberlerin mukavemet muhafazasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca silan ajanlarının nano-hibrit kaplamanın hazırlanması için kullanılabileceği belirtilmiştir (Kuzmin ve ark., 2017).

Bulut çalışmasında grafen nanoplatelet (GNP) içeren bazalt fiber takviyeli epoksi polimer kompozit levhaların mekanik özelliklerini (çekme, eğilme ve darbe dayanımı) incelemiştir. Test sonuçları, ağırlıkça %0.1 oranında GNP katkısının, gerilme mukavemeti (240 MPa), eğilme mukavemeti (273.91 MPa) ve darbe mukavemeti (110 kJ / m) açısından ağırlıkça %0.2 ve %0.3 katkılı kompozitlere kıyasla daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur. %0.2 ve %0.3 GNP katkılı kompozitlerin mekanik özelliklerindeki düşme eğiliminin katkı malzemelerinin aglomerasyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir (Bulut, 2017).

2.7.2. BFRP kompozitlerin tribolojik özellikleri

Öztürk ve ark., aşınma özelliklerini incelemek için bazalt fiber ve seramik kullanarak hibrit kompozit malzeme üretmiştir. Bazalt fiber içeriği %0 ile %40 arasında değiştirilmiş, seramik içeriği ise sabit (hacimce % 10) tutulmuştur. Hibrit kompozitlerin mekanik ve aşınma özellikleri, ısıtılmış bir ball-on-disk aparatı kullanılarak incelenmiştir. Sürtünme katsayısının, disk sıcaklığı 300 C'ye yükseldiğinde doğrudan arttığı gözlemlenmiştir. Bazalt fiber oranı arttığında, hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı da çarpıcı bir şekilde artış göstermiştir. Disk sıcaklığından sonra aşınma miktarını etkileyen en önemli faktör kayma hızı olarak belirtilmiştir. XRD sonuçlarında, aşınma kalıntıları içerisinde Fe ve Fe_2O_3 tespit edilmiş, bu da ağır aşınma koşullarında diskte de aşınma meydana geldiğini göstermiştir (Öztürk ve ark., 2007).

Zhang ve ark., kısa bazalt fiber (BF) takviyeli poliimid (PI) matrisli kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemiştir. Aşınma testleri kuru

kayma koşulları altında GCr15 çeliği kullanılarak blok-halka test düzeneğinde yapılmıştır. BF/PI kompozitlerin sürtünme ve aşınma miktarının uygun miktarlarda (ağırlıkça %10) bazalt fiber takviyesiyle geliştirilebileceği ifade edilmiştir. Sürtünme prosesi sırasında, karşıt yüzey üzerinde oluşan transfer filmi BF/PI kompozitlerinin sürtünme katsayısını ve aşınma miktarını azaltmıştır. Test sonuçları, BF/PI kompozitlerinin yüksek yük (200 N) ve kayma hızında (0.862 m/s) tribolojik performanslarının daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur (Zhang ve ark., 2009b).

Zhang ve ark., yaptıkları bir diğer çalışmada katı yağlayıcıların (MoS₂ ve grafit), sıcak pres kalıplama tekniği ile imal edilmiş kısa bazalt fiber takviyeli poliimid kompozitlerin tribolojik performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, katkı maddesi olarak kullanılan MoS₂ ve grafitin, BF takviyeli poliimid (BFs/PI) kompozitlerin aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığını ortaya koymuştur. En iyi sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı kombinasyonu için, MoS₂ ve grafitin hacimce optimum katkı oranları sırasıyla % 40 ve % 35 bulunmuştur. Katkılı BFs/PI kompozitlerin tribolojik özelliklerinin kayma hızı ve uygulanan yük gibi kayma koşullarıyla yakından ilişkili olduğu da tespit edilmiştir (Zhang ve ark., 2009c).

Wang ve ark., çalışmalarında bazalt kumaş takviyeli fenolik kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışını geliştirmek için tek başına veya her ikisi birlikte olmak üzere grafit ve nano SiO₂ katkısı kullanmışlardır. Hazırlanan kompozitlerin farklı kayma koşulları altındaki tribolojik özellikleri bir blok-halka test cihazıyla sistematik olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, tek başına grafit katkısının bazal kumaş kompozitlerin tribolojik özelliklerini arttırmada nano SiO₂'den daha faydalı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte katkı kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışının, nano SiO₂ ve grafit birlikte eklendiğinde daha da geliştiği ve aralarında sinerjik bir etki olduğu belirtilmiştir. Farklı kayma koşullarındaki tribolojik testler, yüksek kayma hızı ve yükü altındaki tribolojik uygulamalar için bazalt fiber/grafit/SiO₂ kompozitlerin daha uygun olduğunu ortaya koymuştur (Wang ve ark., 2010).

Shoufan ve ark., ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) matriste üstün mekanik ve tribolojik performansları nedeniyle ağırlık oranı % 5 ila % 20 arasında değişen bazalt fiber dolgu kullanarak ürettikleri kompozitlerin mekanik ve tribolojik performanslarını araştırmışlardır. Sonuçlar, UHMWPE kompozitlerin darbe dayanımının bazalt fiber dolgusuyla azaldığını, ancak mukavemet, sertlik ve çentik önleyici sürünme gibi özelliklerinin iyileştiğini ortaya koymuştur. UHMWPE kompozitler tribolojik performansları açısından değerlendirildiğinde; kompozitlerin

aşınma kaybı bazalt fiber ağırlık yüzdesinin artması ile belirgin biçimde azalmış, buna paralel olarak aşınma dirençleri artış göstermiştir (Shoufan ve ark., 2011).

Akinci ve ark., düşük yoğunluklu saf polietilen (LDPE) kompozitler ile bazalt dolgulu (ağırlıkça % 10, 30, 50 ve 70) LDPE kompozitlerin sürtünme ve aşınma performansını kuru kayma koşullarında test etmiştir. Aşınma testleri oda sıcaklığında 5, 10 ve 20 N yükler altında ve 0.5, 1.0 ve 1.5 m/s kayma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları ağırlıkça % 30'a kadar bazalt içeriğinin LDPE kompozitlerin sürtünme katsayısını azalttığını, ağırlıkça % 30'dan sonra bazalt oranlarındaki artışla LDPE kompozitlerin sabit durum davranışı sergilediğini göstermiştir. LDPE'nin sürtünme katsayısının, uygulanan yüklere ve kayma hızlarına bağlı olarak bazalt içeriğindeki artışla 0.51'den 0.13'e düşürüldüğü bulunmuştur. Yük ve kayma hızlarındaki artış ile saf LDPE ve bazalt dolgulu LDPE kompozitlerin aşınma miktarları yükselmiştir (Akinci ve ark., 2012).

Chairman ve Kumaresh Babu, tribolojik uygulamalarda kabul edilebilirliklerini belirlemek amacıyla bazalt ve cam takviyeli epoksi kompozitlerin iki gövdeli abrazif aşınma davranışını ball-on disk aşınma cihazı kullanarak araştırmışlardır. Aşınma testleri 5, 10 ve 15 N yükler altında 100 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Kompozitler el yatırma tekniği ile üretilmiştir. Çalışmada kompozitlerin yarı statik çekme, basma ve tabakalar arası kayma özellikleri de incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, bazalt takviyeli epoksi kompozitin, cam kompozitten daha yüksek çekme, basma ve tabakalar arası kayma mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir. Bazalt fiberler ile epoksi reçine arasındaki bağlanmanın iyi olması aşınma davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olurken, cam takviyeli kompozitlerde fiberler ve reçine arasındaki zayıf bağlanma aşınma performansını olumsuz etkilemiştir. Bazalt epoksi kompozitlerin aşınma miktarının daha düşük olmasının asıl nedeni yüksek sertliği ve yapısında abrazif aşınma direnci yüksek olan Fe elementi bulundurması olarak ifade edilmiştir (Chairman ve Kumaresh Babu, 2013).

Kim ve ark., karbon nanotüp ilavesinin (ağırlıkça %1 oranında) bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin aşınma davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Test sonuçları, asitle muamele edilmiş karbon nanotüplerin eklenmesinin, kompozitler arasındaki homojen yük transferinden dolayı bazalt/epoksi dokuma kompozitlerin aşınma direncini arttırdığını göstermiştir. Bazalt/epoksi kompozitlerin sürtünme katsayısı, 0.5-0.6 aralığında stabilize olurken, karbon nanotüp katkılı epoksi kompozitler için bu değerler 0.3-0.4 aralığında yer almaktadır. Bazalt/epoksi

kompozitlerin hacimsel aşınma kaybı bazalt/karbon nanotüp/epoksi kompozitlerden yaklaşık % 32 daha yüksek bulunmuştur (Kim ve ark., 2013).

Wang ve ark., karbon ve bazalt fiber takviyeli politetrafloroetilen (PTFE) bazlı kompozitlerin aşınma davranışlarını su ile yağlama koşulları altında araştırmış ve saf PTFE ile karşılaştırmışlardır. Karbon fiberler ile PTFE ara yüzeyinde bağlanmanın iyi olduğu, bazalt fiberlerin ise PTFE matrisi ile zayıf bir şekilde bağlandığı görülmüştür. Bu zayıf bağlanmanın uzun ara yüzey boşluğundan kaynaklandığı ifade edilmiştir. PTFE matrisinde bazalt fiber kristalleşme sağlarken, karbon fiber kristalleşmeyi engellemektedir. Kristalleşme oranı saf PTFE'ye kıyasla yüksek olan bazalt fiber/PTFE kompozitlerde su emilimi çok daha yüksektir. Aşınma testleri sonucunda bazalt fiber/PTFE kompozitlerde ciddi matris plastikleşmesi ve bozulma nedeniyle aşınma miktarının yüksek olduğu görülmüştür. En düşük aşınma miktarı karbon fiber/PTFE kompozitlerde bulunmuştur. Bunun nedeni plastikleşme ve sürtünme gerilmesine karşı sahip olduğu yüksek direncin karbon fiber/PTFE kompozitlerde fiber/matris arasındaki bağlanmayı iyileştirmesi olarak açıklanmıştır (Wang ve ark., 2014).

Zhou ve ark., tarafından yapılan çalışmada çok ölçekli grafen-bazalt fiber (BF) takviyesinin Poliamid 6 (PA6) kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine etkileri çekme ve eğilme testleri, Dinamik mekanik analiz (DMA), sürtünme ve aşınma testleri ile incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak grafen matris içerisine takviye edilmemiş, doğrudan bazalt fiberlerin yüzeylerine kaplanmıştır. Grafenin köprü etkisi sayesinde, BF ve PA6 matrisi arasında nano ölçekli ara yüzey alanı oluşturulmuş, bu da bazalt fiberler ile PA6 matrisi arasındaki ara yüzey yapışmasını geliştirmiştir. DMA sonucunda, bazalt fiberlerin yüzeyindeki homojen grafen kaplamanın, BF/PA6 kompozitlerin depolama modülü ve camsı geçiş sıcaklığını arttırdığı görülmüştür. Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemetlerinde sırasıyla % 18.2 ve % 34'lük artış meydana gelmiştir. Grafen kaplı BF, aşınma yüzeyinin yüzey pürüzlülüğünü etkili bir şekilde azaltmakta, grafen ile modifiye edilmiş BF ve PA6 matrisi arasında daha iyi bir ara yüzey yapışması oluşmakta ve grafen yüzeyde yağlama sağlamaktadır. BF yüzeylerine yapılan ağırlıkça farklı oranlarda grafen içeren kaplama, bahsedilen bu etkilerle kompozitlerin sürtünme katsayılarını ve aşınma miktarlarını düşürerek tribolojik özelliklerinin geliştirilmesinde büyük katkı sağlamıştır (Zhou ve ark., 2018).

2.7.3. Korozyon çalışma şartları altında BFRP kompozitler

Liu ve ark., bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin tuzlu suda yaşlandırma, nem emme, sıcaklık ve nem çevrimlerine yönelik toleranslarını araştırmışlardır. Takviye olarak cam ve bazalt fiber, matris olarak ise epoksi ve vinilester olmak üzere iki farklı polimer kullanarak aynı fiber hacim fraksiyonuna sahip dört farklı kompozit üretilmiştir. Epoksi ve vinilester reçineler yaygın olarak kullanılmaları, düşük maliyete ve yüksek ısı direncine (epoksinin ısıl bozunma sıcaklığı=74 °C, vinilesterin camı geçiş sıcaklığı=99 C⁰) sahip olmaları nedeniyle tercih edilmiştir. Deniz suyuna karşı direnç açısından, vinilester reçineler epoksilere göre daha iyi davranış göstermektedir. Numunelerin çekme ve kısa kırıç testleri yapılmış, bazalt kompozitlerin, 240 gün su ve tuzlu su ortamında yaşlandırıldıktan sonra elastisite modülü ve çekme mukavemetlerinde hafif fakat belirgin bir düşüş olduğu görülmüştür. Yaşlandırma sonuçlarına göre bazalt kompozitlerin (bazalt/epoksi, bazalt/vinilester) ara yüzey bölgeleri cam kompozitlerle kıyaslandığında hasara karşı daha zayıftır. Buna bağlı olarak uzun süre suya maruz kalacakları uygulamalarda bazalt takviyeli kompozitlerin modifiye edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır (Liu ve ark., 2006).

Wang ve ark, tek yönlü bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin kimyasal dayanıklılığını araştırdıkları çalışmalarında numuneleri oda sıcaklığında 15, 30 ve 90 gün boyunca sekiz farklı kimyasalda yaşlandırarak (% 30 vitriyol, % 5 hidroklorik asit, % 5 nitrik asit, % 10 sodyum hidroksit, doymuş sodyum karbonat çözeltisi, % 10 amonyak, aseton ve damıtılmış su) her periyot sonunda eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Deney sonuçları, bazalt fiberlerin asit ve alkali ortamlardaki farklı korozyon mekanizmalarına bağlı olarak korozyon davranışlarının da büyük ölçüde farklı olduğunu göstermiştir. Özellikle, alkali ortamlarda eğilme modülü orijinal değerine yakın kalırken, eğilme mukavemeti kademeli olarak azalmıştır. Asidik ortamlarda ise eğilme modülü ve eğilme mukavemeti aynı şekilde azalmıştır (Wang ve ark., 2008).

Scheffler ve ark., bazalt ve cam fiberlerin alkali NaOH ve çimento çözeltilerindeki yaşlanmasını araştırmıştır. Farklı kompozisyonlarda fiberler seçilmiş ve kalsiyum iyonlarının korozyon aktivitesinin yavaşlatılmasında önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. Bunun yanında, NaOH çözeltisinde yaşlandırılan fiberlerin dış yüzeyinin, çok uzun süre çimento çözeltisine maruz kalan fiberler ile karşılaştırıldığında yoğun biçimde paslandığı gözlemlenmiştir. NaOH ile yaşlanma sırasında, NaOH

korozyonunun karakteristik bir özelliği olan, fiberlerin aksenal uzunluğunu çevreleyen kırılğan bir tabaka oluşmuştur. Bu kırılğan katman soyularak fiberlerin çapında bir düşüşe ve mekanik özelliklerinin bozulmasına neden olmuştur (Scheffler ve ark., 2009).

Shokrieh ve Memar fiber sarma yöntemi ile üretilen, %5 sülfirik asitlik korozif ortamda yaşlandırılmış bazalt/epoksi kompozitlerin eğilme yükü altında gerilmeli korozyon davranışlarını analiz etmişlerdir. Numuneler üzerine çekme mukavemetlerinin % 30, % 50 ve % 70'ine eşit olacak şekilde üç farklı gerilme durumu uygulanmış, yükleme çekme mukavemetinin % 50'sini geçtiğinde bozunmanın hızlandığı görülmüştür. Çalışmada eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve kırılma enerjisinin bozunumları üstel fonksiyonlarla modellenmiştir. Numunelerin kırık kesitleri mikroskopik olarak incelenmiş ve plastikleşmenin numuneler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Shokrieh ve Memar, 2010).

Wei ve ark., asidik (HCl) ve alkalın (NaOH) ortamlarda kimyasal yüzey korozyonunun bazalt ve cam fiberler üzerindeki etkilerini mukavemet ve kütle kaybı oranları açısından incelemişlerdir. Bazalt fiberlerin alkaline kıyasla asit saldırılarına karşı son derece dirençli oldukları, bununla birlikte cam fiberlerin alkali ve asit direncinin benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bu çözeltiler arasında bazalt için alkali koşulların en aşındırıcı ortam olduğu sonucuna varılmıştır. Mineral/doğal fiberler üzerindeki uzun süreli kimyasal etki nedeniyle, korozyon etkisinin ölçülmesi veya saptanması güçtür. Korozyon oranı; sıcaklık, kompozitlerin bileşimi, yaşlanma süresi, çözelti bileşimi, pH ve fiberlerin boyutlarının büyüklüğü gibi faktörlere bağlıdır (Wei ve ark., 2010a).

Wei ve ark., bir diğer çalışmada kompozit malzemelerin deniz suyundaki bozulmalarını incelemek için epoksi reçineyi bazalt ve cam fiberlerle güçlendirmişlerdir. Deniz suyuna maruz bırakılmış kompozitlerin çekme dayanımı ve eğilme sonuçları, bekletme süresine bağlı olarak azalan bir eğilim göstermiştir. Bazalt fiber takviyeli kompozitlerin deniz suyu karşısı korozyon özelliklerinin cam fiber takviyeli polimerler ile benzer olduğu ifade edilmiştir. Bazalt fiberlerin içindeki Fe²⁺ iyonlarının içeriği etkin bir şekilde düşürüldüğü takdirde, deniz suyu ortamlarında kompozitlerin daha iyi ve daha stabil özelliklere sahip olabileceği sonucuna varılmıştır (Wei ve ark., 2011).

Manikandan ve ark., yeni yüzey modifikasyonlarının bazalt ve cam kumaşlarla güçlendirilmiş doymamış polysterin mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. El yatırma tekniğiyle oda sıcaklığında üretilen kompozit numuneler asit

(H_2SO_4) ve alkali (NaOH) ortama tabi tutulmuştur. İncelenen kompozitler üzerinde çekme, kayma ve darbe testleri yapılmıştır. Sonuçlar, doymamış polyesterli bazalt fiber takviyeli kompozitlerin performansının cam fiber takviyeli kompozitlerden üstün olduğunu göstermiştir. Asit ile muamele edilmiş bazalt fiber takviyeli kompozitlerin, diğer kombinasyonlara kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Cam fiber kompozitlerin bazalt fiber takviyeli kompozitlere göre alkali ortamdan çok daha fazla etkilendiği gözlemlenmiştir. Asit ile muamele edilmiş bazalt fiber takviyeli kompozitlerin darbe mukavemeti diğer kompozitlere kıyasla daha yüksektir (Manikandan ve ark., 2012).

Nasir ve ark., bazalt fiberlerin sülfürik asit içerisinde çatlak oluşumunu ve korozyonunu araştırmışlardır. Bazalt fiberlerin yüzeyinden kalsiyum ve demir içeren iyonların ayrılmasına atfedilen korozyon, mikroskopi ve element haritalama yardımıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Uzun bekleme sürelerinde fiber yüzeyleri boyunca spiral ve eksenel çatlaklar ortaya çıkmıştır. Cam fiberler ile karşılaştırıldığında, bazalt fiberlerin gücünün çok yüksek olduğu ve cam fiberlerin bazalttan daha erken bozulduğu belirtilmiştir (Nasir ve ark., 2012).

Pandian ve ark., yaptıkları çalışmada fiber takviyeli polimerik malzemelerin farklı çevresel koşullar altında mekanik özelliklerini incelemiştir. Bazalt fiber takviyeli doymamış polyester reçine kompozitleri, su emme davranışının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek için hem deniz hem de normal su kullanılarak suda yaşlandırma testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada incelenmek üzere dokuma bazalt, kısa bazalt, alkaline ve asitle muamele edilmiş bazalt fiber içeren kompozit numuneler hazırlanmıştır. Su emme testleri, numunelerin doyma durumuna ulaşana kadar farklı zaman dilimlerinde oda sıcaklığında suya batırılmasıyla gerçekleştirilmiş, daha sonra numuneler çekme, eğilme ve darbe testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar bazalt kompozitlerin, ara yüzey bölgesinin hidroliz nedeniyle oluşan hasara karşı daha savunmasız olabileceğini göstermiştir. Çekme testleri sonuçlarına göre; kısa bazalt fiber takviyeli kompozitlerin çekme mukavemeti neredeyse % 50-60 oranında azalmıştır. Kompozitlerin çekme mukavemetindeki büyük düşüş polyester matrisin deniz suyunda şişmesinden kaynaklanmıştır. Su emilimi kompozitlerin eğilme dayanımını önemli ölçüde etkilemiştir. Ancak, H_2SO_4 ve NaOH ile muamele edilmiş bazalt fiber kompozitlerin su emiliminden çok fazla etkilenmediği görülmüştür. Herhangi bir yaşlandırma işlemine tabi tutulmayan dokuma bazalt fiber kompozitler, normal su ortamında yaşlandırılan numunelere göre % 53, deniz suyunda yaşlandırılmış

numunelere göre % 48 daha fazla darbe dayanımı göstermiştir. Bunun nedeni; çevresel yaşlanma altında polimer matris kompozitlerin plastikleşmesi, yaşlandırma altındaki fiberlerin zarar görmesi ve kompozit ara yüzeylerinin hasara uğraması olarak ifade edilmiştir (Pandian ve ark., 2014).

Wu ve ark., bazalt fiberlerin ve epoksi esaslı kompozitlerin çeşitli korozif ortamlardaki (alkali, asit, tuz ve su) çekme özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Hızlandırılmış deneyler 25 °C ve 55 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre bazalt fiberler su ve tuz korozyonuna karşı güçlü bir direnç gösterirken, asit korozyonuna gösterdiği direnç orta derecededir. Alkali çözeltide ise ciddi bozulma meydana gelmiştir. Bazalt fiberlerin tuz, su ve alkali çözeltilerdeki bozunma mekanizması aşınmayla, asidik çözeltideki bozunma mekanizması ise kimyasal değişiklikler neticesinde meydana gelen hasar ile açıklanmıştır. Farklı korozyon ortamlarında, bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitler, matrisin fiberleri korumasından dolayı bazalt fiberlere göre daha gelişmiş mekanik özellikler sergilemektedir. Bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin korozyon direnci, matris modifiye edilerek geliştirilebilir (Wu ve ark., 2014).

Wang ve ark., çalışmalarında bazalt fiber takviyeli furan/epoksi kompozitlerin mekanik ve anti-korozyon özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada bazalt fiber için kullanılabilen furan ve epoksi esaslı yeni bir reçine sistemi geliştirilmiştir. Bunun yanında, hem reçine sisteminin hem de bazalt fiber takviyeli furan/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri asit ve alkalın ortamlarda test edilmiştir. Asit ve alkalın ortam olarak ağırlıkça %10 'luk HCl ve NaOH sulu çözeltileri hazırlanmıştır. Numuneler 50 °C sıcaklıktaki çözeltilerde belirli sürelerde yaşlandırılmış, ardından yapılan test sonuçları değerlendirilerek asit ve alkalın ortamın etkileri yorumlanmıştır. Test sonuçları furan/epoksi reçine sisteminin termal, mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin saf epoksi sisteminden daha iyi olduğunu göstermiştir. Bazalt fiber takviyeli furan/epoksi kompozitlerin oldukça iyi mekanik özelliklere sahip olması reçine sisteminin iyileştirilmesinin bir sonucu olarak görülmektedir. Bu kompozitler asit ortamına dayanım göstermiş, ancak alkali ortamda aynı direnci sağlayamamıştır (Wang ve ark., 2017).

Živković ve ark., tuzlu suda yaşlandırmanın, teknelerin ve yatların inşası için tasarladıkları keten (FFR, merkez bölgede) ve bazalt fiber takviyeli (BFR, dış katmanlarda) hibrit kompozitlerin darbe özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Matris malzemesi olarak düşük stiren emisyonlu yeşil vinil ester kullanılmıştır. Keten,

bazalt ve keten/bazalt hibrit kompozitlerin darbe davranışları ve hasar mekanizmaları hem kuru hem de tuzlu suda yaşlandırıldıktan sonra analiz edilmiştir. Tuzlu suda bekletilen kompozitlerde su emilimi en fazla FFR (% 5.92) kompozitlerde, en düşük ise BFR (%0.70) kompozitlerde olmuştur. FFR kompozitlerin tuzlu suda yaşlandırma sonunda darbe direnci artış göstermiştir. Bu artış keten fiberin hidrofilik yapısına bağlı olarak su emilimindeki artışla açıklanmıştır. Neme maruz kaldığında, keten fiberler daha sünek hale gelmekte ve sonuç olarak kompozitin tokluğu artmaktadır. Kuru ve yaşlandırılmış numunelerin darbe davranışında en belirgin fark, BFR kompozitlerde görülmüştür. Bu kompozitlerde yaşlandırmadan sonra nem emilimi en düşük seviyede olmasına rağmen darbe dayanımı daha düşüktür. Düşük darbe dayanımı hem bazalt fiberlerin hem de vinil ester matrisin gevrek yapıya sahip olmalarına atfedilmiştir. Kuru ve yaşlandırılmış hibrit kompozit numuneler benzer darbe davranışları göstermiş, aralarında sadece küçük farklılıklar gözlenmiştir. Bunun nedeni hibrit kompozitlerdeki keten fiber takviyesinin dış katmanlarının bazalt fiber takviye tarafından korunması ve bunun iyi bir ara yüzey yapışması sağlaması olarak açıklanmıştır (Živković ve ark., 2017).

Ma ve ark., çalışmalarında, su ve alkali çözeltilerin ve çözelti sıcaklıklarının jüt ve bazalt kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin kütle artışı, çekme özellikleri ve yüzey morfolojisi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Toplamda dört farklı kompozit numune (jüt dokuma/epoksi, alkali ile muamele edilmiş jüt dokuma/epoksi, silan ile muamele edilmiş jüt dokuma/epoksi ve bazalt fiber/epoksi) imal edilmiş ve 180 gün boyunca farklı yaşlanma koşullarına maruz bırakılmıştır. Bu dört kompozit örneğin su emme ve çekme özellikleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, bitki bazlı doğal jüt/epoksi numunelerin ağırlık artışlarının, mineral bazlı doğal bazalt/epoksi numunelerden daha fazla olduğunu göstermiştir. Alkali ve silan muamelesinin her ikisi de jüt fiberin su emilimini düşürmüş ve jüt dokuma/epoksi kompozitlerin çekme mukavemetini arttırmıştır. Kompozit numunelerin çekme mukavemetleri hem su hem de alkali ortamında azalmış, bu azalma alkali ortamlarda daha yüksek değerlerde seyretmiştir. Su ve alkali çözeltilerin sıcaklığının artması da, kompozit numunelerin çekme mukavemetlerinde düşüşe neden olmuştur (Ma ve ark., 2018).

2.8. Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri

Çevresel konularla ilgili artan endişe ve cam veya karbon takviyeli kompozitlere gerçekçi bir alternatif bulma ihtiyacı, yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir kaynaklardan elde edilen doğal-organik fiber katkılı polimer kompozitlere olan ilginin artmasına neden olmuştur. Kompozit pazarına girmeye başlayan doğal fiberlerin, nispeten zayıf fiziksel özelliklerinden dolayı yapısal elemanlarda kullanımları henüz sınırlıdır. Cam fiber, kompozitlerde kullanılan dünya çapındaki fiber hacminin % 89'unu temsil ederken, bu oran doğal fiberler için % 10 olarak ifade edilmektedir (Fragassa, 2017). Bazalt fiberler biyobozunur özellikte olmasalar da, volkanik bazalt kayaların yüksek sıcaklıklarda eritilmesi ve herhangi bir katkı maddesi kullanılmadan üretilmeleri nedeniyle literatürde doğal fiberler sınıfında anılmaktadır. Mekanik özellikler bakımından cam ve karbon fiberler arasında performans sergileyen bazalt fiberler, yüksek kimyasal ve korozyon direncine sahiptir. Üstün korozyon özellikleri, ekonomik ve doğal olmaları, toksik olmamaları ve solunmaları durumunda sağlığa zararlı etkilerinin bulunmaması, bazalt fiberlere, deniz araçları, tersaneler, açık deniz platformları, gemi kızakları gibi çok çeşitli deniz uygulamalarında kullanım potansiyeli sunmaktadır. Literatür taramasında bazalt fiberlerin termal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği bazı çalışmalar özetlenmiştir. Çalışmalar incelendiğinde deniz suyunun bazalt fiberlerin mekanik davranışları üzerindeki etkisini değerlendirmek için literatürde çok az veri olduğu dikkat çekmektedir (Davies ve Verbouwe, 2017).

Deniz ortamı; tuzlu suyun korozyon potansiyeli, derin sular altındaki yüksek basınç ve değişken hava koşullarından kaynaklanan yüksek baskılar nedeniyle malzemelerin çalışma koşullarını zorlaştırmaktadır (Graham-Jones ve Summerscales, 2015). Deniz gibi korozif tuzlu su ortamlarında kullanılacak kompozit malzemelerin çalışma performanslarının normal ortamın yanı sıra tuzlu su ortamında da araştırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada grafen nanoplateletler ile modifiye edilmiş epoksi matrisli bazalt fiber nanokompozitlerin mekanik ve aşınma özelliklerinin tuzlu suda yaşlandırma sürelerine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Epoksi matrisin su absorpsiyonunun düşük olduğu bilinmektedir. Ancak uzun çalışma koşullarında absorbe ettiği su miktarı matrisin plastikleşmesi, hidroliz reaksiyonları ve fiberler ile matris arasındaki bağlanmanın kötüleşmesi için yeterli olabilmektedir. Üretilen bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin deniz araçlarının gövdeleri, deniz sporları aletleri, gemi kızakları

ve açık deniz platformları gibi çeşitli deniz uygulamalarında kullanılması hedeflenmektedir. Kullanım yeri olarak önerilen bu uygulamalarda kompozit malzeme hem aşınmaya uğrayabilmekte hem de uzun süre tuzlu suya maruz kalmaktadır. Epoksi matris ile bazalt fiberler arasındaki bağlanmanın iyileştirilmesi, sürtünme ve aşınmanın azaltılması, matrisin plastikleşmesine neden olan su absorpsiyonunun minimize edilmesi için epoksi matrise grafen nanoplatelet katkısı yapılmıştır. Hidrofobik yapıları ve katı yağlayıcı özellikleri GNP'leri ön plana çıkarmakta ve CNT'lerden ayrıcalıklı duruma getirmektedir. Kompozitlerin farklı özellikleri GNP katkısı arttıkça katkı oranına paralel olarak iyileşmekte, ancak belirli bir doygunluktan sonra aglomerasyonlar, boşluklar ve gerilme yığılmaları nedeniyle kötüleşebilmektedir. Bu nedenle çalışmada farklı GNP katkı oranlarının özellikler üzerindeki etkileri de araştırılarak optimum GNP katkı oranı için belirli bir yüzde aralığı önerilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, incelenen kompozitlerin imalatında kullanılan materyal ve yöntemler verilmiştir. Kompozit malzemelerin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test yöntemleri ve analizler detaylandırılmıştır.

3.1. Malzemeler

3.1.1. Epoksi

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Momentive firması tarafından sağlanan, ticari olarak bulunabilen Bisfenol A bazlı MGS-L160 epoksi laminasyon reçinesi kullanılmıştır. MGS-L160 laminasyon reçinesi 700-900 mPas viskozitesi, 10°C-50°C arasında değişebilen proses sıcaklığı ve 45 dakikadan 4.5 saate kadar çıkabilen çalışma süresiyle özellikle vakum infüzyon uygulamalarında tercih edilmektedir. Kürleştirici olarak yine aynı firma tarafından sağlanmış olan 10-50 mPas viskoziteli MGS-H160 kullanılmış, tedarikleri Dost Kimya kimyasal ürünler şirketi tarafından sağlanmıştır. Kütleme işlemi oda sıcaklığında firmanın belirttiği karışım oranında (100:25) gerçekleştirilmiştir. MGS-L160/H10 reçine sisteminin DIN WL 5.3203-1:1978-11 standardına göre belirlenmiş olan mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Saf epoksi reçinenin mekanik özellikleri (HEXION)

Özellikler	Birimler	Değerler
Yoğunluk	[g/cm ³]	1,18-1,20
Eğilme mukavemeti	[N/mm ²]	110-140
Elastisite modülü	[kN/mm ²]	3,2-3,5
Çekme mukavemeti	[N/mm ²]	70-80
Basma mukavemeti	[N/mm ²]	80-100
Kopma uzaması	%	5,0-6,5
Darbe mukavemeti	[kJ/m ²]	40-50
Su absorpsiyonu (23°C)	24 sa. [%] 7 dak. [%]	0,10-0,20 0,20-0,50

3.1.2. Bazalt fiber

Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak tercih edilen bazalt fiber dokuma kumaşlar Tila Kompozit Temsilcilik İç ve Dış Tic. Ltd. Şti.’den temin edilmiş olup, alana bağlı yoğunlukları 300 g/m²’dir.

Bazalt fiberin kimyasal kompozisyonu ve tedarikçi firmadan sağlanan bazı özellikleri sırasıyla Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmiştir.

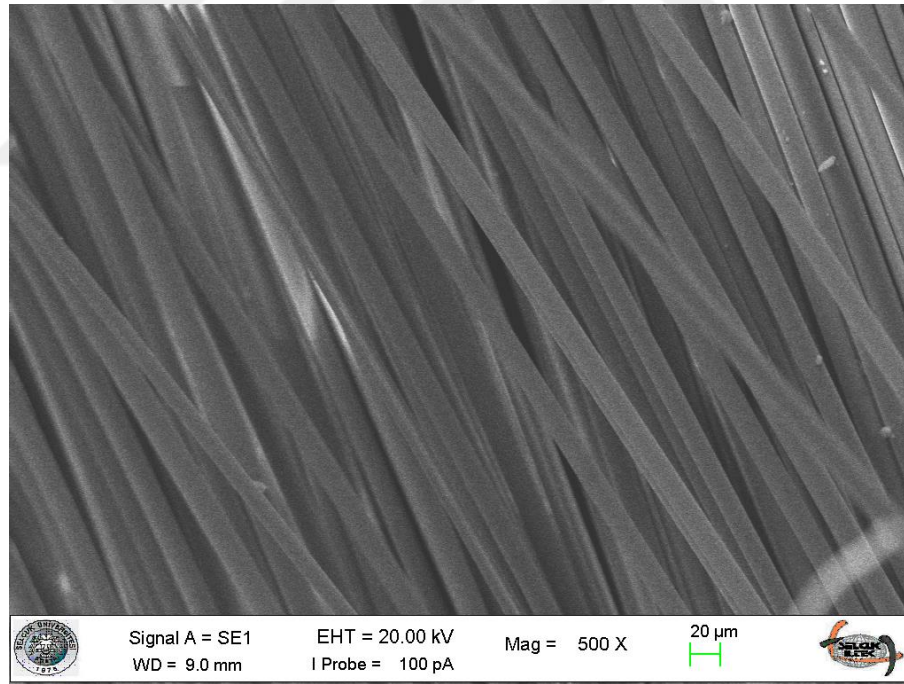
Çizelge 3.2. Bazalt fiberin kimyasal kompozisyonu (tedarikçi verileri)

Bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	diğer
% Ağırlık	45-60	12-19	5-15	6-12	3-7	0,9-2,0	2,5-6,0	2,0-3,5

Çizelge 3.3. Bazalt fiberin özellikleri (tedarikçi verileri)

Özellikler	Birimler	Değerler
Nem içeriği	(%)	0.2
Kalınlık	(mm)	0,45 ± 5 %
Ağırlık	(g/m ²)	300 ± 5
Isıl kararlılık	(°C)	(-260) –(+700)

Sahip olduğu yüksek mukavemet, yüksek kimyasal ve aşınma direnci ve yüksek termal iletkenlik özellikleri nedeniyle takviye elemanı olarak tercih edilen bazalt fiberin taramalı elektron mikroskop görüntüleri (SEM) Şekil 3.1'de verilmiştir.

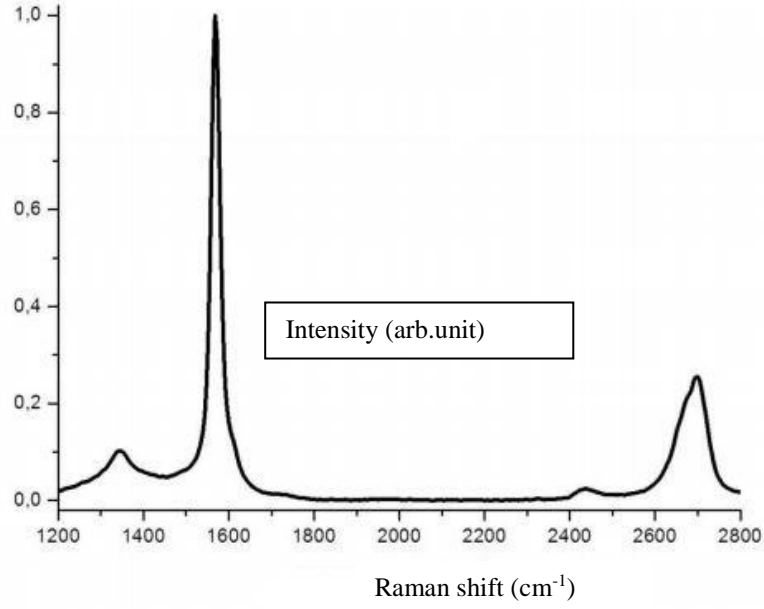


Şekil 3.1. Bazalt fiberin SEM görüntüsü

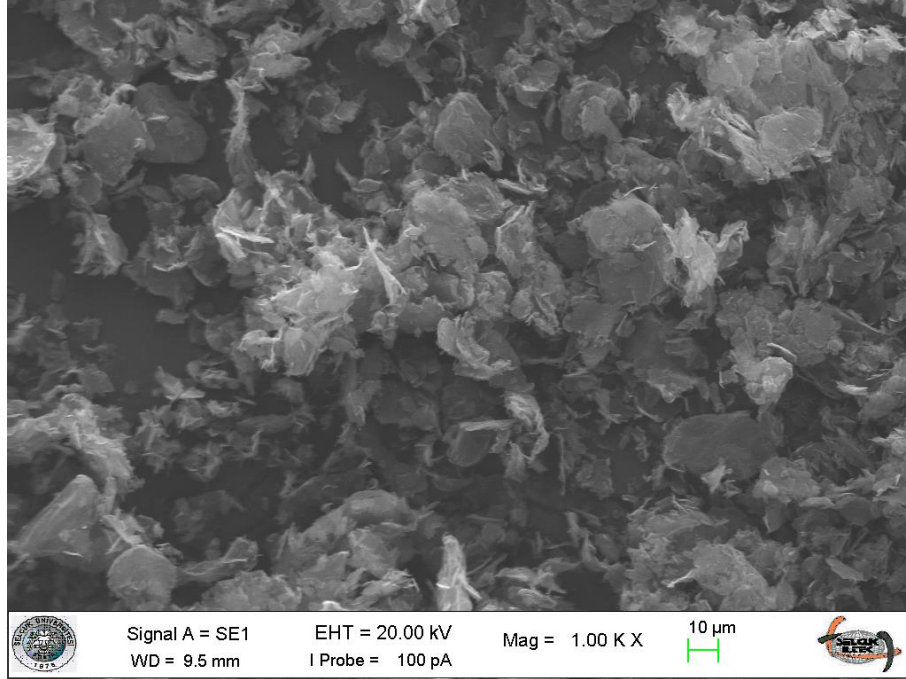
3.1.3. Grafen nanoplatelet (GNP)

Tez çalışmasında kullanılan grafen nanopartiküller, epoksi reçine ile iyi bir bağ oluşturmaları ve reçine içerisinde homojen olarak kolay dağıtılabilmeleri sebebiyle matris modifikasyonunda nano katkı malzemesi olarak tercih edilmiştir.

Grafen nanopartiküller (Graphene Nanoplatelet, 99.5+%, 6 nm, S.A:150 m²/g Dia:5µm) Nanografi Türkiye'den temin edilmiştir. GNP'lere ait raman spektrumu ve SEM görüntüsü sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.2. GNP'lerin Raman spektrumu (Nanografi)

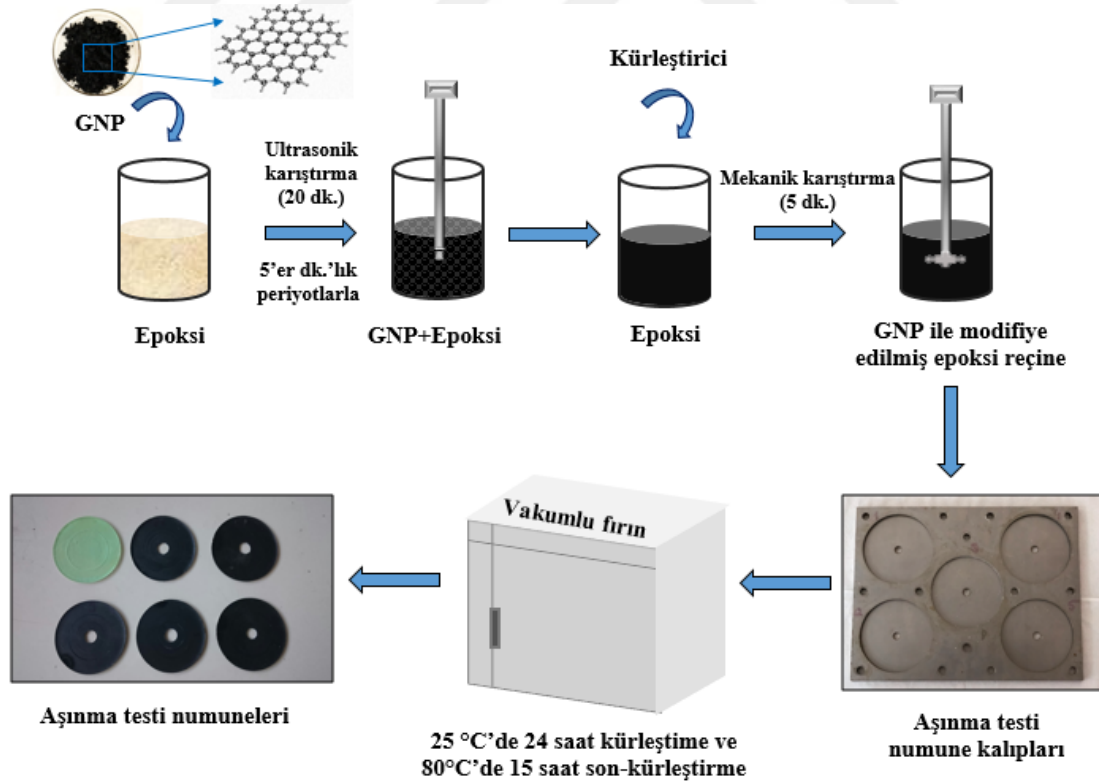


Şekil 3.3. GNP'lerin SEM görüntüsü

3.2. Nanokompozit Malzeme Üretimi

3.2.1. Grafen katkı oranlarının belirlenmesi

Yapılan literatür taramasında grafen katkılı nano kompozitlerle ilgili çalışmalarda, grafen katkı oranlarındaki değişiklikler göze çarpmaktadır. Bu oranlar genellikle, ağırlıkça %0.08 ile %4 arasında değişmektedir. Oranların belirlenmesinde herhangi bir kural olmayıp, özellikle epoksi ile yapılan çalışmalarda, katkı oranları arttıkça grafenin epoksi içerisinde homojen dağıtılması zorlaştığından genellikle 0.05-1 arasındaki oranların tercih edildiği görülmektedir (Papageorgiou ve ark., 2017). Malzemelerin mekanik özellikleri ile aşınma özellikleri arasında her zaman doğru bir orantı bulunmamaktadır. Mekanik özellikleri iyileştiren katkı oranları aşınma özelliklerini kötüleştirebilmekte veya aynı oranda iyileşme sağlayamamaktadır. Tez çalışmasında fiber takviyeli kompozitlere ilave edilecek grafen katkı oranları öncelikle epoksi reçine üzerinde denenmiştir.



Şekil 3.4. GNP katkılı epoksi nanokompozitlerin şematik olarak hazırlanması

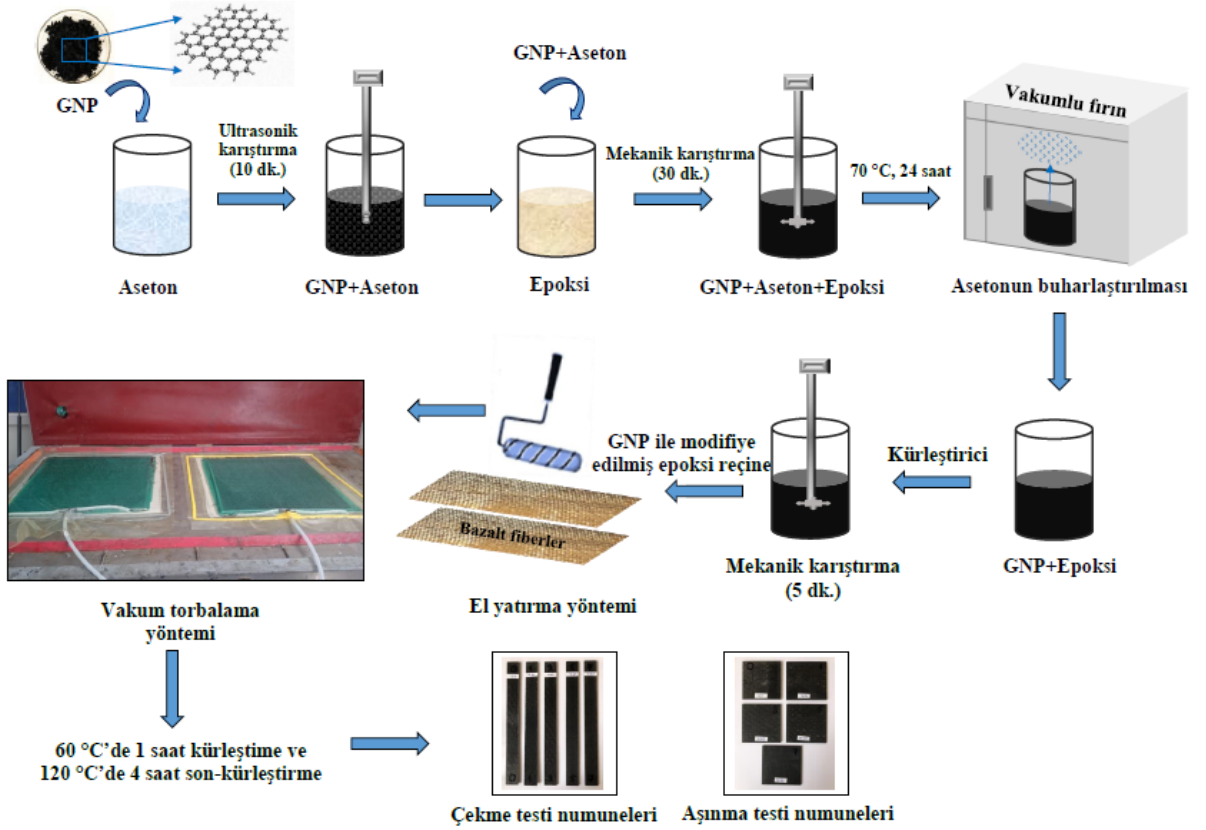
Saf epoksi ve ağırlıkça %0.1'den %0.5' e kadar grafen katkıli epoksi karışımları hazırlanarak, ball-on-disk deneylerinde kullanılacak malzemelerin üretimi için tasarlanmış 90 mm'lik dairesel kalıplara dökülmüştür.

Grafen nanoplateletlerin epoksi içinde homojen bir şekilde dağıtılabilmesi için uçlu sonikatör kullanılmıştır. İlk olarak, epoksi reçine miktarı belirlenmiş, daha sonra grafen partiküller epoksi reçinenin ağırlıkça %0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 oranlarına uygun miktarda tartılmıştır. Epoksi+grafen karışımları 5'er dakikalık periyotlarla 20 dakika uçlu sonikatörde karıştırılmış ve % 25 kürleştirici ilavesiyle birlikte mekanik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra kalıplara dökülmüştür (Şekil 3.4). Kalıplara dökülen saf epoksi ve grafen katkıli karışımlar literatüre uygun olarak başlangıçta 24 saat oda sıcaklığında, ardından 15 saat 80 °C'de kürlenmiştir (Ekrem ve ark., 2017). Üretilen polimer kompozitler belirlenen parametreler altında standartlara uygun olarak aşınma testine tabi tutulmuş ve aşınma özelliklerinin ideal olduğu grafen katkı oranları belirlenmiştir. Bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitler üretilirken bu katkı oranları dikkate alınmıştır.

3.2.2. Nanokompozit levhaların üretimi

Grafen nanoplatelet katkıli bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin üretimi epoksi karışımın hazırlanmasının ardından iki aşamada gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5). Öncelikle literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurularak belirlenen grafen oranlarına göre epoksi reçine içerisine ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5 ve 0.7 grafen nanopartiküller ilave edilmiştir. GNP'ler epoksi reçine içerisine eklenmeden önce 10 dakika süreyle sonikatör (sonic frequency 20 kHz) kullanılarak aseton içerisinde dağıtılmıştır. Karışım epoksi içerisine eklendikten sonra 10 dakika daha sonikatörle ve 30 dakika mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Asetonun epoksi karışımdan ayrılması için karışım, vakum fırınında 24 saat 70 °C'ye ısıtılmıştır. Asetonun uzaklaştırılmasından sonra epoksi reçine içerisine ¼ oranında kürleştiricisi ilave edilmiş ve karışım 5 dakika mekanik olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan GNP katkıli epoksi karışımı bazalt fiberlere bir rulo yardımıyla el yatırma tekniğiyle emdirilmiştir. Testlerde kullanılacak numunelerin minimum standartlarda belirtilen kalınlıkta olmaları için 12 kat bazalt fiber kullanılmıştır. Epoksi karışım emdirilen fiber tabakaları vakum infüzyon ünitesine bağlanarak vakum torbalama yöntemiyle üretilmiştir.

Bu teknik sayesinde partiküllerin filtreleme etkisi minimize edilmekte, kompozit tabakaların içerdiği hava kabarcığı hataları en aza indirgenmekte ve fiber tabakaları arasında homojen bir dağılım sağlanmaktadır. Üretilen kompozit levhalar 1 saat boyunca 60 °C’de kürlenmiş ardından 4 saat 120 °C’de post kür uygulanmıştır.



Şekil 3.5. GNP katkıli epoksi nanokompozitlerin şematik olarak hazırlanması

Kontrol grubu olarak katkısız bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitler aynı prosedür takip edilerek üretilmiş, üretim aşamasının sonunda 500 mm × 500 mm × 3.5 ± 0.2 mm boyutlarında levhalar elde edilmiştir.

3.3. Mekanik Karakterizasyon

Üretilen kompozit levhaların yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapılmış, levhalar standartlara uygun boyutlara getirilerek çekme testine tabi tutulmuştur.

3.3.1. Yoğunluk Ölçümü

Kompozit malzemelerin teorik yoğunluğu (ρ_t), literatürde Agarval ve Broutman tarafından verilen Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\rho_{ct} = \frac{1}{(W_f/\rho_f) + (W_m/\rho_m)} \quad (3.1)$$

Burada, W ve ρ sırasıyla ağırlık fraksiyonu ve yoğunluğu temsil etmektedir. f ve m alt indisleri sırasıyla fiber ve matris anlamına gelmektedir. Tez çalışmasında özellikleri incelenen kompozit malzemeler matris, fiber ve partikül katkı maddesi olmak üzere üç bileşenden oluştuğu için, yoğunluk ifadesi Denklem 3.2'deki şekilde değiştirilmiştir:

$$\rho_t = \frac{1}{(W_f/\rho_f) + (W_m/\rho_m) + (W_p/\rho_p)} \quad (3.2)$$

Buradaki p alt indisi partikül katkısını ifade etmektedir.

Kompozitlerin gerçek yoğunluk değerleri Arşimet prensibi (kaldırma kuvveti metodu) yardımıyla ASTM D792 standardına göre hesaplanmıştır. Arşimet prensibine göre bir maddenin bir sıvının içine tamamen batmasıyla, madde kendisini yukarı doğru iten bir kaldırma kuvvetiyle karşılaşmaktadır. Belli bir miktar sıvının yer değiştirmesine sebep olan kaldırma kuvvetinin büyüklüğü, maddenin yerine geçtiği sıvının ağırlığına eşdeğerdir.

Arşimet prensibinden yola çıkarak, kompozit numune önce havada kuru olarak (m_h), ardından yoğunluğu bilinen yardımcı bir sıvının içerisine daldırılarak (m_s) tartılmıştır (Şekil 3.6) ve deneysel yoğunluğu (ρ_d) Denklem 3.3'e göre hesaplanmıştır:



Şekil 3.6. Hassas terazi ve Arşimet yoğunluk kiti

$$\rho_d = \frac{m_k}{(m_k - m_s)} (\rho_s - \rho_h) + \rho_h \quad (3.3)$$

ρ_d = Numunenin deneysel yoğunluğu

ρ_s = Yardımcı sıvının (su) yoğunluğu

ρ_h = Havanın yoğunluğu

m_k = Numunenin havadaki kuru ağırlığı

m_s = Numunenin yardımcı sıvıdaki ağırlığı

Teorik ve deneysel yoğunlukların belirlenmesiyle birlikte, kompozitlerin boşluk hacim oranları (V_b) Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_b = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_d} \quad (3.4)$$

3.3.2. Sertlik Ölçümü

Üretilen kompozit levhaların sertlik ölçümleri ASTM D2240 standardına uygun olarak 1.40 mm çapında, 30° konik açılı, 0.1 mm radyüslü ölçüm ucu kullanılarak, shore sertlik ölçme cihazında yapılmıştır (Şekil 3.7).



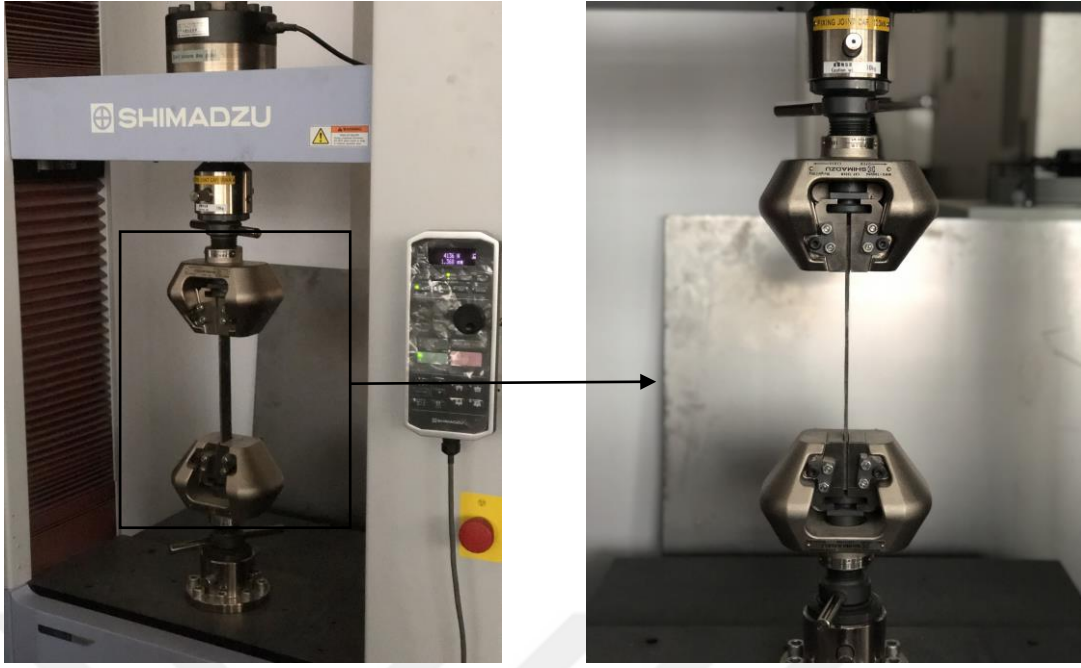
Şekil 3.7. Shore sertlik ölçme cihazı

Sertlik değerleri her bir numune için en az 5 noktadan yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak shore değeri cinsinden (Shore D) verilmiştir. Shore metodu özellikle polimer, elastomer ve plastik esaslı malzemelerin sertliklerini ölçmek için kullanılmaktadır.

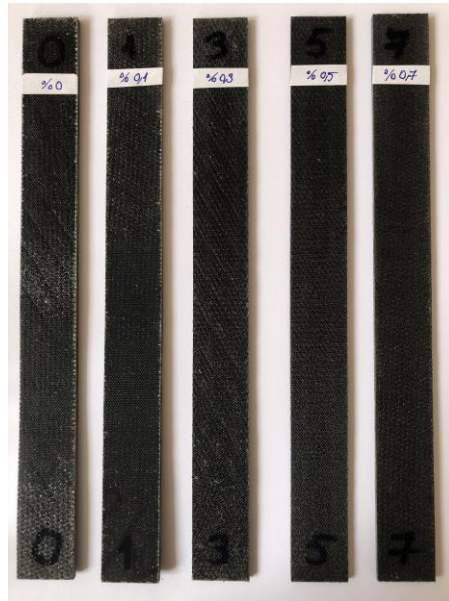
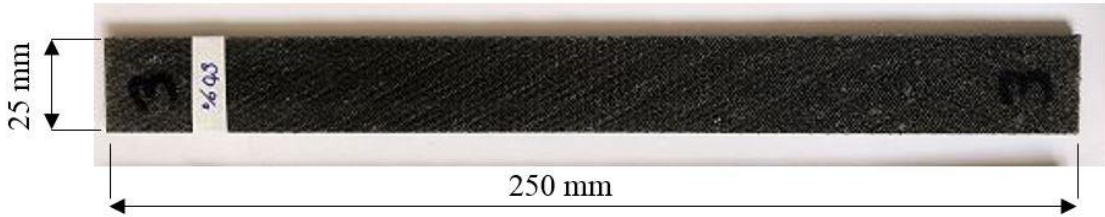
3.3.3. Çekme Testi

Kompozit malzemelerin çekme testleri, polimer matrisli kompozit malzemeler için çekme testi standardı ASTM D3039/3039 M-14'e uygun olarak Shimadzu AGS-X çekme cihazında (Şekil 3.8), 2 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Testler neticesinde kompozitlerin tek eksenli çekme etkisi altındaki mukavemet ve elastisite modülü değerleri bulunmuştur.

Bu test yöntemi; malzeme özellikleri, araştırma ve geliştirme, kalite tayini, yapısal tasarım ve analizleri için çekme özellikleri bilgilerini elde etmek üzere tasarlanmıştır. Çekme özelliklerinin; kompozit malzemenin bileşenleri, üretim yöntemi, tabakaların yönleri, numune hazırlama safhası, numunenin koşullandırılması, testin yapıldığı ortam şartları, numunenin uygun bağlanması ve konumu, test hızı, sıcaklık, numunenin içerdiği boşluk miktarı ve takviyenin hacimsel oranı gibi parametrelerden etkilendiği standartta belirtilmiştir.



Şekil 3.8. Çekme test cihazı ve tek eksenli çekme yüklemesine maruz bırakılmış fiber takviyeli kompozit numunesi



Şekil 3.9. Çekme testi numuneleri

Fiber takviyeli kompozit test numuneleri çenelere bağlanırken çift taraflı zımpara kâğıdı kullanılarak, çeneler ile numuneler arasındaki temas alanı arttırılmış, böylelikle hem numunelerin kayma olasılığı azaltılmış, hem de numuneler korunmuştur. Çekme testi için numuneler ASTM D3039 standardında belirtildiği şekilde 250 mm uzunluğunda ve 25 mm genişlikte hazırlanmıştır (Şekil 3.9). 12 kat bazalt dokuma kumaş ile üretilen kompozit numunelerin kalınlıkları 3.5 ± 0.2 mm'dir

Numunelere uygulanan yük (P) ve yer değiştirme (δ) değerleri anlık olarak kaydedilmiş ve numunelerin çekme dayanımları Denklem 3.5 ve Denklem 3.6 ile hesaplanmıştır;

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.6)$$

Denklemlerde σ_i numunede i 'inci kuvvet anında oluşan gerilmeyi (MPa), P uygulanan yükü (N), A ortalama kesit alanını (mm^2), P_{max} numunenin taşıyabildiği maksimum yükü (N) ve σ_{max} numunede oluşan maksimum gerilmeyi (MPa) ifade etmektedir.

Numuneye uygulanan yükün etkisiyle, yer değiştirmeye bağlı olarak numunede meydana gelen şekil değişimi;

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \quad (3.7)$$

Burada ε_i i 'inci yer değiştirme noktasında oluşan şekil değiştirme miktarını (mm/mm), δ_i yer değiştirmeyi (mm), L_g ekstansometre gage uzunluğunu (mm) göstermektedir.

Çekme elastisite modülü;

$$E_f = \frac{\Delta_\sigma}{\Delta_\varepsilon} \quad (3.8)$$

denklemleriyle hesaplanmıştır. Denklemde E_f çekme elastisite modülünü (MPa), Δ_σ seçilmiş iki gerilme noktası arasındaki farkı (MPa) ve Δ_ε seçilmiş iki şekil değiştirme

miktarı arasındaki farkı temsil etmektedir ($\Delta = 0.002$ alınır ve bu değerler arasındaki gerilme noktalarının farkı elastisite modülünün büyüklüğünü belirler).

Belirtilen denklemler kullanılarak kompozitlerin çekme mukavemeti, şekil değiştirme miktarı ve elastisite modülü değerleri hesaplanarak çekme eğrileri ve sütun grafikleriyle ifade edilmiştir.

3.4. Tribolojik Karakterizasyon

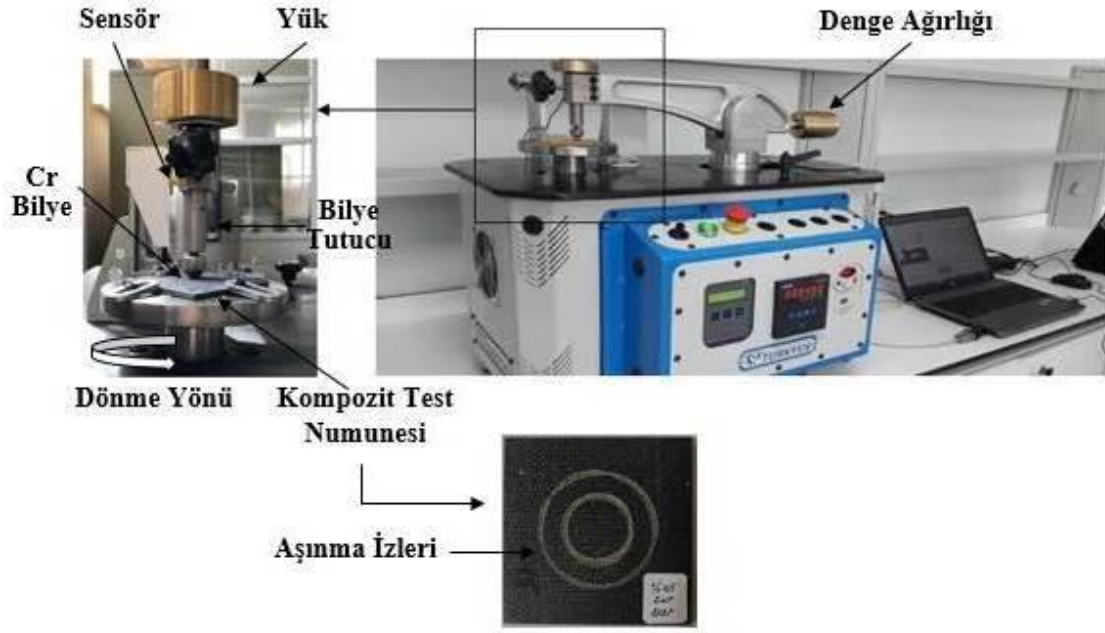
3.4.1. Sürtünme ve aşınma testleri

Kompozit numunelerin tribolojik özellikleri Şekil 3.10'da verilen ball-on-disk aşınma test cihazında (ASTM-G99), 6 mm çapında 62 HRC sertliğinde krom çeliği bilye kullanılarak incelenmiştir. Krom çeliği bilye yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip olup, aşınmanın sadece kompozit numunelerle sınırlı kalmasını sağlamıştır.

Daha önce yapılan ön çalışmalarda kayma hızı $0.5-1 \text{ ms}^{-1}$, yük ise 5-20 N arasında değiştirilmiştir. 5 N yük ile yapılan aşınma testlerinde kompozit numunelerde ağırlık kaybı bakımından birbirleriyle kıyaslama yapabilecek aşınma düzeyine ulaşamamıştır. 20 N yük altında ise bazı numunelerde belirlenen kayma mesafesi tamamlanmadan aşınma derinliği, aşındırıcı bilyenin yükseklik değerine yaklaşmış, bilye neredeyse numune içine gömülmüştür. Yapılan bu ön çalışmalar dikkate alındığında testler iki farklı yükte (10 N ve 15 N), 0.75 ms^{-1} sabit kayma hızında, bir saat süreyle (yaklaşık 2500 m) oda sıcaklığında ($25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$) gerçekleştirilmiştir. Bütün testler aynı şartlar altında üç kez tekrarlanmış ve sonuç olarak ortalama değerler verilmiştir.

Ball-on-disk aşınma cihazında, dairesel bir disk ile birlikte diskin üzerinde aşınma özellikleri incelenecek olan numuneyi bağlamak için bağlama pabuçları ve bağlantı noktaları bulunmaktadır. Numuneyi aşındırmak için kullanılan aşındırıcı bilye bir aşındırıcı tutucu ile sabitlenmektedir. Cihaz tablası üzerinde, bir ucunda denge ağırlığı bulunan terazi kolunun diğer ucunda numuneye uygulanacak kuvveti belirleyen sabit bir yük yerleştirme bölmesi mevcuttur. Dönme hareketi başladıktan sonra sabit yük altında aksel olarak oluşan kuvvetler sensörler yardımıyla hassas bir şekilde algılanarak bilgisayara aktarılmaktadır.

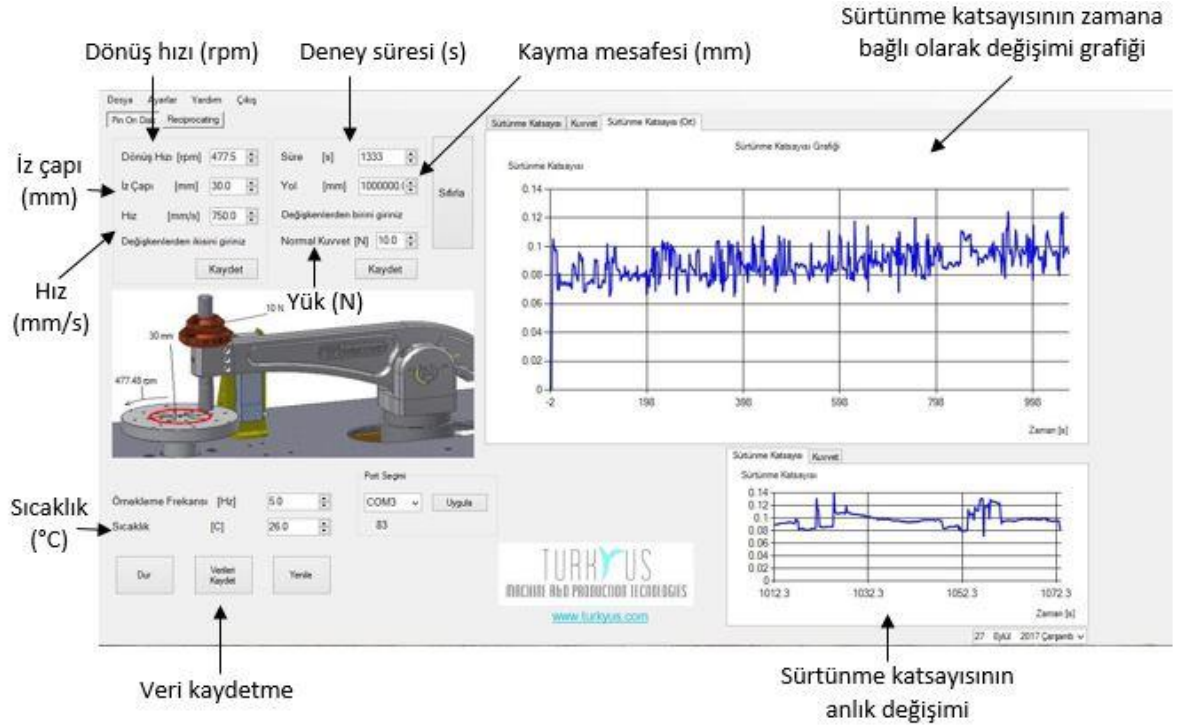
Testler sırasında numune üzerine çizilecek dairesel aşındırma iz çapı, terazi kolunun cihaz üzerinde bulunan cetvel bölmesine paralel olarak hareket ettirilerek, uygun çap değerinde sabitlenmesiyle ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.10. Ball-on-disk aşınma cihazı

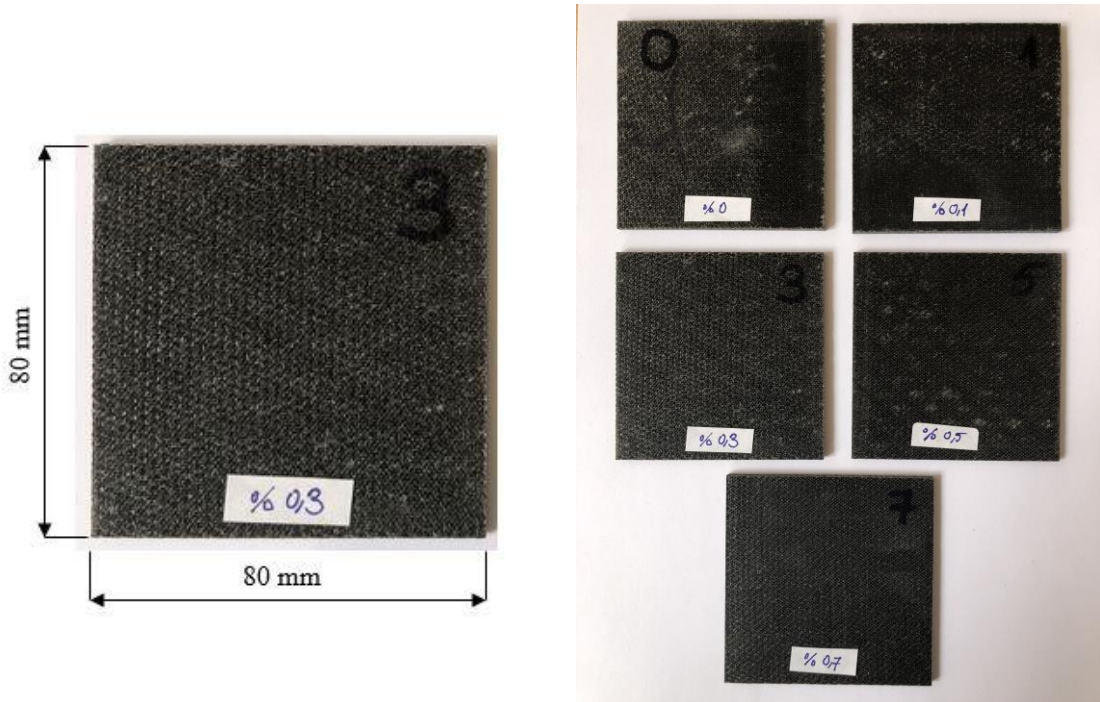
Aşındırma cihazı 30 N yük kapasitesine sahip olup, cihazdaki yazılım sayesinde (Şekil 3.11) testler sırasında kullanılan parametreler (hız, kayma mesafesi, yük), sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı kayıt altına alınabilmekte, sürtünme katsayısının zamana göre değişimi kaydedilebilmektedir. Bilgisayardaki yazılıma hız, yük ve kayma mesafesi değerleri girildiği takdirde test süresi otomatik olarak hesaplanmaktadır. Cihaz üzerindeki elektronik kontrol paneline test süreleri saniye/dakika/saat olarak girilebilmektedir.

Testler sonunda sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri zamana bağlı olarak excel formatında kaydedilmiş ve bu veriler sürtünme katsayısı-zaman grafiklerine dönüştürülmüştür.



Şekil 3.11. Ball-on-disk aşınma testi sırasında sisteme girilen parametreler

Aşınma testleri için kompozit levhalar elmas uçlu bir kesici kullanılarak 80 mm x 80 mm x 3.5 ± 0.2 mm boyutlarında kesilmiş, hazırlanan aşınma testi numuneleri Şekil 3.12’de verilmiştir.



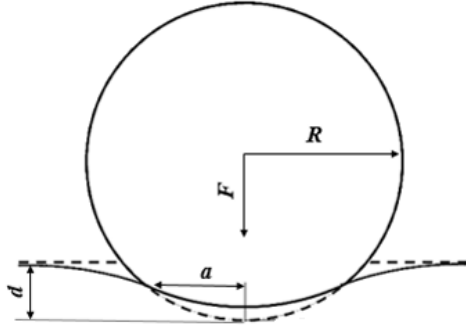
Şekil 3.12. Aşınma testi numuneleri

Kompozit numuneler testlerden önce ve sonra asetonla temizlenmiş, ağırlıkları 10^{-4} gram hassasiyetinde tartılmıştır. Özgül aşınma miktarı, W_s , Denklem 3.9 ile hesaplanmıştır.

$$W_s = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F_N \cdot L} \text{ mm}^3 / \text{Nm} \quad (3.9)$$

Burada; Δm aşınan numunenin ağırlık kaybını (g), F_N uygulanan yükü (N), L kayma mesafesini (m) ve ρ numune yoğunluğunu (g/mm^3) ifade etmektedir.

Temas yüzeyi basıncı ve sıcaklığı, aşınma mekanizmasının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, aşınma prosesinin karmaşık yapısı nedeniyle, aşınma için genel bir gerilme modeli oluşturmak zordur. Hertz temas teorisi, temas basıncı ve aşınma yüzeyindeki maksimum gerilmeyi hesaplamak için kullanılabilir. Aşındırıcı bilye bir kuvvet altında kompozit malzemeye temas ettiğinde, aralarındaki nokta veya çizgi teması alan temasına geçmekte ve gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmeler ve yüzey basıncı, Hertz temas teorisine göre düzlem yüzey üzerinde küresel temasla (Şekil 3.13) hesaplanmaktadır.



Şekil 3.13. Küre ve düz levha arasındaki temas (Kawa ve Litewka, 2015)

Aşınmayı etkileyen önemli parametrelerden olan temas basıncının sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı üzerine etkilerini belirlemek için kuru ortamdaki numuneler 10 N ve 15 N yükler altında aşınma testine tabi tutulmuştur. Farklı yükler altında aşındırıcı bilye ve kompozit numunelerin temas noktasında meydana gelen hertz yüzey basınçları aşağıdaki denklemler yardımıyla belirlenmiştir (Rahmat ve ark., 2011).

$$a = \sqrt{Rd} \quad (3.10)$$

Burada, R aşındırıcı bilye yarıçapını, d derinliği ve a temas alanını temsil etmektedir. Uygulanan F yükü, d iz derinliğiyle ilişkili olarak Denklem 3.11’de verilmiştir.

$$F = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2} \quad (3.11)$$

Denklemdaki E^* efektif elastisite modülüdür.

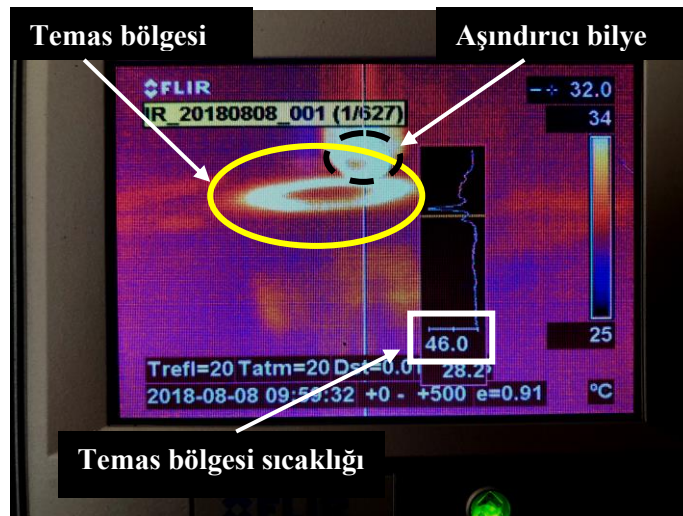
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3.12)$$

Burada E_1 , E_2 ve ν_1 , ν_2 sırasıyla aşındırıcı bilye ve kompozit malzemelerin elastisite modülü ve poisson oranı değerleridir. Finalde temas yüzeyinde oluşan maksimum yüzey basıncı p_{max} ; Denklem 3.13 ile hesaplanmıştır.

$$p_{max} = \frac{3F}{2\pi a^2} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{6FE^{*2}}{R^2} \right)^{1/3} \quad (3.13)$$

3.4.2. Temas bölgesi sıcaklıklarının ölçümü

Kompozitlerin farklı yükler altındaki ve farklı ortamlardaki sürtünme ve aşınma performanslarını daha iyi açıklayabilmek için testler sırasında termal kamera yardımıyla temas bölgesi sıcaklıkları kayıt altına alınmıştır (Şekil 3.14). Kaydedilen veriler temas bölgesi sıcaklığı-zaman grafiklerine dönüştürülerek yorumlanmıştır.



Şekil 3.14. Termal kamera kayıt ekranı

3.5. Tuzlu Suda Yaşlandırma Testi

Tuzlu su ortamının kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkilerini daha kısa sürelerde tespit edebilmek için literatürdeki şartlarda göz önünde bulundurularak yüksek derişimde tuzlu su çözeltisi (ağırlıkça % 6 NaCl) hazırlanmıştır. Kompozit numuneler daha sonra dört test grubuna bölünerek değişen zamanlar için Çizelge 3.4'te belirtilen sürelerde inert kaplarda tuzlu su ortamında daldırma yöntemiyle yaşlandırılmıştır (Şekil 3.15).

Çizelge 3.4. Test grupları ve bekleme süreleri

Test Grupları	Ortam Koşulları	Bekleme Süreleri (t)
I	Normal ortam	-
II	Tuzlu su ortamı	2 ay (60 gün)
III	Tuzlu su ortamı	4 ay (120 gün)
IV	Tuzlu su ortamı	6 ay (180 gün)



Şekil 3.15. Tuzlu su ortamında bekletilen kompozit test numuneleri

Test numuneleri önce 24 saat boyunca 50 °C'de fırında kurutulmuş sonra oda sıcaklığına soğutulmuştur. Kurutma işlemi, numunelerin ağırlığı sabit olana kadar tekrar edilmiştir. Kurutma işleminin ardından test numunelerinin başlangıç ağırlıkları, hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Bekleme sürelerinin bitiminde, tuzlu su ortamından alınan numunelerin nihai ağırlıkları tekrar ölçülmüştür. Yaşlandırılmayan malzemelere göre ağırlık artış yüzdesi, Denklem 3.14 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta_m = \frac{m_t - m_i}{m_i} \quad (3.14)$$

Burada m_i , numunenin yaşlandırma öncesinde başlangıçtaki kütlesi ve m_t , t yaşlandırma zamanındaki kütlesidir.

3.6. Analizler

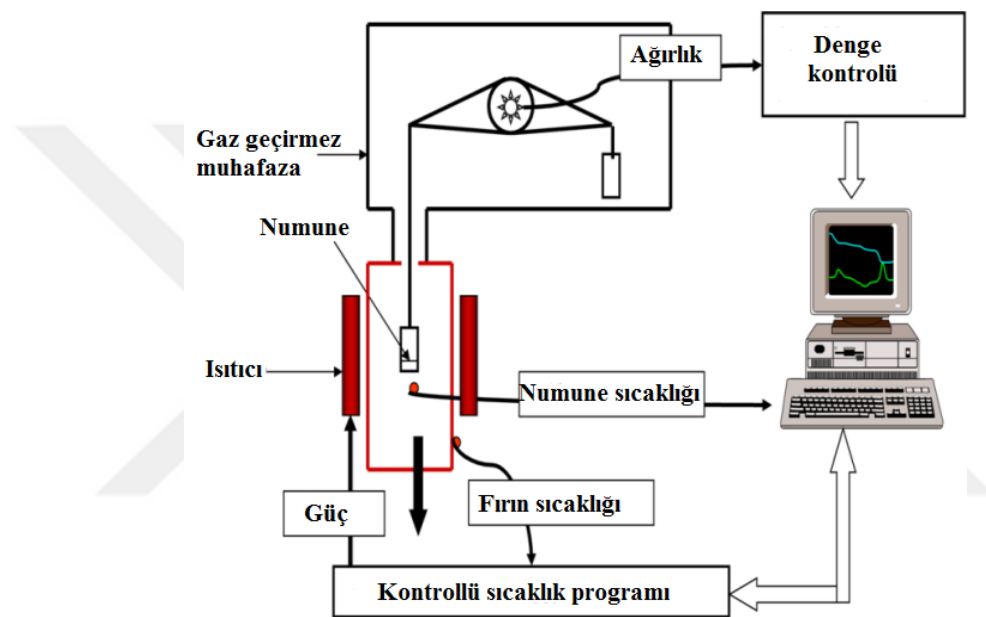
3.6.1. Termogravimetrik analiz

Termal gravimetrik analiz veya termogravimetrik analiz (TGA), malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin, sıcaklık artışının veya zamanın bir fonksiyonu olarak kontrollü bir atmosferde ölçüldüğü termal bir analiz yöntemidir. Numunenin dehidrasyonu veya bozunması sırasındaki ağırlık değişimleri, azot, helyum, hava gibi gaz atmosferinde veya vakum altında, sıcaklığın veya zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmektedir. Ağırlık değişimleri piroliz, kuruma, kimyasal reaksiyonlar, organik bileşikler, termal bozunma, dehidrasyon veya uçucu bileşenlerin buharlaşması gibi nedenlerle meydana gelmektedir. Analizlerde sıcaklık aralığı genellikle 25 °C ile 900 °C arasında değişmekte ve 1200 °C'ye kadar çıkılabilmektedir. Numune ağırlığı 1 mg ila 150 mg arasında değişebilmektedir. TGA ölçümleri sonunda kütlenin sıcaklığa ya da zamana karşı değişimi grafiği elde edilmekte, bu grafiklere termogram veya TGA eğrisi adı verilmektedir. TGA ölçümlerinde analiz edilecek numune iki kollu hassas terazinin bir koluna konular, kontrollü atmosferde sabit bir hızda ısıtmak suretiyle sıcaklık değiştirilerek terazide meydana gelen değişiklikler denge kontrolü yardımıyla bilgisayara aktarılır (Şekil 3.16).

TGA inorganik malzemeler, metaller, polimerler, plastikler, seramikler, camlar, kompozit malzemeler ve diğer birçok malzeme üzerinde uygulanabilmektedir. Kompozit malzemelerde; polimer reçine yakılarak fiber ve inorganik dolgu maddelerinin ağırlığının ölçülmesinde kullanılmaktadır. TGA ile malzemelerin termal kararlılığı, istenen atmosfer altında yüksek sıcaklıklarda karşılaştırılabilmektedir. TGA eğrisi ayrışma mekanizmalarını açıklamaya yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada bazalt fiber takviyeli kompozitlerde katkı maddesi olarak kullanılan GNP'lerin yüksek termal kararlılığa sahip olduğu bilinmektedir. Aşınma testlerinde sürtünmeyle birlikte sıcaklık da artış göstermektedir. Sıcaklık, aşınmayı etkileyen önemli test parametrelerinden

biridir. Bu nedenle tribolojik özelliklerin yorumlanmasında kompozitlerin termal kararlılıkları önem arz etmektedir.

Numunelerin termal analizleri azot gazı altında 20 °C/dak.'lık bir ısıtma hızında 840 °C'ye ısıtılarak Perkin Elmer Instruments cihazında gerçekleştirilmiştir. TGA eğrileri çizilmiş ve eğrilerden elde edilen bazı önemli parametre değerleri tablo olarak verilmiştir. Termogravimetrik analiz ile katısız ve GNP katılı kompozitlerin termal kararlılıkları karşılaştırılmış, GNP katkısının termal özellikler üzerindeki etkileri de tartışılmıştır.



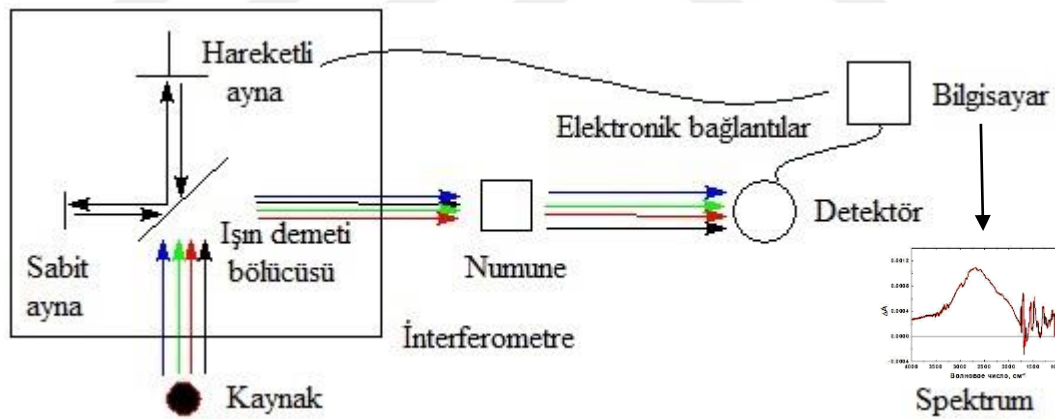
Şekil 3.16. Termogravimetrik analizinin şematik gösterimi (Raju, 2013)

3.6.2. Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi analizi

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR spektroskopisi) moleküllerdeki çeşitli bağların titreşim frekanslarını ölçerek, moleküldeki fonksiyonel gruplar hakkında bilgi vermektedir. Katı, sıvı veya gaz bir numuneden kızılötesi (IR) radyasyon geçirildiğinde, radyasyonun bir kısmı numune tarafından emilirken, bir kısmı iletilmektedir. Analiz edilen numunelerin IR ışınlarını absorplaması veya absorplamamasına göre elde edilen IR spektrumları, malzemenin moleküler yapısı ile ilgili bilgiler vermektedir. IR ışınlarına maruz kalan molekül veya atomların titreşme ve dönme düzeyleri uyarılmaktadır. Moleküller içerdikleri atomların cinsi ve bağ

yapılarının farklı olması nedeniyle farklı titreşimsel hareketler sergilemektedir. Her bir molekül kendi moleküler özelliğini temsil eden bir IR spektrumuna sahiptir.

IR spektrumları ile bileşiklerin yapılarında bulunan bağların durumu, bağlanma yerleri, yapının aromatik veya alifatik olup olmadığı hakkında yorumlar yapılabilmektedir. Şekil 3.17’de, FT-IR spektrumunun ölçüm şeması gösterilmiştir. FT-IR spektrometresinin ışın kaynaklarından gönderilen ışınının, interferometre (ışın bölücü) yardımıyla bir kısmı sabit aynaya, diğer kısmı da hareketli aynaya gönderilmektedir. Sabit hızda sürekli olarak ileri geri hareket eden ayna yansıyan ışınların girişim yapmasını sağlamaktadır. Girişim yapan IR ışınları numune üzerine gönderilmektedir. Numune üzerine gönderilen ışın numunedeki bileşenler tarafından absorbe edilmektedir. Numuneden geçen ışının (dalga boyunun bir fonksiyonu olarak iletilir veya yansır) yoğunluğu detektör vasıtasıyla ölçülerek interferogram elde edilmektedir. Elde edilen interferogram Fourier dönüşümleri kullanılarak yatay ekseninde dalga sayısı, dikey ekseninde de transmittans bulunan spektrum elde edilmektedir. FT-IR spektrumları genellikle dalga boyuna karşı yoğunluk grafikleri olarak verilmektedir.



Şekil 3.17. FT-IR spektrumunun ölçüm şeması (Anonim, 2013)

Katkısız ve ağırlıkça en yüksek oranda GNP içeren katkılı kompozitlerin hem tuzlu suda yaşlandırılmadan önce hem de 6 ay tuzlu suda yaşlandırıldıktan sonra FT-IR analizleri yapılmıştır. FT-IR analizlerinde Perkin Elmer 1725 FT-IR spektrofotometresi kullanılmıştır. Tuzlu su maruziyetiyle matris (saf ve GNP ile modifiye edilmiş epoksi) ve fiberlerde meydana tahribatın yorumlanmasında FT-IR analizlerinden de faydalanılmıştır.

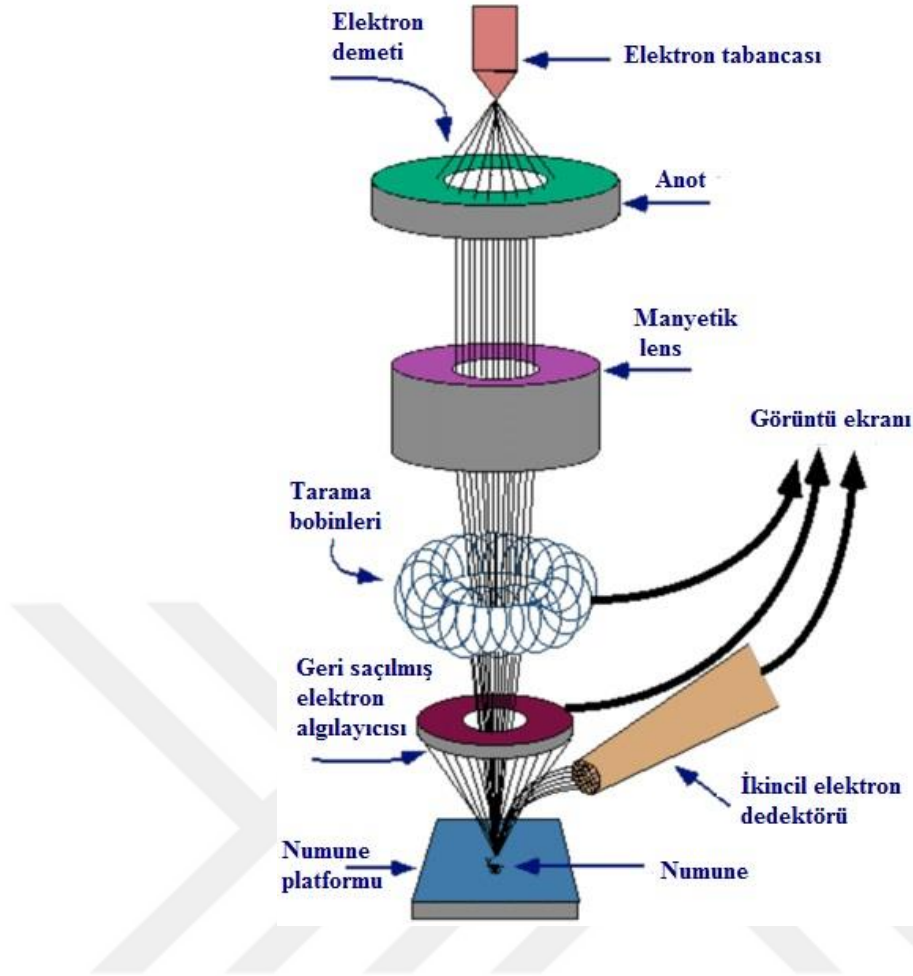
3.6.3. X-ışını difraktometresi analizi

X-ışını kırınım yöntemi (XRD), malzemelerin kristal yapı özelliklerine göre tanımlanmasında kullanılan analitik bir analiz tekniğidir. Kristal yapının incelenmesi yoluyla, malzemede mevcut olan kristalli fazların morfolojisini tanımlamak ve böylece kristalli bileşiklerin kimyasal bileşimi hakkında daha ayrıntılı bilgi edinmek mümkündür. Fazlar elde edilen verilerin referans veri tabanı ile karşılaştırılmasıyla tanımlanmaktadır. XRD analizi ile malzemelerin kristal yapısı gibi kristallografik özelliklerinin yanında, tane boyutu ve tercihli yönelme gibi özellikleri de belirlenebilmektedir.

Aşınma testine tabi tutulan kompozit test numunelerinin, testler sonrası oluşan aşınma kalıntıları XRD tekniği ile analiz edilmiştir. Aşınma kalıntıları analizi ile hem kompozitlerin kimyasal bileşimleri doğrulanmış, hem de katkılı ve katkısız kompozitlerde meydana gelen aşınma mekanizmalarının benzerlikleri ve farklılıklarının yorumlanmasına katkıda bulunulmuştur.

3.6.4. Taramalı elektron mikroskobu görüntü analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), elektron ışınıyla taranan numune üzerinden yüksek vakum altında, yüksek büyütme oranları (5x ila 300.000x arasında) ve yüksek çözünürlükte görüntü elde etmek için kullanılmaktadır. Katı numunelerin yüzeyinde çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlardan oluşan odaklanmış bir ışın ile yüzeyin taranmasıyla çeşitli sinyallerin üretilmesi prensibiyle çalışmaktadır. Elektron tabancasından gönderilen elektron demetleri, yüksek gerilimli anot plakasıyla hızlandırılmakta ve mercekler ile numune yüzeyinde odaklanarak yüzeyi taramaktadır. Elektronlar ile numune arasındaki girişimler neticesinde oluşan çeşitli elektron ve ışımlar uygun algılayıcılarla toplanarak, sinyal çoğaltıcıdan geçirildikten sonra dijital sinyallere dönüştürülüp görüntü ekranına verilmektedir (Şekil 3.18). Bu teknik ile sıvı olamayan her türlü malzeme analiz edilebilmektedir. SEM analizi, yüzeyin dış morfolojisi (doku), kimyasal bileşimi, kristal yapısı ve numuneyi oluşturan malzemelerin oryantasyonu, gibi birçok bilgi vermektedir.



Şekil 3.18. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz şeması (Walock, 2012)

Kompozitlerin üretiminde kullanılan grafen ve bazalt fiberlerin yüksek çözünürlüklü görüntüleri SEM ile (ZEISS Evo LS 10) alınmıştır. Epoksi matris ile bazalt fiberler arasındaki bağlanmaya GNP ilavesinin etkileri yine SEM analizleriyle incelenmiştir. Çekme ve aşınma testine tabi tutulan Epoksi/BF kompozitlerin testler sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiş, hasar mekanizmaları yorumlanmıştır. Tuzlu su ortamında bekletilen kompozitlerde meydana gelen bozunma, tuzlu suyun matris ve fiberler üzerindeki tahrip edici etkileri görüntülerle analiz edilmiştir.

3.6.5. Enerji yayımlı x-ışını analizi

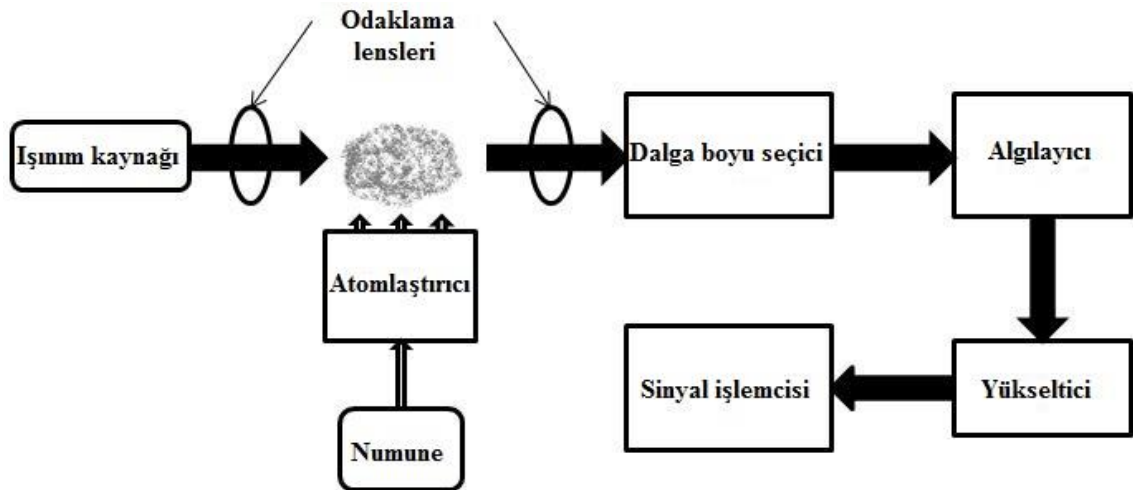
Enerji yayımlı x-ışını (EDX) mikro analizi, numunelerde bulunan elementlerin varlığını ortaya çıkararak numunelerin temel bileşimini tanımlamak için kullanılan bir x-ışını tekniğidir. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) numune üzerine gönderilen elektron demetinin bombardımanı sırasında numuneyi oluşturan elementlerden yayılan

karakteristik X-ışınları, elektron mikroskobuna bağlı detektörler (EDS; enerji saçınım spektrometresi veya WDS; dalga boyu saçınım spektrometresi) ile algılanıp analiz edilmektedir. Bu teknikle, SEM görüntü analizleriyle incelenen numune üzerindeki bir noktada veya belirli bir alanda elementel mikro analiz yapmak da mümkündür. Analizler sonucunda, analiz edilen numunede bulunan tüm farklı elementlere karşılık gelen piklere sahip spektrumlar elde edilmektedir. EDX ile nitel (element tipi) ve nicel (numunenin her elementinin konsantrasyonunun yüzdesi) analizin yanında numune üzerinde istenen bir alandaki elementlerin dağılım haritaları da çıkarılabilmektedir.

Tuzlu suda yaşlandırılan katkısız ve GNP katkılı Epoksi/BF kompozitlerin yüzeyleri SEM ile incelenerek, yüzeyde bulunan elementler ve % konsantrasyonları, kompozitlerin yüzeylerine çökebilecek elementler veya bileşik oluşumları EDX analizleriyle belirlenmiştir.

3.6.6. Atomik absorpsiyon spektroskopisi analizi

Atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS), sıvı çözelti içerisindeki eser miktardaki (ppm ve ppb düzeyde) kimyasal elementlerin kantitatif olarak belirlenmesinde kullanılmaktadır. Blok diyagramı Şekil 3.19'da verilen AAS analizinde, UV ve görünür bölgedeki ışınlar serbest atomlar tarafından soğurularak, soğurulan miktar ölçülmektedir. Bu teknikle yetmiş yakın farklı metal analiz edilebilmektedir.



Şekil 3.19. Atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS) blok diyagramı (Anonim, 2019)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde GNP-Epoksi, Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin mekanik ve tribolojik karakterizasyonu değerlendirilmiştir. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin çekme ve aşınma testlerinin sonuçları çizelgeler ve grafikler şeklinde verilmiştir. Tuzlu suda yaşlandırmanın mekanik ve tribolojik özellikler üzerindeki etkileri tartışılmış, mekanik ve tribolojik özelliklerde meydana gelen değişiklikler ve test sonrası oluşan hasar mekanizmaları SEM, EDX, XRD, FTIR ve AAS analizlerinin sonuçlarıyla yorumlanmıştır. Aşınma testleri sırasında, uygulanan yüke bağlı olarak değişen temas yüzey basınçları aşınma izleriyle birlikte değerlendirilmiştir.

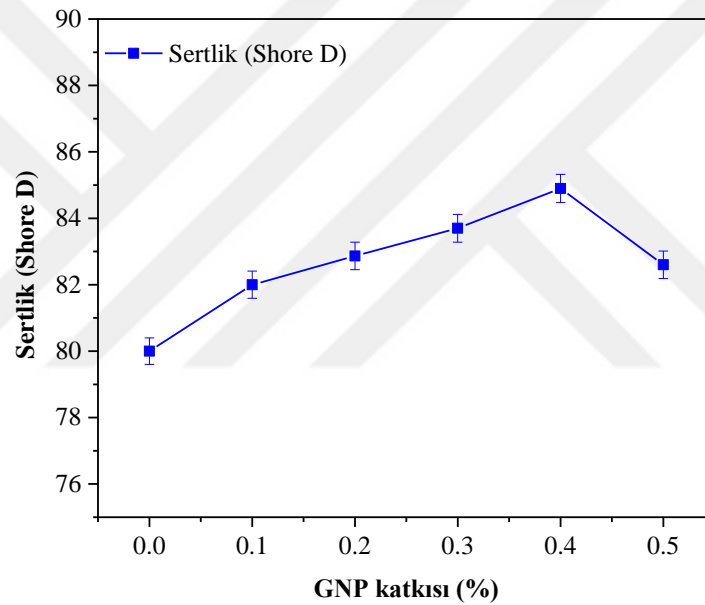
4.1. GNP-Epoksi Nanokompozitlerin Karakterizasyonu

Yapılan literatür taramasında grafen katkı nano kompozitlerle ilgili çalışmalarda, grafen katkı oranlarındaki değişiklikler göze çarpmaktadır. Bu oranlar genellikle, ağırlıkça %0.08 ile %4 arasında değişmektedir. Oranların belirlenmesinde herhangi bir kural olmayıp, özellikle epoksi ile yapılan çalışmalarda, katkı oranları arttıkça grafenin epoksi içerisinde homojen dağıtılması zorlaştığından genellikle 0.05-1 arasındaki oranlar tercih edilmektedir (Papageorgiou ve ark., 2017). Malzemenin mekanik özellikleri ile tribolojik özellikleri arasında her zaman doğrudan bir orantı olmadığı için, mekanik özellikleri iyileştiren katkı oranları malzemenin tribolojik özelliklerini kötüleştirebilmekte veya aynı oranda iyileşme sağlayamamaktadır. Bu tez çalışmasının asıl amacı korozyon ortamına maruz kalan bazalt fiber takviyeli epoksi nanokompozitlerin aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi olduğu için, ilk olarak farklı katkı oranlarında grafenin, saf epoksiye kıyasla aşınma özelliklerini nasıl değiştirdiğiyle ilgili bir ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışmayla bazalt fiber takviyeli kompozitler üretilirken epoksi reçineye yapılacak grafen katkı oranları da belirlenmiştir.

Yüzey sertliği malzemelerin aşınma ve aşınma direnci ile ilgili çok önemli bir faktör olduğu için araştırılmıştır. GNP'lerin epoksi matris özellikleri üzerindeki etkinliğini değerlendirmek için hazırlanan test numunelerinin sertlikleri Shore D sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür. Sertlik, bir malzemenin basma yükleri uygulanırken şekil değişimine ne kadar dirençli olduğunu ölçer. GNP-Epoksi nano kompozitlerde yüksek bir sertlik elde etmek için, iyi bir grafen dispersiyonu ön şarttır. Sertlikteki artış grafenin

epoksi matrisinde iyi dağılmasına bağlanır. Homojen olarak dağıtılmış grafen, çapraz bağlama noktaları arasındaki mesafeyi kısaltabilir, böylece matrisin çapraz bağlama yoğunluğunu arttırabilir ve mekanik özellikleri geliştirmek için olumlu bir rol oynar (Wei ve Inam, 2017).

GNP katkının epoksi matrisin sertliği üzerindeki etkisi Şekil 4.1’de verilmiştir. Ağırlıkça %0.1’den 0.5’e kadar değişen katkı oranlarında epoksi matrisin sertlik değerleri % 2.5-6.25 arasında artış göstermiştir. GNP ilavesindeki artışla birlikte kompozitlerin sertliğinin artması, grafenin (i) üstün mekanik özelliklerine; içsel mukavemet (~ 1.0 TPa), elastisite modülü (125 GPa) ve (ii) sahip olduğu yüksek yüzey-hacim oranına atfedilmektedir (Abdullah ve Ansari, 2014; Moosa ve ark., 2016).



Şekil 4.1. GNP-Epoksi nanokompozitlerin sertlik değerlerinin artan GNP katkısıyla değişimi

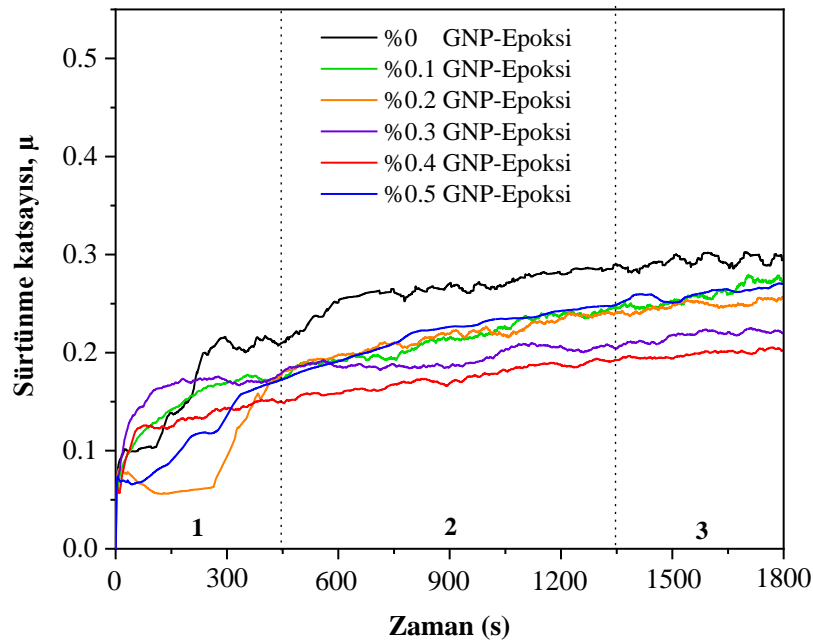
Nano katkı maddelerinin eklenmesi, epoksi matris ve katkı maddeleri arasındaki yapışma kuvvetini etkili bir şekilde arttırabilir. Katkı maddelerinin homojen dispersiyonu, polimer kaplamanın sertliğini arttırır. Sertlikteki gelişme esas olarak, polimer matrisinde homojen ve kademeli grafen dağılımı ile üç boyutlu bir ağın oluşmasından kaynaklanmaktadır (Zhang ve ark., 2018).

Grafenin, altıgen olmayan halkalar oluşturarak atom düzenini yeniden oluşturma yeteneği, nano ölçekli ara tabaka etkileşimlerinin makroskopik mekanik özelliklere aktarılmasında kritik öneme sahiptir. Çapraz bağlanma sırasında GNP’ler kenarlarda köprülenir, matristen grafene katmanlar arası yük transferi gerçekleşir ve epoksinin

sertlik değeri artar (Moosa ve ark., 2016). Daha yüksek katkı oranlarında sertlik değerlerindeki düşüşün nedeni, meydana gelen aglomerasyonların üretim sırasında ortaya çıkan boşlukların artmasına neden olmasıdır (Abdullah ve Ansari, 2014).

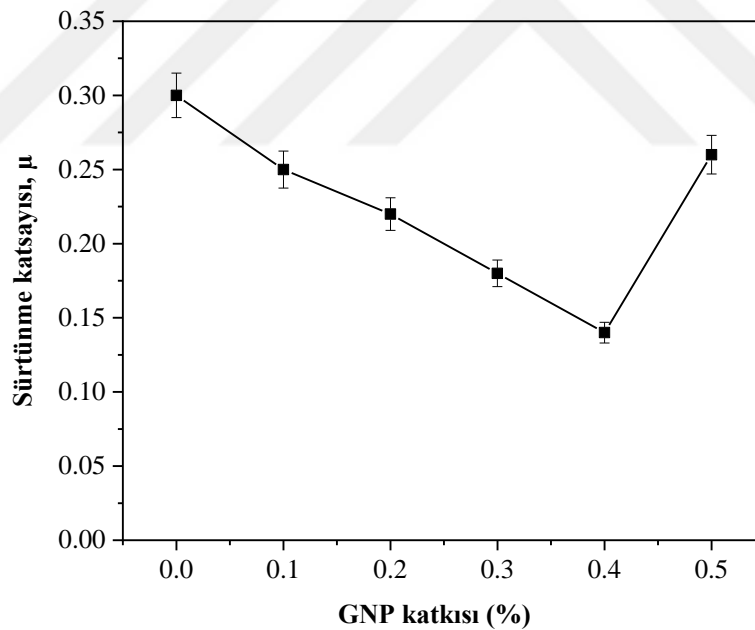
Sertlik ölçümlerinden sonra GNP-Epoksi nanokompozit numuneler literatürdeki çalışmalar da göz önünde bulundurularak 10 N yük altında, 0.75 m/s kayma hızında oda sıcaklığında kuru kayma aşınmasına maruz bırakılmıştır. Test süresi boyunca aşındırıcı bilye kompozit numuneler üzerinde 2000 m yol almıştır.

Şekil 4.2’de saf ve GNP katkılı epoksi kompozitler için sürtünme katsayısının zamana bağlı olarak değişimi verilmiştir. GNP katkılı kompozitlerin tribolojik davranışı, bu partiküllerin sürtünme katsayısını stabilize etmede ve aşınma miktarını azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmalarda, artan grafen katkısının sürtünme katsayısını stabilize edebilmesinin nedeni, grafenin dökme malzemenin ısı iletkenliğini artırarak yüzey sıcaklığını düşürebilmesi ve epoksinin yumuşamasını ve bozunmasını önleyebilmesi olarak açıklanmaktadır. Bu nedenle sürtünme katsayısı, grafen katkısı arttıkça sabit bir değere yaklaşmaktadır (Daloia, 2014). Bu davranış grafen tarafından sağlanan yağlayıcılık, geliştirilmiş ısı iletkenlik ve atomik bağlanma temel alınarak açıklanabilir. Grafen içeriği arttıkça, epoksi termal iletkenliği artmakta bu da arayüz sıcaklığını düşürmektedir.



Şekil 4.2. GNP-Epoksi nanokompozitlerin sürtünme katsayılarının zamana bağlı olarak değişimi (L=2000 m, F_N=10N, V=0.75 m/s)

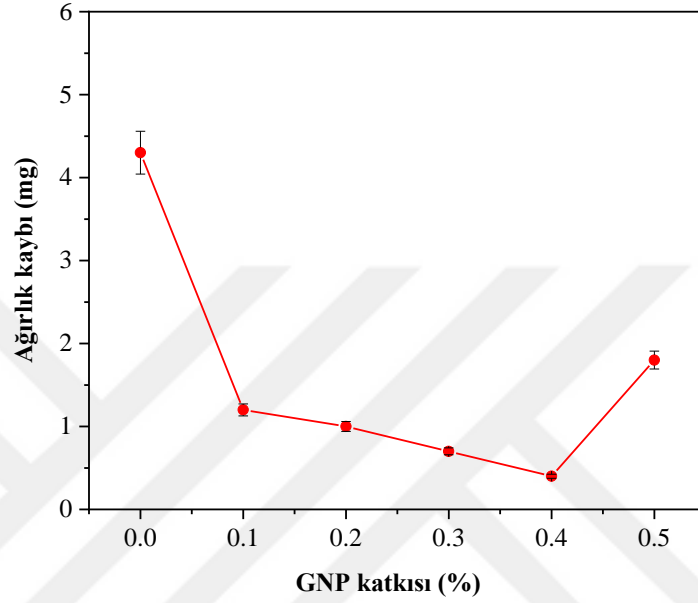
Sürtünme katsayısı eğrileri incelendiğinde saf epoksinin, aşınma hızının yüksek ve sürtünme katsayısının dengesiz olduğu görülmektedir. Öte yandan, grafen en yüksek kararlı sürtünme katsayısı davranışını %0.3 ve %0.4 katkı oranlarında sergilemektedir. %0.4 GNP katkısında, sürtünme katsayısı değeri belirli bir süre artış ve dalgalanma gösterdikten sonra 2000 m kayma mesafesi sonunda yaklaşık 0,17'de sabit kalmıştır. GNP katkısı sürtünme katsayısı değerlerinde % 13 ile % 43 arasında değişen düşüşler sağlamıştır (Şekil 4.3). Literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda sürtünmenin bu değişikliği ara yüzey sıcaklığına atfedilebilir. Saf epoksi numune başlangıçta oda sıcaklığındadır, polimer kuvveti yüksektir ve buna bağlı olarak yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Kayma devam ettiğinde, ara yüzey sıcaklığı artmakta, polimer yumuşamakta ve sürtünme düşmektedir (Daloia, 2014). Sürtünmede aradaki artışın, epoksinin daha da yumuşamasından dolayı oluşan sürme gövdeleri arasındaki temasın artmasına bağlı olabileceği düşünülmektedir. Grafen içeriği arttıkça, sürtünme dalgalanmaları azalmıştır.



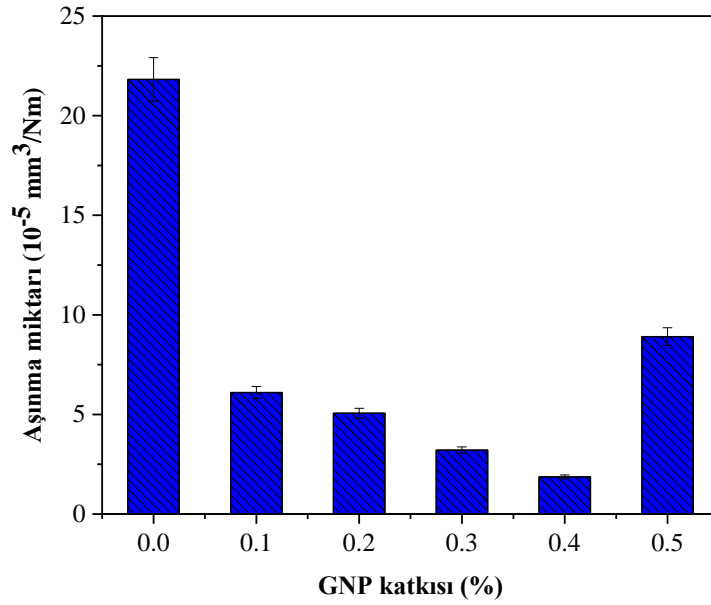
Şekil 4.3. GNP-Epoxy nanokompozitlerin L=2000 m kayma mesafesi sonunda sürtünme katsayıları

Şekil 4.4.a'daki grafikte ağırlık kaybının artan GNP katkısıyla değişimi verilmiştir. En fazla ağırlık kaybı ve aşınma saf epoksi numunede gerçekleşirken, bu oranı %0.5 grafen katkılı epoksi kompozit takip etmektedir. %0.4 grafen katkısına kadar ağırlık kaybı gittikçe azalmakta ve en düşük değere bu oranda ulaşmaktadır. Katkı oranı %0.5'e çıkarıldığında ağırlık kaybı %0.4 katkı oranına kıyasla yaklaşık dört kat artış

göstermiştir. Ağırlık kaybı artışına paralel olarak aşınma da artış göstermekte ancak yine de ağırlık kaybı miktarı saf epoksinin ağırlık kaybının altında kalmaktadır. Bu sonuçlardan yola çıkarak GNP katkısının saf epoksinin aşınma davranışını geliştirdiği ve aşınmayı azaltıcı yönde bir etki yaptığı açıkça söylenebilmektedir.



a)



b)

Şekil 4.4. a) Ağırlık kaybı ve b) aşınma miktarı değerlerinin artan GNP katkısıyla değişimi

GNP içeriği ile sürtünme katsayısındaki değişime paralel olarak özgül aşınma miktarı, epoksi matrisine ağırlıkça sadece %0,1'lik bir katkı yapılmasıyla dahi önemli ölçüde azalmıştır (Şekil 4.4.b). Saf epoksinin aşınma miktarı $21.82 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ iken %0.1'lik GNP katkısıyla bu oran $6.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye düşürülerek yaklaşık % 70'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Daha sonra, GNP içeriği arttıkça özgül aşınma miktarı %0.5 katkısına kadar monoton şekilde azalmaya devam etmiştir. Spesifik aşınma miktarı, GNP içeriği 10 N yük altında ağırlıkça %0.1'den %0.4'e yükseltildiğinde, saf epoksiye kıyasla neredeyse 12 kat azalmıştır. Aşınma miktarında en fazla düşüş %0.4 GNP katkılı kompozitlerde görülmektedir. Diğer katkı oranlarında da aşınma saf epoksiye kıyasla giderek azalmıştır. Bu iyileşme GNP'lerin yüksek spesifik yüzey alanına ($2630 \text{ m}^2/\text{g}$), buruşuk yüzey yapısı sayesinde GNP-Epoksi arasında güçlü yapışma ve kenetlenme sağlanmasına, OH, karboksil/epoksi gruplarına, GNP'lerin iki boyutlu düzlemsel geometrisine ve gelişmiş camsı geçiş sıcaklığına bağlanmaktadır (Shen ve ark., 2013).

Gelişmiş özelliklere sahip olan, polimer matrisindeki gömülü grafen ekstrüde edildiğinde kayma yüzeylerinde stabil katı transfer filmleri oluşturur. Bu film polimere kendi kendine yağlama özelliği kazandırarak, sürtünme ve aşınmanın azaltılmasında etkili bir rol oynar. Grafen, epoksi reçineyle birleştirildiğinde ve organik-inorganik hibrit yapı oluşturulduğunda, epoksi reçineye ısı akışını önler ve kompozit matrisin termal bozunmasını azaltır, bu nedenle aşınma direnci, yüksek sıcaklık aşamalarında önemli ölçüde arttırılır. Buna ek olarak grafen yük taşıma kapasitesini ve polimerin yorulma mukavemetini de arttırabilmektedir. (Zhang ve ark., 2018).

Epoksi içerisine yapılan GNP katkısı %0.5'e çıkarıldığında aşınma miktarı $8.91 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye düşmüş saf epoksiye kıyasla % 59'luk bir azalma meydana gelmiş, ancak diğer katkı oranlarına kıyasla artış gözlenmiştir. Bu artışın grafenin epoksi içerisinde homojen olarak dağıtılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aglomera olan nano katkı, polimer matrisinin mikro gözeneklerini dolduramaz, aynı zamanda kusurların oluşumuna yol açarak nano kompozitin performansında bir düşüşe neden olur (Wang ve ark., 2018).

GNP katkısının ve farklı GNP katkı oranlarının tribolojik performans üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde yüksek katkı oranlarında GNP'lerin reçine içerisinde homojen olarak dağıtılmasının güçleştiği, homojen olarak dağıtılamayan GNP'lerin aglomerasyonlara neden olduğu görülmüştür. Aglomerasyonlar kompozitin beklenen

üstün özelliklerini kısıtlamaktadır. Epoksi içerisinde homojen olarak dağıtılan ağırlıkça %0.3 ve %0.4 GNP katkıları tribolojik özellikleri önemli ölçüde geliştirmiştir. Literatürdeki çalışmalarda optimum özelliklere genellikle %0.3-%0.5 katkı oranlarında ulaşıldığı görülmüştür. GNP-Epoksi kompozitlerde kullanılan katkı yüzdeleri fibere taşındığında sonuçların değişiklik gösterebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle bazalt fiber takviyeli nanokompozitler üretilirken epoksi içerisine yapılacak GNP katkı oranları ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5 ve 0.7 olarak belirlenmiştir.

4.2. GNP-Epoksi/BF Nanokompozitlerin Termal ve Mekanik Karakterizasyonu

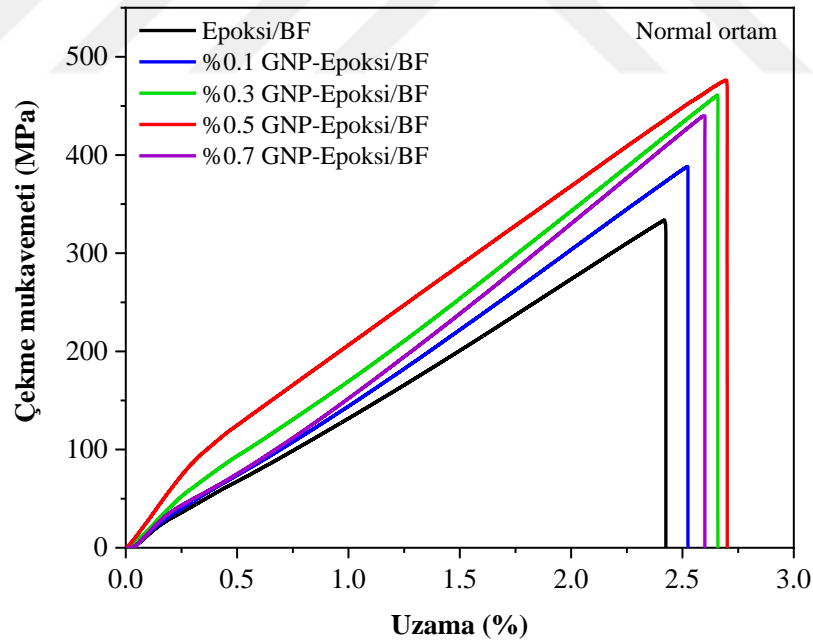
Ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5 ve 0.7 GNP katkılı bazalt fiber takviyeli epoksi nanokompozitlerin normal ortam ve tuzlu su yaşlandırması sonrası çekme testi sonuçları, SEM görüntüleriyle incelenen hasar mekanizmaları ve TGA analizleri dört başlık altında verilmiştir.

4.2.1. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin çekme testleri

Epoksi içerisine yapılan ağırlıkça farklı oranlarda GNP katkısının bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için çekme testlerinden elde edilen mukavemet, % uzama (kopma uzaması) ve elastisite modülü değerleri birbiriyle kıyaslanmıştır. Şekil 4.5'te Epoksi/BF kompozit ve farklı katkı oranlarında GNP içeren GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin mukavemet-%uzama eğrileri verilmiştir. GNP nano takviyesi bütün katkı oranlarında kompozitlerin çekme mukavemeti ve uzama değerlerinde artışa neden olurken, en yüksek mukavemet ve % uzama, %0.5 katkı oranında elde edilmiştir. %0.5 GNP katkısı Epoksi/BF kompozitlerde çekme mukavemeti ve % uzama değerlerini sırasıyla 334 MPa ve 2.43'ten, 476 MPa ve 2.70'e yükseltmiştir. Bu katkı oranında çekme mukavemeti yaklaşık % 43, % uzama değeri ise % 11 artarak maksimum seviyeye ulaşmıştır. %0.5 GNP katkısı ile Epoksi/BF kompozitlerin elastisite modülü % 74.5'luk bir artışla 15.86 GPa'dan 27.67 GPa'a ulaşmıştır. Şekil 4.5'te verilen grafiklerde %0.5 GNP-Epoksi/BF nanokompozitin çekme eğrisinin elastik bölgedeki eğiminin artışı diğer katkı oranlarına göre oldukça belirgindir. Kompozitlerin üretimi sırasında, sertleşmenin akabinde malzeme üzerinde kalıcı gerilmeler oluşur Bu kalıcı gerilmeler çekme testlerinde matris çatlamalarıyla minimize edilir. Bu durum lineer karakteristikteki

çekme eğrilerinde eğimin (% 0.1-% 0.3 kopma uzaması aralığında) bir miktar azalarak devam etmesine neden olmaktadır. Epoksi/BF kompozitlerin sertlik ve elastisite modülü değerlerinde meydana gelen artış, ikincil sert bir fazın (GNP) saf epoksiye dahil edilmesiyle açıklanabilir. Grafenin yapısındaki güçlü karbon bağları ve Sp² hibridizasyonu adı verilen bağ şekli grafeni elmas kadar dayanıklı hale getirmektedir. Bunun yanında grafen elmastan daha sert ancak hafif ve bir o kadar esnektir. Düşük oranlarda GNP katkısı çekme dayanımı, elastisite modülü, kırılma tokluğu, kırılma enerjisi ve yorulma çatlak büyümesine karşı direnç gibi çeşitli mekanik özelliklerin artırılması açısından CNT'lerden önemli ölçüde daha iyi performans göstermektedir (Rafiee ve ark., 2009a).

GNP katkısı ile Epoksi/BF kompozitlerin mekanik özelliklerinde meydana gelen iyileşme; grafen nano partiküllerin yüksek elastisite modülü ve mukavemetine, grafen ve polimer matris arasındaki etkileşimin iyi olmasına (Rafiee ve ark., 2009a), grafen nano partiküllerin yüzeyindeki fonksiyonel grupların fazla olmasına bağlı olarak epoksi matris içerisinde homojen olarak dağılmasına atfedilebilir (Papageorgiou ve ark., 2017).



Şekil 4.5. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozit malzemelerin normal ortam çekme eğrileri

Ayrıca, grafenin mevcut yüzey yapısı, epoksi ve grafen arasındaki mekanik kenetlenme ve yapışmayı artırmakta, epoksi ile grafen arasındaki iyi kimyasal bağlanma arayüz etkileşimini geliştirerek, gerilmenin ara yüzeyde etkin bir şekilde

aktarılabilesini sağlamaktadır. Çekme yönü boyunca hizalanan GNP'ler, takviye ve matris arasındaki verimli yük aktarımından dolayı gerilme mukavemeti üzerinde pozitif etkiye sahiptir. Yük aktarımı, GNP'lerin matris içerisinde iyi dağıtılarak güçlü bir ara yüzey yapışması sağlanmasına bağlıdır. Grafen ve matris arasındaki bağlanmanın, grafenin bazı organik polimerler ile kimyasal fonksiyonelleştirilmesiyle daha da geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozit malzemelerin mukavemet, % uzama ve elastisite modülü değerleri Çizelge 4.1'de sayısal olarak verilmiştir. GNP katkısı Epoksi/BF kompozitlerin % uzama değerlerinde % 4 ile % 11 arasında artış sağlamıştır. Bu artış Epoksi/BF kompozitlerin, GNP katkılı kompozitlere kıyasla daha kırılğan olduğu, çatlak başlangıcına ve yayılmasına karşı dirençlerinin daha zayıf olduğu şeklinde yorumlanabilir. Grafenin özellikle metal matrisli kompozitlerin sünekliği üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir (Rashad ve ark., 2013; Rashad ve ark., 2015).

Çizelge 4.1. GNP katkısının Epoksi/BF kompozitin mekanik özellikleri üzerine etkisi

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Artış (%)	% Uzama (mm/mm)	Artış (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Artış (%)
Epoksi/BF	333.83		2.43		15.86	
%0.1 GNP-Epoksi/BF	387.91	16.2	2.53	4.1	17.43	9.9
%0.3 GNP-Epoksi/BF	460.92	38.1	2.66	9.4	22.40	41.2
%0.5 GNP-Epoksi/BF	476.27	42.6	2.70	11.1	27.67	74.5
%0.7 GNP-Epoksi/BF	439.84	31.7	2.60	6.9	18.71	18.0

Bütün katkı oranlarında mekanik özellikler bakımından Epoksi/BF kompozite kıyasla iyileşme sağlandığı, ancak GNP katkısı %0,7'ye çıkarıldığında mukavemet, % uzama ve elastisite modülü değerlerinde %0.5 katkısına kıyasla sırasıyla yaklaşık % 8, % 4 ve % 32'lik bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Homojen olarak dağılmış GNP, büyüyen çatlakları köprüleyerek, çatlak ilerlemesini engellemekte ve böylece nanokompozitlerin özelliklerini iyileştirmektedir (Wei ve ark., 2017). Ancak katkı oranı arttıkça, nanopartiküllerin matris içerisinde homojen olarak dağıtılması zorlaşmaktadır. Kritik bir yükleme oranından sonra matris içerisinde iyi bir şekilde dağıtılamayan nanopartiküllerin bir arada topaklaşarak oluşturduğu agrega bölgeleri yapı içerisinde bir kusur gibi görünerek mekanik özelliklerde azalmaya neden

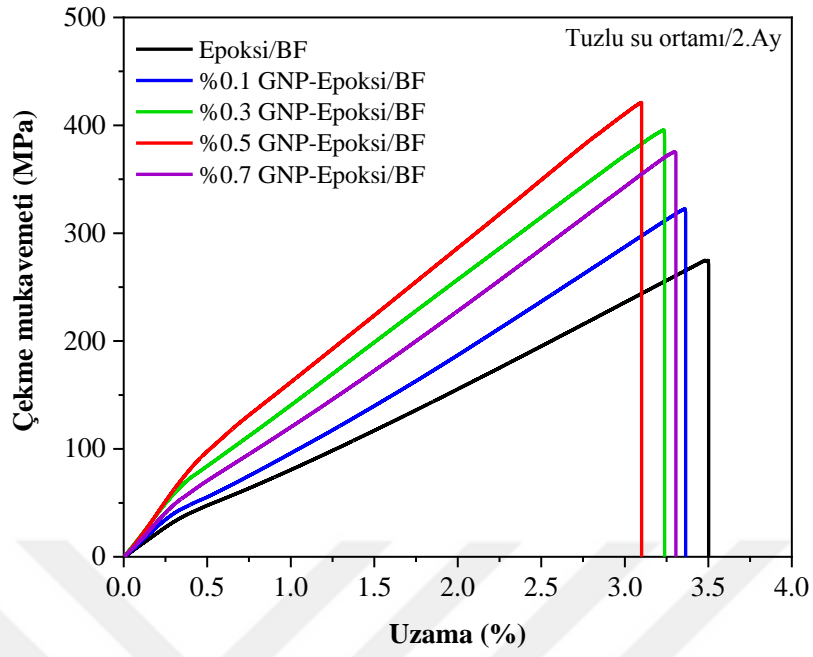
olmaktadır (Du ve ark., 2017). GNP hibrit nanokompozitlerin üretiminde en önemli parametrelerden biri GNP dispersiyonunun kalitesidir. GNP'ler arasında var olan yapısal Van der Waals etkileşimleri onları bir araya getirmeye zorlar ve kompozit parçaya harici bir kuvvet uygulandığında yerel stresin gelişmesine katkıda bulunur. Bu mekanizma GNP katkılı nano kompozitlerin mukavemetini arttırmada oldukça etkilidir.

Benzer çalışmalarda fiber takviyeli kompozitlere yapılan GNP katkısının, fiberlerin delaminasyonunu ve eğilmesini önlediği, fiber yüzeyinin yakınında başlayan çatlakların etrafındaki gerilmelerin yeniden dağılımını destekleyerek interfaz bölgesindeki çatlak ilerlemesini geciktirdiği bildirilmiştir (Qin ve ark., 2015).

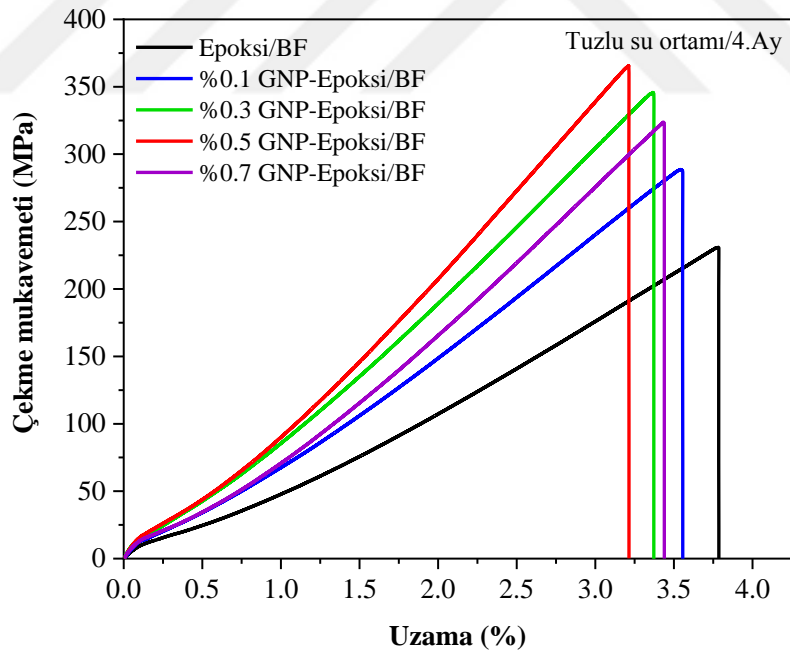
4.2.2. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin çekme testleri

Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozit numuneler %6 konsantrasyonunda NaCl çözeltisinde toplam 6 ay süreyle yaşlandırılmış, her iki aylık periyotlar sonunda çekme testleri tekrar edilmiştir. Şekil 4.6'da 2.ay, 4.ay ve 6.ay sonundaki çekme testi eğrileri verilmiştir. Tuzlu suda yaşlandırma süresince kompozitlerin mukavemet değerlerinde belirgin düşüşler yaşanmış (Çizelge 4.2), çekme mukavemetinin ve % uzamanın yaşlandırma sonundaki değişimleri Şekil 4.7'de sütun grafikleri ile ifade edilmiştir. 2.ayın sonunda Epoksi/BF kompozitin çekme mukavemeti değeri 334 MPa'dan 275 MPa'a düşerek yaklaşık % 18 azalmış, % uzama değeri ise 2.43'ten 3.5'a yükselerek % 44'lük bir artış göstermiştir. Mekanik özellikler bakımından en iyi performansa sahip olan %0.5 GNP katkılı Epoksi/BF nanokompozitlerin mukavemet değeri yaklaşık % 12'lik bir azalmayla 476 MPa'dan 421 MPa'a düşerken, % uzama değeri % 15'lik bir artışla 2.7'den 3.1'e yükselmiştir. Tuzlu suda yaşlandırılan kompozitlerin çekme mukavemetleri 2. ayın sonunda % 12 ile % 18 arasında değişiklik gösteren oranlarda azalırken, % uzama değerleri % 15 ile % 44 arasında değişen oranlarda artış göstermiştir.

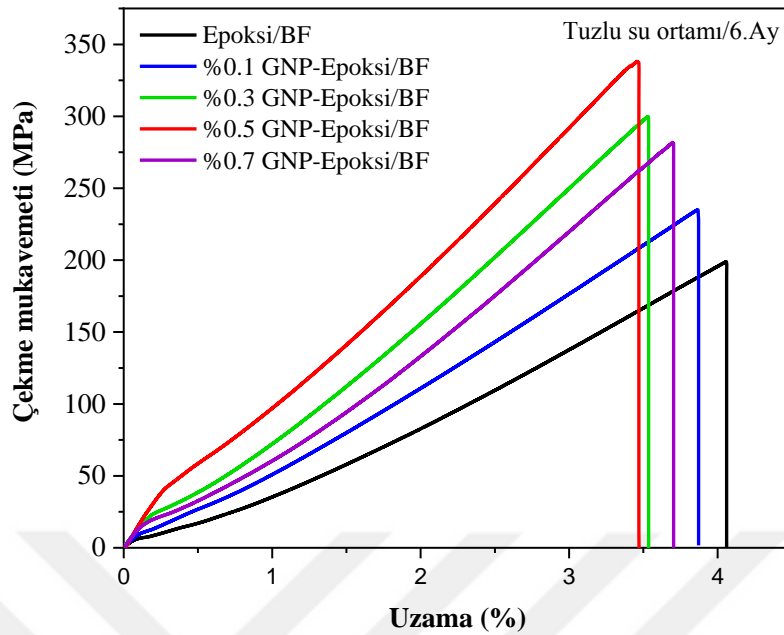
Epoksi/BF kompozitlerin çekme mukavemetleri 2., 4. ve 6. ayların sonunda % 17.6, % 30.8 ve % 40.4 azalmış, % uzama değerleri % 44, % 55.5 ve % 67 artmış, elastisite modülleri ise % 26.1, % 31.1 ve % 42.7 oranlarında düşüş göstermiştir. Tuzlu suda yaşlandırılan GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin bütün katkı oranlarında Epoksi/BF kompozitlerde olduğu gibi dayanımlarında ve elastisite modüllerinde azalma, % uzama değerlerinde ise artma eğilimi söz konusudur.



a)



b)



c)

Şekil 4.6. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozit malzemelerin tuzlu suda yaşlandırma sonrasında a) 2.ay, b) 4.ay ve c) 6.ay çekme testi eğrileri

Tüm inorganik polimerik malzemeler nemi bir dereceye kadar emer, bu da şişme ve çözünmeyle sonuçlanarak mekanik özelliklerin kaybına neden olabilir (Pandian ve ark., 2014). Emilen suyun homojen olmayan dağılımı lokalize kusurlar yaratarak mukavemeti düşürürken artık gerilmelerin gevşemesi mukavemette artışa neden olur. Su emilimiyle gelişen plastikleşme elastisite modülünü düşürür, birim şekil değiştirmede artış sağlar. Modüldeki artış ve birim şekil değiştirmedeki düşüş su emilimiyle meydana gelen şişmeye atfedilmektedir. Bu etkilerin kombinasyonu özelliklerde artışa-azalmaya neden olabilir veya özelliklerin oda sıcaklığında korunmasına imkân sağlar (Mourad ve ark., 2010).

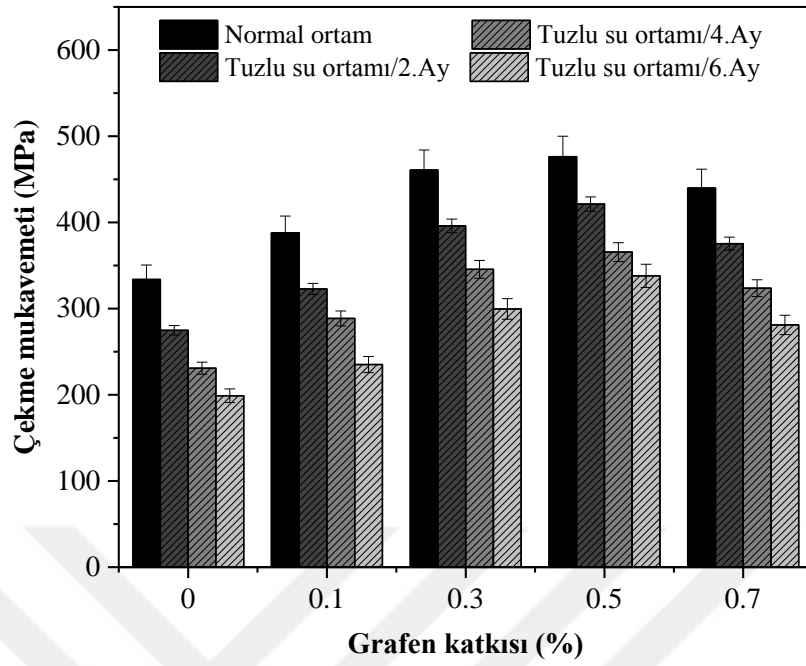
Mekanik özelliklerde optimum seviyede gelişmeler sağlayan %0.5 GNP katkılı Epoksi/BF kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri 6.ay sonunda % 29'luk azalmayla en düşük seviyededir. Çizelge 4.2'deki sonuçlar incelendiğinde GNP katkısının mekanik özellikleri iyileştirmenin yanı sıra, tuzlu suda yaşlandırma sırasında özelliklerin korunmasına katkı sağladığı görülmektedir. GNP katkı oranı arttıkça, kompozitlerin mukavemet değerlerindeki düşüş azalmıştır. Katkı oranı %0.7'ye ulaştığında ise, muhtemel aglomerasyonların neden olduğu boşlukların, su emilimini

arttırarak fiber-matris arasındaki bağlanmayı zayıflattığı, GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin mukavemet değerlerinde tekrar düşüşe neden olduğu düşünülmektedir.

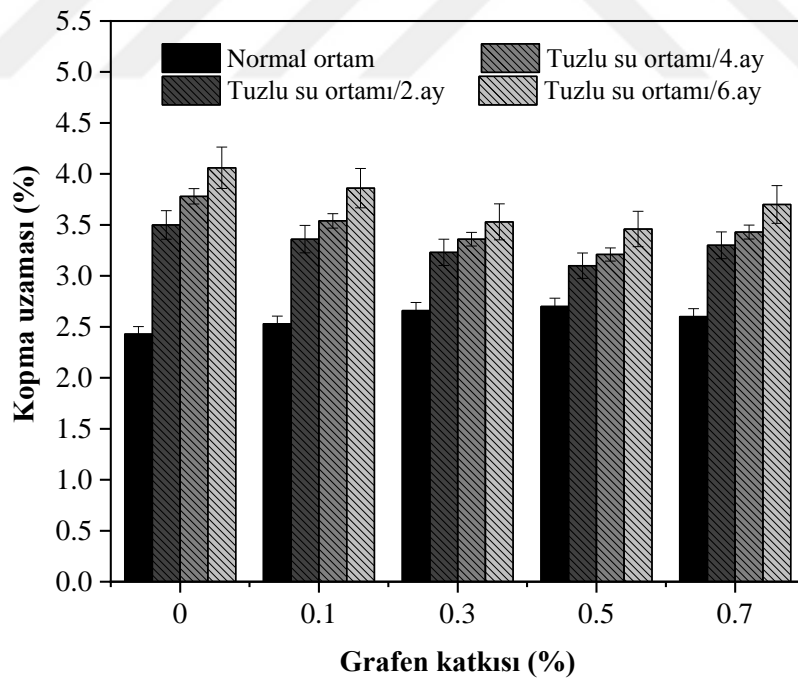
Çizelge 4.2. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozit malzemelerin artan yaşlandırma süreleri sonunda mekanik özelliklerinin değişimi

	Yaşlandırma Süresi (Ay)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Azalış (%)	% Uzama (mm/mm)	Artış (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Azalış (%)
Epoksi/BF	0	333.83		2.43		15.86	
	2	274.86	17.6	3.50	44.0	11.72	26.1
	4	230.86	30.8	3.78	55.5	10.92	31.1
	6	198.88	40.4	4.06	67.0	9.08	42.7
%0.1 GNP-Epoksi/BF	0	387.91		2.53		17.43	
	2	322.75	16.8	3.36	32.8	14.54	16.6
	4	288.57	25.6	3.54	39.9	14.00	19.7
	6	235.08	39.4	3.86	52.5	11.44	34.4
%0.3 GNP-Epoksi/BF	0	460.92		2.66		22.40	
	2	395.88	14.1	3.23	21.4	21.44	4.3
	4	345.52	25.0	3.36	26.3	20.05	10.5
	6	299.59	35.0	3.53	32.7	16.29	27.3
%0.5 GNP-Epoksi/BF	0	476.27		2.70		27.67	
	2	421.23	11.5	3.10	14.8	22.70	17.9
	4	365.54	23.2	3.21	18.8	21.28	23.1
	6	337.99	29.0	3.46	28.1	17.35	37.3
%0.7 GNP-Epoksi/BF	0	439.84		2.60		18.71	
	2	375.38	14.6	3.30	26.9	17.50	6.5
	4	323.74	26.4	3.43	31.9	16.34	12.7
	6	281.04	36.0	3.70	42.3	14.16	24.3

BFRP kompozitlere yapılan GNP katkı oranındaki değişime ve yaşlandırma sürelerine bağlı olarak, tuzlu suda yaşlandırılan kompozit numunelerde 2.ay, 4.ay ve 6.ay sonunda çekme mukavemeti değerlerindeki azalış ve % uzama değerlerindeki artış Şekil 4.7’de sütun grafikleri olarak verilmiştir. Tuzlu suda yaşlandırma süresi arttıkça bütün katkı oranlarında çekme mukavemeti değerlerinin düştüğü, % uzama değerlerinin ise plastikleşmenin etkisiyle artış gösterdiği belirgin olarak görülmektedir.



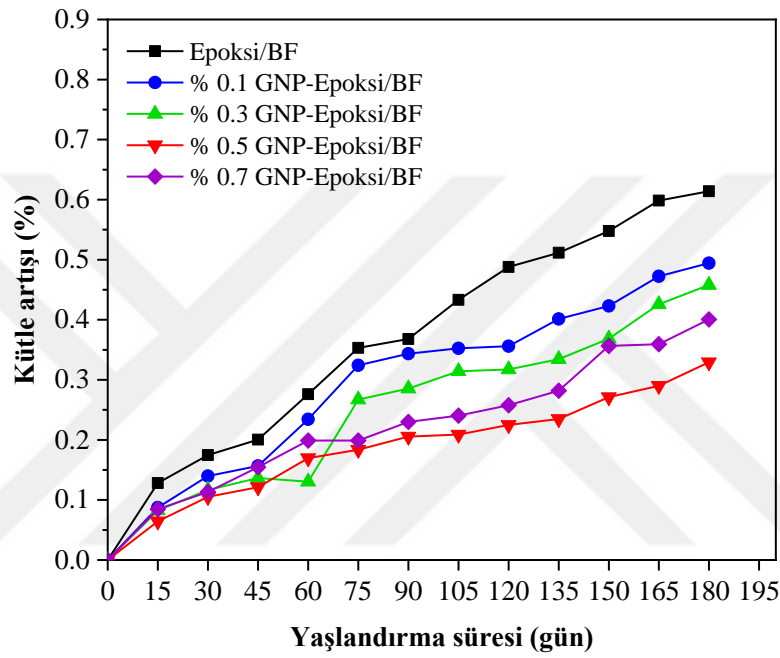
a)



b)

Şekil 4.7. Tuzlu su yaşlandırmasının Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozit malzemelerin a) çekme mukavemeti ve b) % uzamasına etkisi

Tuzlu suda yaşlandırılan kompozit ve nanokompozitlerin, yaşlandırma öncesinde ve yaşlandırma süreleri sonunda ağırlıkları 0.001 gr hassasiyetinde hassas terazi ile ölçülmüştür. Yaşlandırılan BFRP kompozitler tartılmadan önce bir bez yardımıyla kurulanmıştır. Kompozitlerin ağırlığında meydana gelen değişim (% kütle artışı) yaşlandırma süresine bağlı olarak, Şekil 4.8’de verilmiştir. Çekme mukavemeti değerlerindeki düşüşün temel nedeni tuzlu suyun kompozit içerisine difüzyonudur.



Şekil 4.8. BFRP kompozitlerin tuzlu su absorpsiyonu

Bu çalışmada kompozitlere yapılan nano takviyeden beklenen iki performans vardır. Bunlardan ilki kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek, diğeri ise tuzlu suda yaşlandırma sırasında, su emilimi oranını ve/veya maksimum su içeriğini azaltmaktır (Prolongo ve ark., 2018). Artan GNP katkısıyla tuzlu suda yaşlandırma sonrası çekme mukavemeti değerlerindeki düşüşlerde belirgin bir azalma söz konusudur. Bu azalma normal ortam şartlarında kompozitlerin dayanımını arttıran GNP katkısının, tuzlu suda yaşlandırma sırasında su emilimini azaltarak kompozitlerde meydana gelebilecek hasarı minimize etmesiyle açıklanabilir. GNP’ler hidrofobik özellikleriyle bilinmektedir. Epoksi/BF kompozitlere yapılan GNP katkısının kompozitlerin su absorpsiyonunu azalttığı Şekil 4.8’de görülmektedir. Katkı oranı arttıkça tuzlu suda yaşlandırılan nanokompozitlerin % kütle artışları düşmüştür. 6. ayın

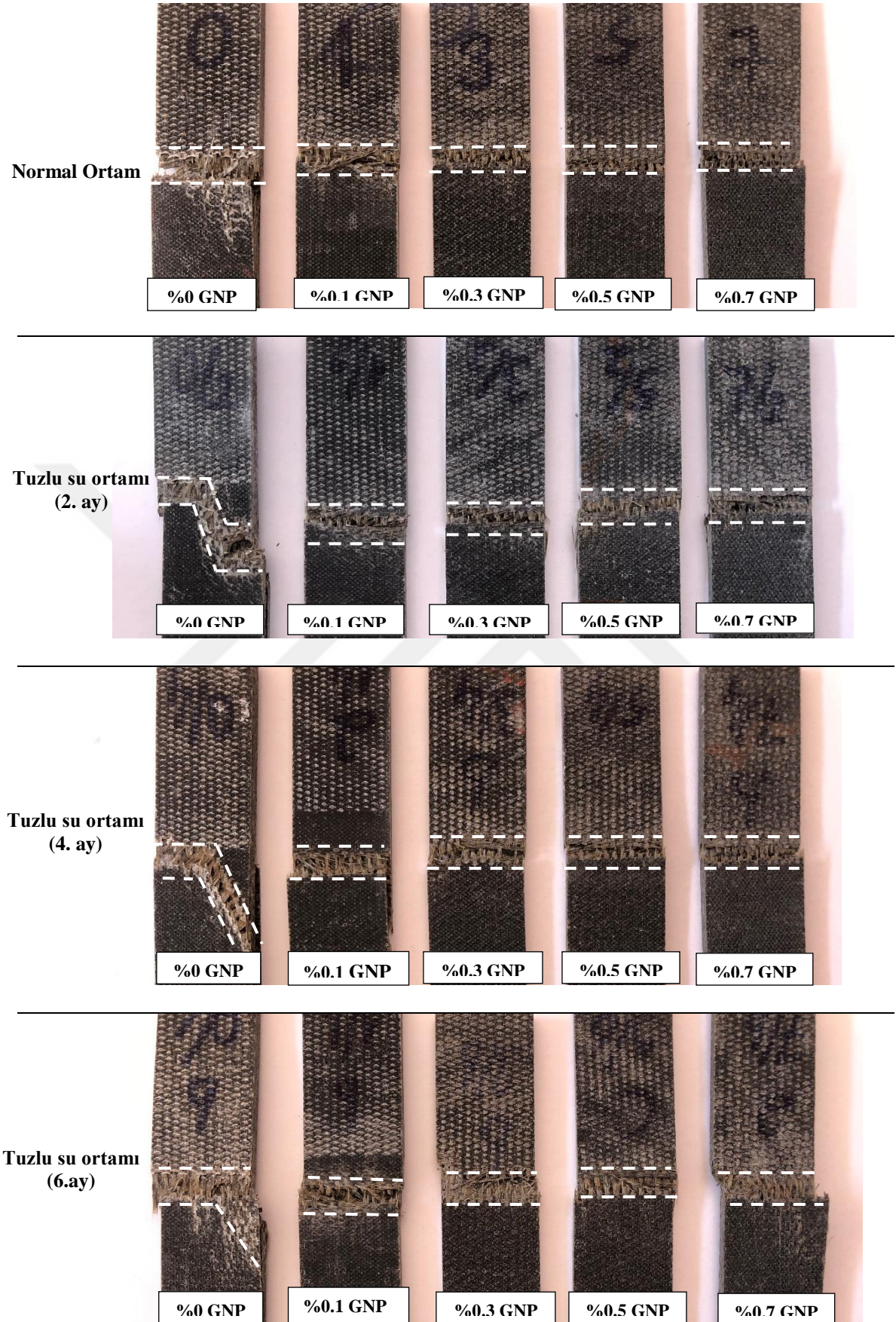
sonunda Epoksi/BF kompozitlerin kütlesinde % .6'lık bir artış meydana gelirken %0.5 GNP katkısı kompozitlerin su emilimini 6. ayın sonunda % 50 azaltmıştır. BFRP kompozitlere tuzlu suyun difüzyonu Fickian olmayan davranış sergilemiştir. Fickian olmayan difüzyon, hidroliz veya artan yaşlandırma süreleriyle kompozit levhada meydana gelen hasar mekanizmalarıyla ilişkilendirilebilir.

Kompozitler uzun süre deniz suyuna maruz bırakıldığında yapılarında bozulmalar meydana gelmektedir. Bunun nedeni, fiberlere hidroksil veya hidrojen iyonu penetrasyonudur ve bu iyonlar, başlangıçta mevcut olan sodyum iyonlarının yerini almaktadır. İyonların değiştirilmesinden kaynaklanan uyumsuz deformasyonlar, fiber yüzeylerinde çatlaklara neden olabilmektedir. Ara yüzey bölgesinde, kimyasal reaksiyonlara veya suyun ara yüzeylere nüfuzuyla plastikleşmeye bağlı olarak hasar meydana gelebilmektedir. Bunun haricinde, deniz suyunda bulunan çeşitli tuzlar (örneğin, NaCl, MgCl₂), epoksi reçinesinde bulunan karbon ve hidrojen arasındaki bağı kırma eğilimi göstermekte ve karbona bağlanmaya çalışmaktadır. Bu durum, yer değiştiren atomun boyut değişikliği nedeniyle matriste gerilime neden olmaktadır. Nem emilimi de matriste şişmeye yol açmaktadır. Nem emilimi kompozit levhalarda önemli kalıntı gerilmeleri meydana getirerek mekanik özelliklerin azalmasına sebebiyet vermektedir (Wei ve ark., 2011).

Suyun ve klorür iyonlarının arayüz boyunca BFRP tabakalarına difüzyonu, epoksi reçine matrisinin hidrolizini hızlandırır. Bazalt fiber ile epoksi reçine matris arasındaki ara yüzeyde çatlaklar, boşluklar ve bozulmalar meydana gelir. Tuzun çökmesi çatlak oluşumunu hızlandırır. Boşluklar ve mikro çatlaklar makro çatlaklarla birleşerek fiber-matris arayüzeyinde ayrılmalara neden olur (Lu ve ark., 2017).

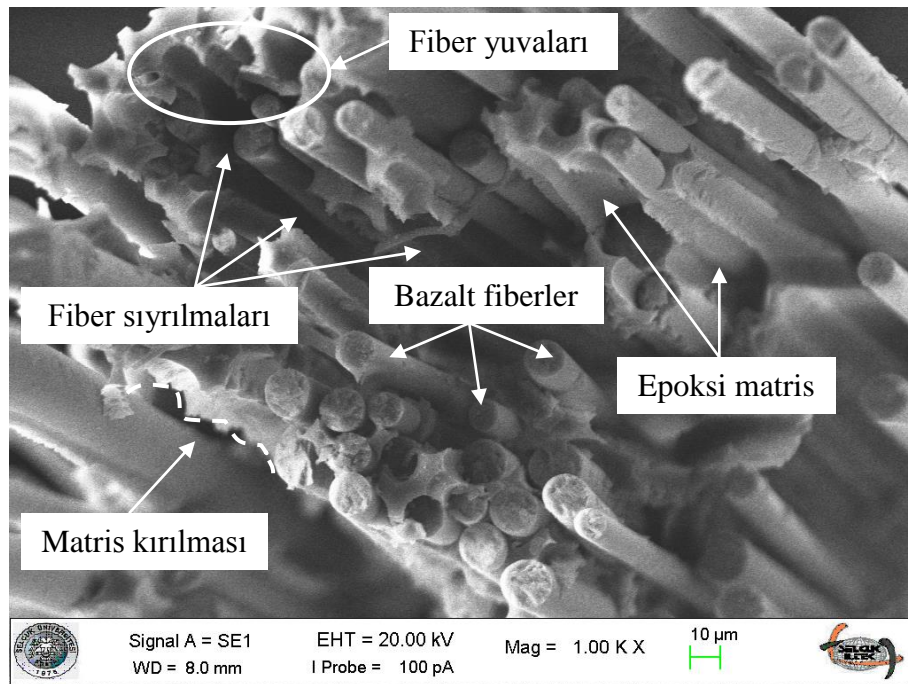
4.2.3. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin hasar analizleri

Tuzlu suda yaşlandırılan Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerde çekme testinde meydana gelen hasar modları Şekil 4.9'da verilmiştir. Normal ortam numunelerinde delaminasyon bölgelerinin daha küçük olduğu, tuzlu suda yaşlandırma süresine bağlı olarak Epoksi/BF kompozitlerde hasar modlarının belirgin olarak değiştiği görülmektedir. Normal ortam ve yaşlandırma sonrası çekme testlerinde GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerde delaminasyonların etkisiyle yatay doğrultuda düz bir kırılma yüzeyi gözlenirken, Epoksi/BF kompozitlerde yaşlandırma sonrası kırılma açılı olarak devam etmektedir.

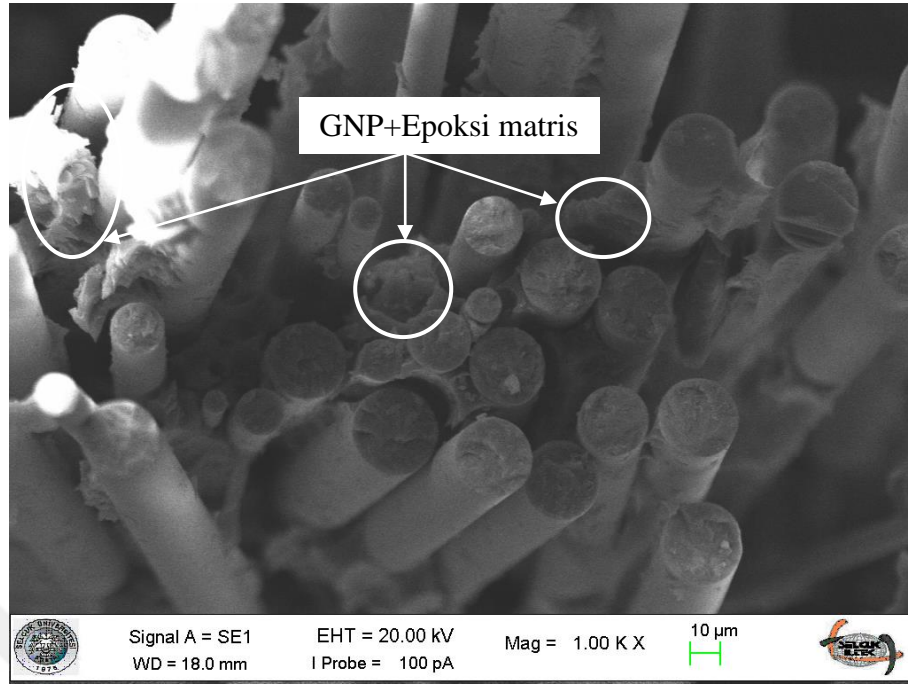


Şekil 4.9. Tuzlu suda yaşlandırılan BFRP kompozitlerin çekme testi sonrası hasar görüntüleri

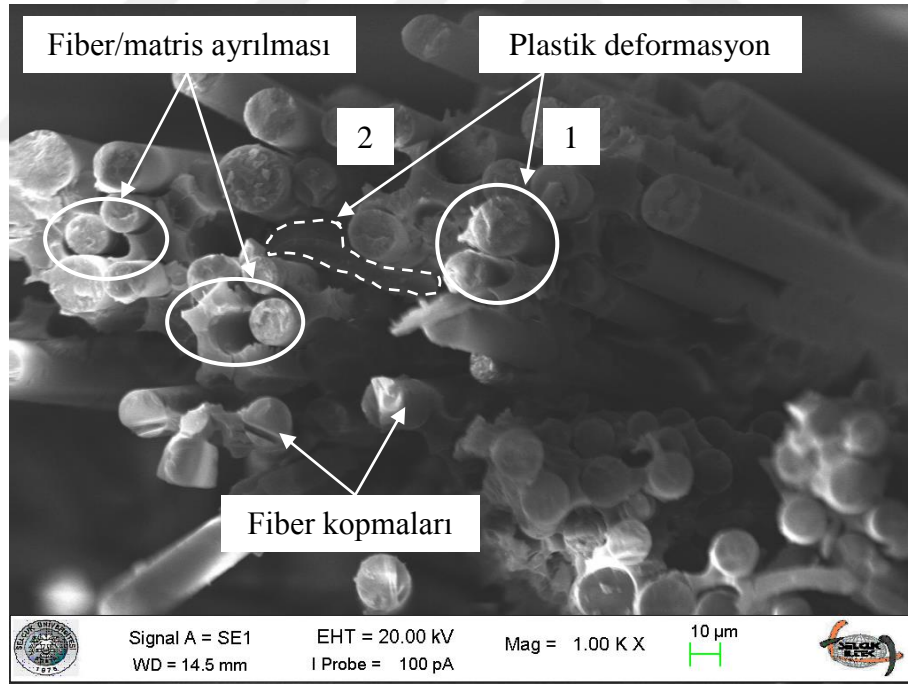
Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri fiber ve matris arasındaki ara yüzey bağlanma mukavemetine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Mekanik testlerin yanı sıra SEM görüntüleri yardımıyla fiber ve matris arasındaki bağlanmanın niteliği hakkında yorum yapılabilmektedir. Şekil 4.10'da, BFRP kompozit çekme numunelerinin SEM fotoğrafları verilmiştir. Bazalt fiber gelişmiş mekanik özelliklere sahip olan karbon fiberlerle kıyaslandığında daha sünek davranış göstermekte, bu özelliğinden yola çıkarak özellikle inşaat sektöründe geleneksel betonların sünekliği ve enerji yutma kapasitesini arttırmada kullanılmaktadır. Ancak diğer fiber takviyeler gibi epoksi ile birleşince gevrek davranış sergilemektedir. Katkısız ve GNP katkılı BFRP kompozit numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde fiberlerin düzgün bir şekilde kırıldığı ve kırılmanın baskın olarak gevrek modda gerçekleştiği görülmektedir. GNP katkısız kompozitlerde, boş fiber yuvalarından yola çıkarak fiberlerin matristen sıyrıldığı açıkça görülmekte ve katkılı kompozitlerde bu boşlukların oldukça az olduğu dikkati çekmektedir. GNP katkısının fiber ile matris arasındaki bağlanmayı iyileştirerek fiberlerin sıyrılmasını güçleştirdiği söylenebilmektedir. Şekil 4.10.c'de fiberlerdeki ve matristeki plastik deformasyon bölgeleri sırasıyla 1 ve 2 olarak numaralandırılmıştır. 2 numara ile gösterilen plastik deformasyon bölgesinde, polimerde sünek plastik şekil değiştirme meydana gelmiştir. Bu durum literatürdeki, GNP katkısının kompozitlerin sünekliğine katkıda bulunduğu yönündeki ifadeleri doğrulamaktadır



a)



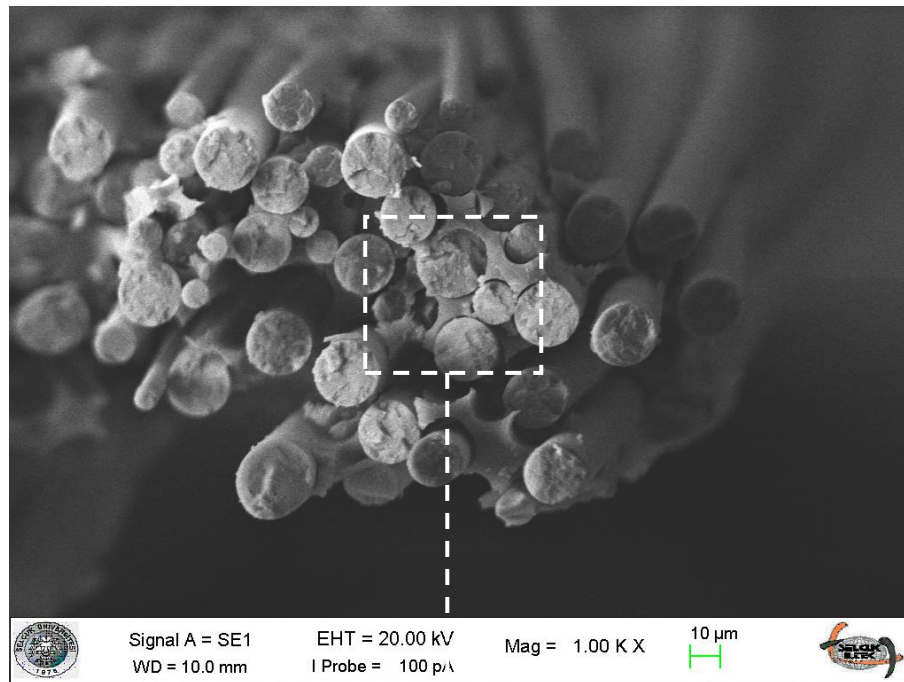
b)

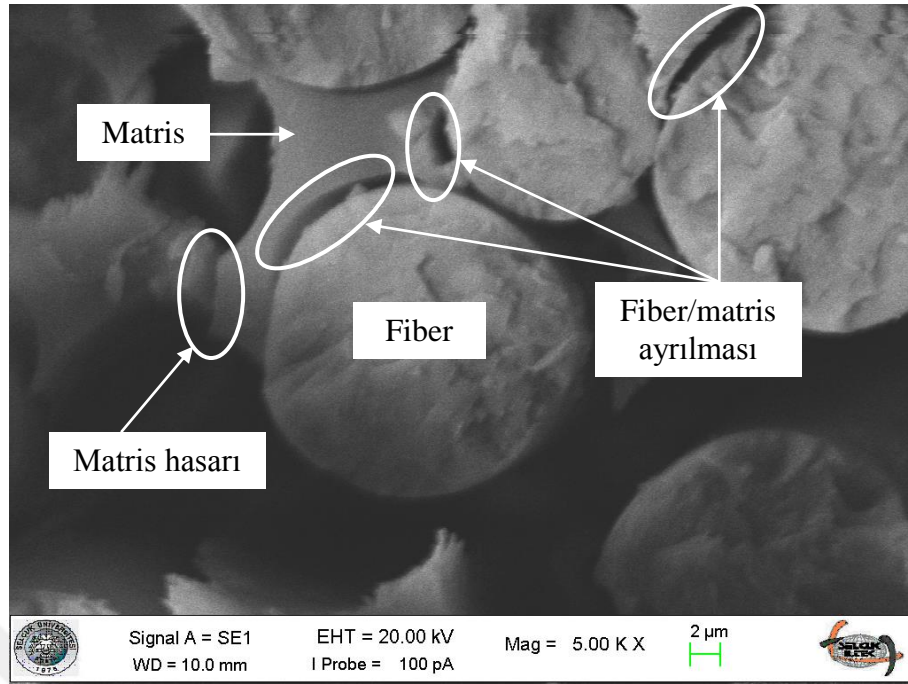


c)

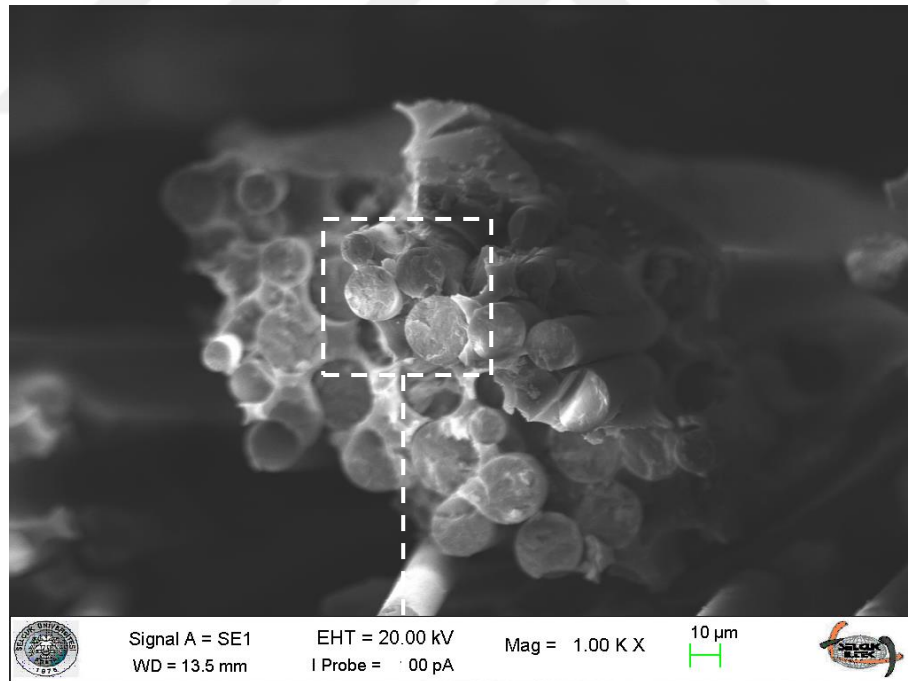
Şekil 4.10. BFRP kompozitlerin çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Epoksi/BF kompozit b) ve c) GNP-Epoksi/BF nanokompozit

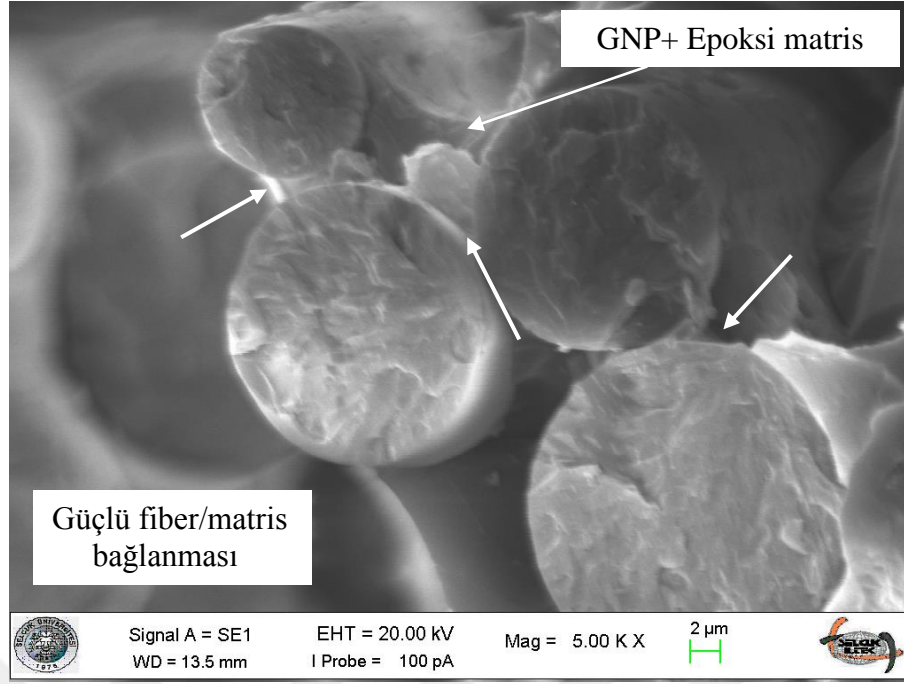
Su emilimi, kompozitlerde hasar gelişimini hızlandırır ve bazı yeni hasarlara neden olur. Su veya deniz suyunda yaşlandırma testi sırasında, matris, fiber ve ara yüzdeki değişiklikler nedeniyle kompozitlerin özellikleri değişmektedir (Pandian ve ark., 2014). Şekil 4.11'de BFRP kompozitlerin tuzlu suda yaşlandırma sonrası çekme testi kırılma yüzeylerinin kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Tuzlu suyun Epoksi/BF kompozitlerde matris-fiber arasındaki bağı zayıflatmasına bağlı olarak fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalar meydana geldiği görülmektedir. Su alarak şişen ve plastikleşen matriste kırılma hasarları gözlenmektedir. Plastikleşen matriste su emilimiyle meydana gelen gerilmeler yeni boşlukların oluşumuna, mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesine neden olabilmektedir. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin kesit SEM görüntüleri incelendiğinde ise GNP katkısının matrisi koruduğu dikkati çekmektedir. GNP katkılı nanokompozitlerde matriste daha az hasar gözlenmiş, fiber-matris arasındaki bağlanmanın korunmaya devam ettiği görülmüştür. Bazalt fiberlerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde korozyona bağlı bir hasarın meydana gelmediği açıkça söylenebilmektedir. Bu durum GNP katkısız kompozitlerde de aynı şekildedir. Tuzlu su epoksi matrisi hasara uğratmakta, GNP katkısıyla epoksi matrisin korozyon direnci arttırılmakta, bazalt fiberler ise GNP katkılı epoksi reçine ile korunmadıkları durumda dahi korozyona uğramamaktadır.





a)





b)

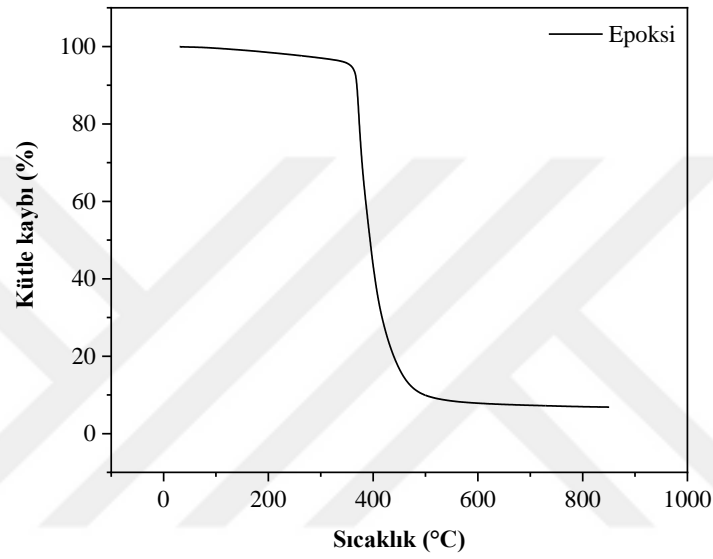
Şekil 4.11. BFRP kompozitlerin tuzlu suda yaşlandırma sonrası çekme testi kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Epoksi/BF kompozit b) GNP-Epoksi/BF nanokompozit

4.2.4. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin termal özellikleri

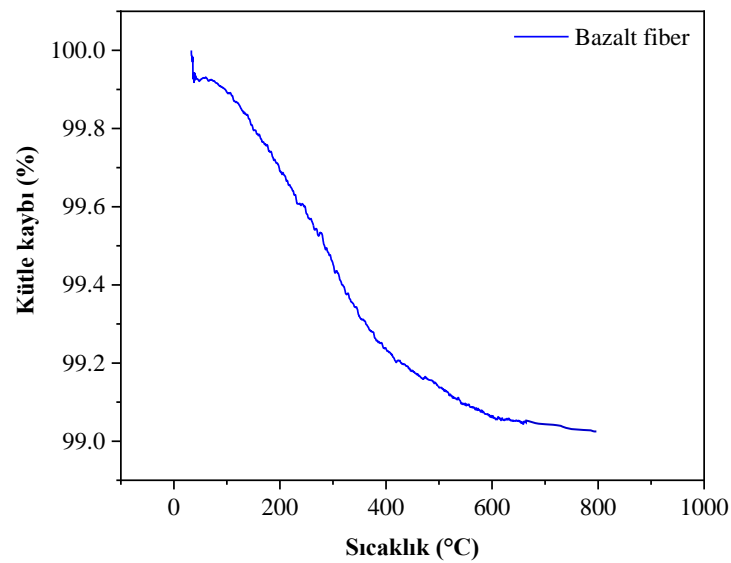
Epoksi, BF, Epoksi/BF ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin TGA sonucunda elde edilen kütle kaybı-sıcaklık ilişkisi Şekil 4.12’de verilmiştir. Numunelerin analizleri azot gazı altında 20 °C/dak.’lık bir ısıtma hızında 840 °C’ye ısıtılarak gerçekleştirilmiş, TGA eğrilerinden elde edilen bazı önemli parametre değerleri Çizelge 4.3’te verilmiştir. Termogravimetrik analizde test edilen malzemenin dehidratasyonu veya bozunması sırasındaki ağırlık değişimleri zamana veya sıcaklığa bağlı olarak verilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda fiziksel veya kimyasal bağların kopması veya oluşumu sonucunda malzemelerin ağırlığında değişim meydana gelmektedir. Sıcaklık arttıkça ortaya çıkacak uçucu maddeler sistemden ayrılacağı için ağırlıkta azalma gözlenmektedir.

TGA termogramları incelendiği zaman epoksinin bozunma sıcaklığı 66 °C, bazalt fiberin bozunma sıcaklığı ise 97 °C olarak bulunmuştur. Epoksi reçine bazalt fiberle takviye edildiğinde termal dayanımının arttığı görülmektedir. Bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitte malzeme bozunmasının iki basamakta gerçekleştiği tespit edilmiştir. İlk bozunma 315 °C’de, ikinci bozunma 455 °C’de meydana gelmiştir. Bozunma sonundaki toplam kütle kaybı % 21’dir. Epoksi matrisi ağırlıkça farklı

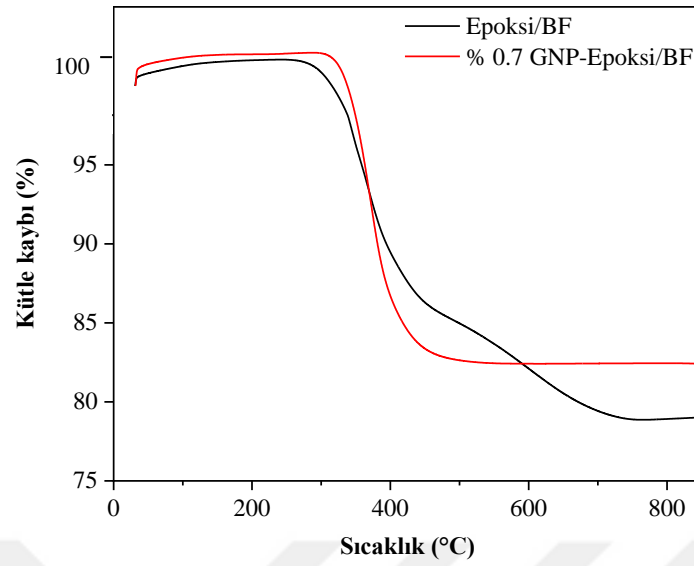
oranlarda grafen nanopartiküllerle modifiye edilen bazalt fiber takviyeli kompozitlerin termal özelliklerinde meydana gelen değişim, ağırlıkça %0.7 GNP katkıli kompozit numunelerin analiziyle incelenmiştir. Grafenin ağırlık yüzdesi arttıkça termal iletkenlik artmaktadır (Li ve ark., 2017a). Elde edilen sonuçlar, GNP katkıli Epoksi/BF nanokompozitlerin katkısiz Epoksi/BF ile karşılaştırıldığında termal kararlılığının daha stabil olduğunu göstermektedir.



a)



b)



c)

Şekil 4.12. a) Epoksi, b) bazalt fiber, c) Epoksi/BF kompozit ve %0.7 GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin TGA eğrileri

Çizelge 4.3'teki sayısal veriler karşılaştırıldığında; GNP ile modifiye edilmiş BF kompozit malzemede gözlenen toplam kütle kaybı Epoksi/BF kompozitten % 16 oranında daha azdır. Bunun yanı sıra GNP katkısı içeren kompozit malzemenin bozunma noktasının 21 °C daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Toplam kütle kaybındaki azalış ve bozunma noktasındaki artış, literatürdeki benzer çalışmalarda da belirtildiği gibi grafen nanopartiküllerin yüksek ısıl kararlılık özelliği ve uçucu ürünler için bozunma esnasında güçlü bir bariyer efekti oluşturması (Liu ve ark., 2014); saf epoksi matrisin dolayısıyla bazalt fiber takviyeli/epoksi kompozit plakaların termal kararlılığını arttırmıştır.

Çizelge 4.3 Epoksi, BF, Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin TGA analiz sonuçları

	BF	Epoksi	Epoksi/BF	%0.7 GNP-Epoksi/BF
T₀ (°C)	97	66	315	336
T₁ (°C)	-	-	455	-
Kalıntı miktarı % (840 °C)	99.1	6.8	79.0	82.4

4.3. GNP-Epoksi/BF Nanokompozitlerin Tribolojik Karakterizasyonu

Ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5 ve 0.7 GNP katkılı bazalt fiber takviyeli epoksi nanokompozitlerin normal ortam ve tuzlu su yaşlandırması sonrası sertlik değerleri, sürtünme ve aşınma testi sonuçları, SEM görüntüleriyle incelenen hasar mekanizmaları, EDX, FTIR, XRD analizleri ve AAS ölçümleri altı başlık altında verilmiştir.

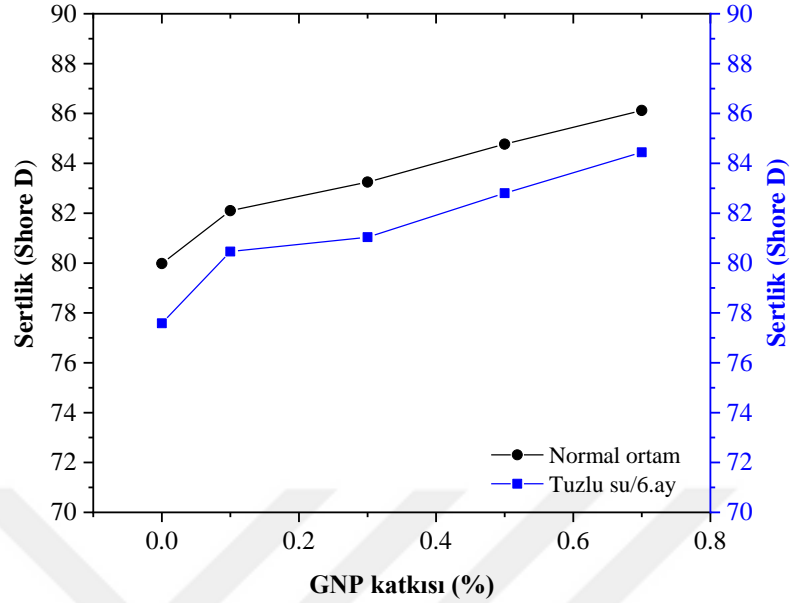
4.3.1. GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin sürtünme ve aşınma testleri

Malzemelerin sertlik değerleri, aşınmaya karşı dirençleri ve aşınma mekanizmalarının yorumlanmasında yardımcı olabilmektedir. Kompozit numunelerin tuzlu suda yaşlandırılmadan önceki ve sonraki sertlik değerleri Çizelge 4.4'te, sertlik değerlerinin grafen katkısına bağlı olarak değişimi ise Şekil 4.13' te verilmiştir. GNP katkısı arttıkça Epoksi/BF kompozitlerin sertlik değerleri yaklaşık % 3 ile % 8 arasında artış göstermiştir. Bu artışın temel nedeni epoksi içerisine dahil edilen GNP'ler (ikinci sert bir faz) ile ilişkilidir. Sertlik testi numunelerin dayanıklılığı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Ölçümlere bakıldığında, tuzlu su ortamında 6 ay boyunca bekletilen numunelerin sertlik değerlerinde % 1.95 ile % 3 arasında düşüş meydana geldiği görülmektedir. GNP katkılı kompozitlerin sertlik değerlerindeki düşüş katkısız olan kompozitlere kıyasla biraz daha azdır. GNP yüzdesinin sertlik değerini etkilediği, en düşük azalmanın en yüksek GNP katkı oranında meydana geldiği görülmektedir.

Tuzlu suda bekletilen numunelerin zamanla sertlik değerlerinde görülen düşüş matrisin şişmesiyle ve yüzeyin su ile yumuşamasıyla açıklanmaktadır (Hough ve Wright, 1996). Bununla birlikte literatürdeki benzer çalışmalarda tuzlu su ortamında daha kısa sürelerde bekletilen cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin sertlik değerlerindeki düşüşün daha fazla olduğu dikkati çekmektedir (Mahdi ve Mohsin, 2018). Bu kıyaslama bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin, cam fiber takviyelilere göre korozif ortam şartlarına daha dayanıklı olduğunu destekleyen sonuçlardan biridir.

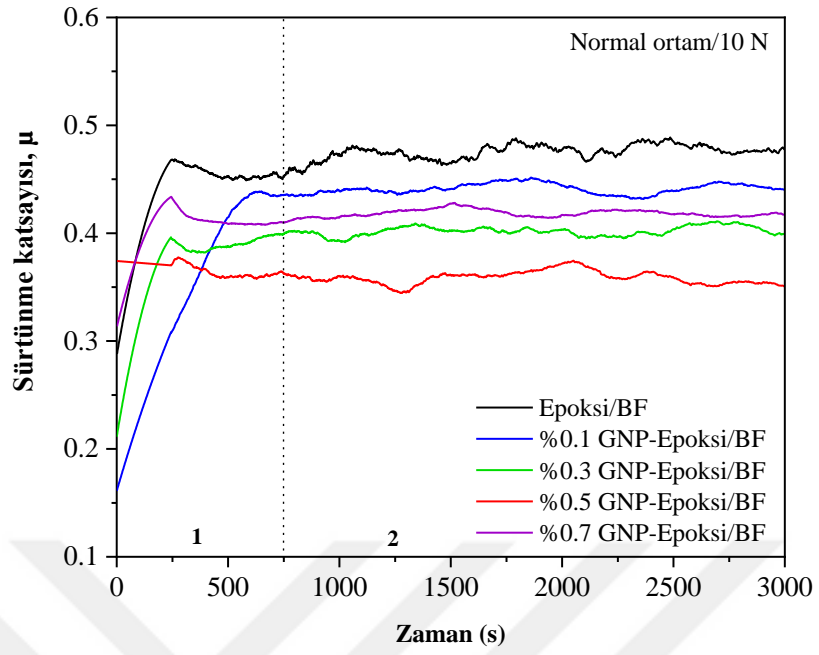
Çizelge 4.4. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin Shore D sertlik değerleri

	Epoksi /BF	%0.1 GNP-Epoksi/BF	%0.3 GNP-Epoksi/BF	%0.5 GNP-Epoksi/BF	%0.7 GNP-Epoksi/BF
Normal ortam	79.98	82.10	83.25	84.77	86.12
6. Ay	77.58	80.46	81.04	82.80	84.44
Azalma (%)	3	2	2.65	2.32	1.95

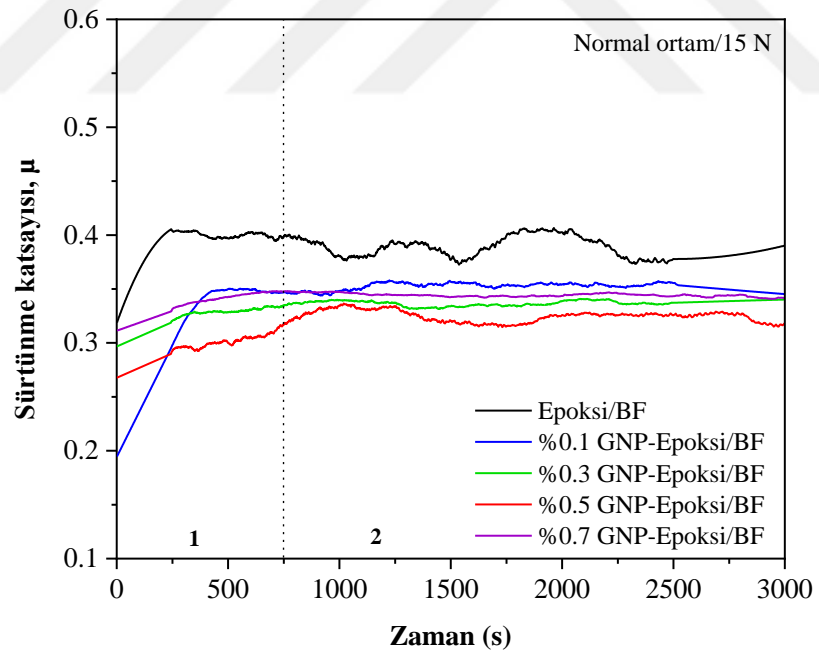


Şekil 4.13. BFRP kompozitlerin sertlik değerlerinin GNP katkısı ve tuzlu suda yaşlandırmaya bağlı olarak değişimi

Kompozit numunelerin aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.14'te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde GNP katkısının Epoksi/BF kompozitin sürtünme katsayısını önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Sürtünme katsayısı bakımından en iyi gelişme %0.5 GNP katkılı kompozitlerde sağlanmıştır. Katkısız ve %0.5 GNP katkılı Epoksi/BF kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.47 ve 0.36 olarak bulunmuştur. %0.5 GNP katkısı bazalt kompozitlerin sürtünme katsayısını % 23 azaltmıştır (Çizelge 4.5). Sürtünme katsayısındaki azalma birçok çalışmada GNP'lerin sürtünme sırasında katı yağlayıcı etkisi göstermesi olarak açıklanmıştır. Çünkü grafen yapısında güçlü karbon bağları bulundurmaktadır. Bu durum sürtünme sırasında karbon tabakaların parçalara ayrılmasını zorlaştırır. GNP katkısı ile birlikte kompozitlerin sürtünme katsayısındaki azalmanın bir diğer sebebi yüzeydeki GNP'lerin, pürüzlerin arasına girip yuvarlanma etkisi göstererek sürtünmeyi azaltmasıdır. GNP katkısının tribolojik özellikler bakımından bir diğer olumlu etkisi Epoksi/BF kompozitin kararlı aşınma bölgesine geçiş süresini kısaltması ve sürtünme katsayısı grafiğinde stabilizasyon sağlamasıdır.



a)



b)

Şekil 4.14. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin sürtünme katsayılarının zamana bağlı olarak değişimi, $L=2500$ m a) $F_N=10$ N ve b) $F_N=15$ N

Çizelge 4.5. GNP katkısının BFRP kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı üzerine etkisi

	Numune	Sürtünme Katsayısı, μ	Azalış (%)	Aşınma miktarı ($10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$)	Azalış (%)
F=10 N	Epoksi/BF	0.47		24.61	
	%0.1 GNP-Epoksi/BF	0.42	10.6	15.91	35.3
	%0.3 GNP-Epoksi/BF	0.39	17.0	12.38	49.7
	%0.5 GNP-Epoksi/BF	0.36	23.4	9.72	60.5
	%0.7 GNP-Epoksi/BF	0.42	10.6	12.47	49.3
F=15 N	Epoksi/BF	0.39		20.26	
	%0.1 GNP-Epoksi/BF	0.34	12.8	11.75	42.0
	%0.3 GNP-Epoksi/BF	0.33	15.4	9.92	51.0
	%0.5 GNP-Epoksi/BF	0.31	20.5	6.98	65.5
	%0.7 GNP-Epoksi/BF	0.34	12.8	10.18	49.7

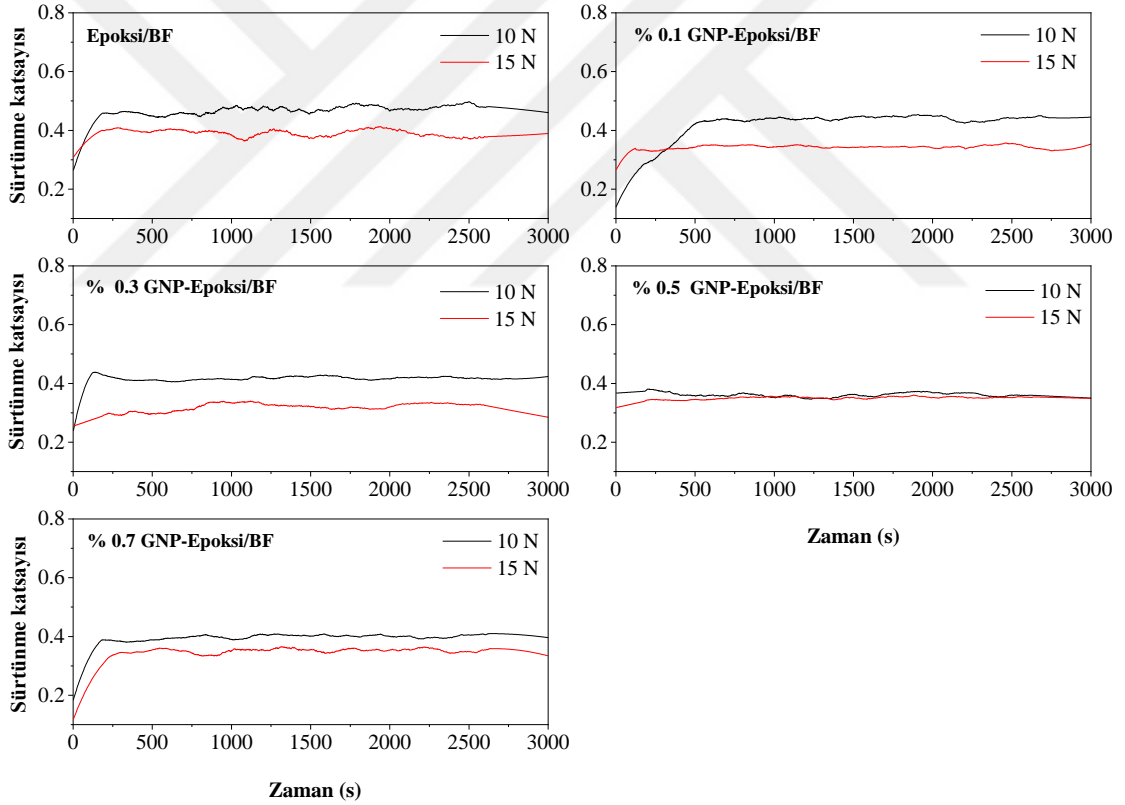
Yükün sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı üzerine etkilerini belirlemek için kuru ortamdaki katkılı ve katkısız numuneler 10 N ve 15 N yükler altında aşınma testine tabi tutulmuştur. Grafikler (Şekil 4.15 ve 4.16) ve Çizelge 4.6'daki sayısal veriler incelendiğinde kayma hızından bağımsız olarak uygulanan yükün artmasıyla bütün kompozit numunelerde sürtünme katsayılarının ve aşınma miktarlarının azaldığı görülmektedir. 10 N ve 15 N yükler altında, katkısız ve %0.5 GNP katkılı Epoksi/BF kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla; 0.47, 0.39 ve 0.36, 0.31'dir. Artan yüklerle birlikte Epoksi/BF kompozitin sürtünme katsayısı % 17 azalırken, %0.5 GNP katkılı Epoksi/BF kompozitlerde % 14'lük bir azalma meydana gelmiştir.

Artan yüklerle birlikte kompozit numune ve aşındırıcı bilye arasındaki boşluğun azalmasıyla, arada sıkışan aşınmış numune kalıntıları sinterlemeye, aglomeralar oluşturmaya ve hatta sürekli filmler (yağlayıcı tabaka) yapmaya daha eğilimli hale gelmektedir. Numune üzerinde oluşan sürekli bir film tabakası veya aglomeralar yağlama görevi görerek, artan yüklerle birlikte sürtünme katsayısını azaltmaktadır (Öztürk ve ark., 2007). Uygulanan yükün artmasıyla, polimer kompozit kayma yüzeylerinde genellikle daha az tehlikeli olan adhesiv aşınma mekanizması daha baskın hale gelmektedir. Aşınma yüzeyinde oluşan transfer filmleri, yüksek yüklerde daha düşük yüklerde oluşturulana kıyasla daha iyi kalitede olabilmektedir. Daha yüksek kaliteli transfer filmlerinin oluşumuyla birlikte, sürtünme ve aşınma azalmakta, tribolojik performans iyileşmektedir. Bunun yanı sıra, daha yüksek yüklerde transfer filmlerinin

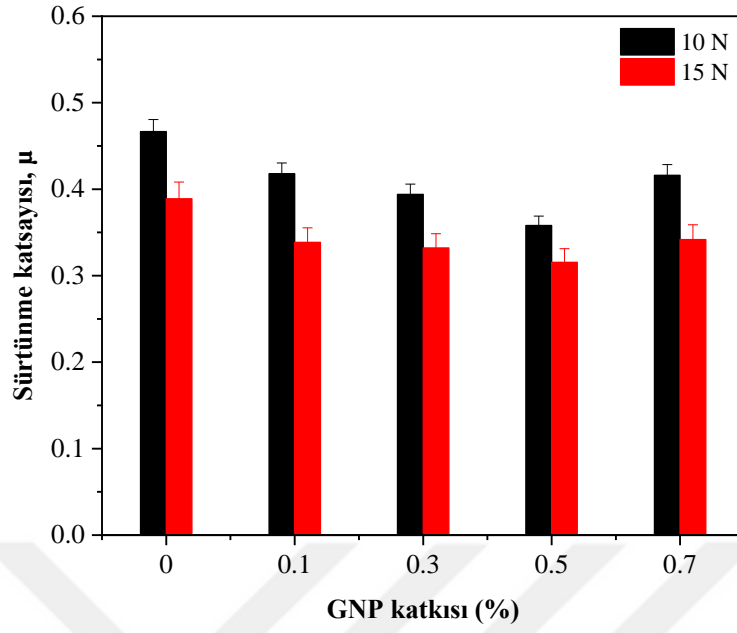
oluşma hızı arttırılabilmektedir. Yani yüzeyde daha kısa sürede sürtünme ve aşınmayı azaltıcı bir transfer filmi oluşmaktadır (Wang ve ark., 2010).

Çizelge 4.6. Artan yükün BFRP kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı üzerine etkisi

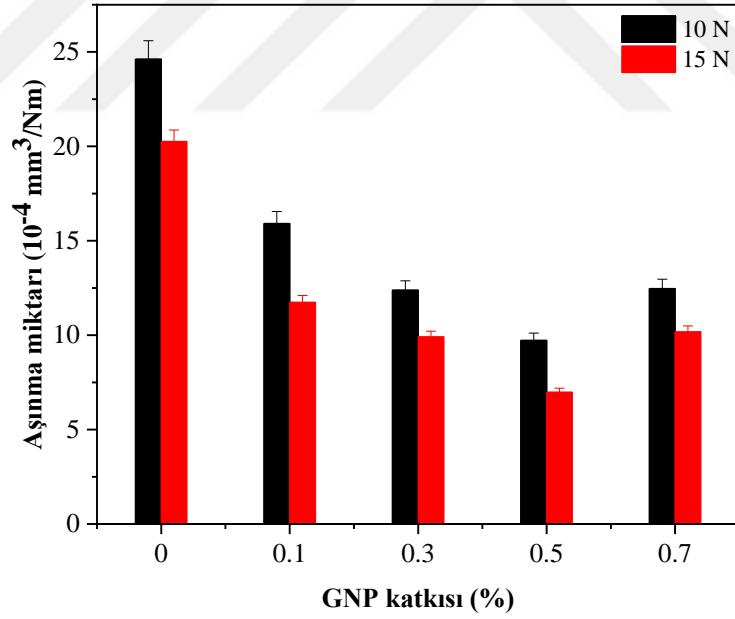
Numune	Sürtünme Katsayısı, μ		Azalış (%)	Aşınma miktarı ($10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$)		Azalış (%)
	10 N	15 N		10 N	15 N	
Epoksi/BF	0.47	0.39	17.0	24.61	20.26	17.7
%0.1 GNP-Epoksi/BF	0.42	0.34	19.0	15.91	11.75	26.1
%0.3 GNP-Epoksi/BF	0.39	0.33	15.4	12.38	9.92	19.9
%0.5 GNP-Epoksi/BF	0.36	0.31	13.9	9.72	6.98	28.2
%0.7 GNP-Epoksi/BF	0.42	0.34	19.0	12.47	10.18	18.4



Şekil 4.15. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin sürtünme katsayılarının zamana bağlı olarak değişimi, a) 10 N ve b) 15 N



a)



b)

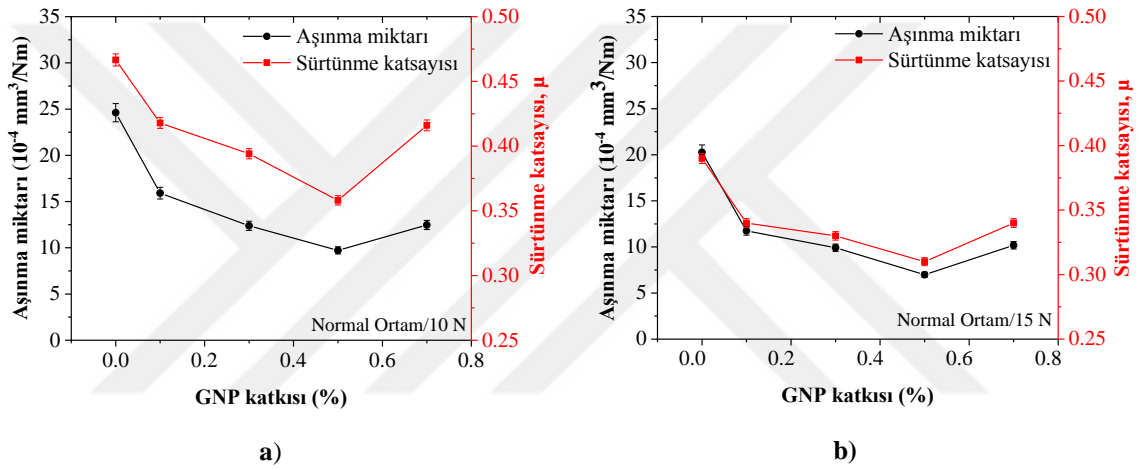
Şekil 4.16. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin değişen yükler altında a) sürtünme katsayısı ve b) aşınma miktarları

Azalan sürtünme katsayısıyla birlikte katkısız ve GNP katkılı Epoksi/BF kompozit numunelerin aşınma miktarlarında düşüş gözlenmiştir. %0.5 GNP katkılı kompozitlerin sürtünme katsayılarına paralel olarak aşınma miktarları da en düşük değerlerdedir. %0.5 GNP katkısı, katkısız Epoksi/BF kompozitlerle kıyaslandığında, kompozitlerin 10 N ve 15N yükler altındaki aşınma miktarlarında ortalama % 60'lık bir azalma sağlayarak, tribolojik performanslarını arttırmıştır. GNP katkısı hem sürtünme katsayısı hem de aşınma miktarlarında ağırlıkça %0.5 GNP konsantrasyonuna kadar iyileşme sağlarken, %0.7 katkısında bu değerler tekrar artış göstermeye başlamıştır. Her ne kadar %0.7 katkısında diğer katkı oranlarına kıyasla sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı değerleri artmış olsa da, Epoksi/BF kompozitlerle kıyaslandığında 10 N ve 15 N yük altında sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı değerlerinde sırasıyla ortalama % 13 ve % 50'lik düşüş sağlanmıştır.

Sürtünme katsayısında meydana gelen düşüş azımsanamayacak ölçüde ve önemlidir. Benzer çalışmalarda, bu azalma nanopartiküllerin katı yağlayıcı etkisi göstermesi, GNP'lerin makaslama (kırılma, kopma) etkisini azaltması ve kayma sırasında temas bölgesindeki matris malzemenin sarılarak sürtünmesinin azaltılmasıyla açıklanmıştır. Epoksi reçine içerisine yapılan nanopartikül katkısı matrisi güçlendirerek (yüksek yük taşıma kapasitesi), temas yüzeyinde çatlak önleme yeteneğini geliştirir (daha iyi tokluk) ve yağlama etkisini iyileştirerek ara yüzeyde kayma gerilmesini azaltır (Friedrich, 2018).

Grafenin geniş spesifik yüzey alanı ve kırışık morfolojisi matris ile etkileşimini güçlendirerek polimerlerin sürtünme sırasında bozulmasını ve kırılmasını azaltır. Tüm bu olumlu etkilerin yanı sıra grafen, polimerin çapraz bağlanma ağını ve polimerin sürtünme özelliklerini olumsuz etkileyen topaklanma (aglomerasyon) eğilimindedir (Wu ve ark., 2019). Nanopartiküllerin miktarı arttığında, daha fazla aglomerasyonların oluşması muhtemeldir. Agregasyon alanının boyutu arttıkça, matris partiküller arasında tamamen nüfuz edemez ve onları ıslatamaz. Bu nedenle, bu bölgelerdeki matris ve nano partiküller arasında zayıf bir arayüz gelişir. Yüksek oranda nanopartikül içeren nanokompozitler, nano malzemelerin özellikleri arttırıcı üstünlüğünden tam olarak faydalanamazlar. GNP'lerin artan katkı oranlarında mekanik özelliklerdeki düşüş ve tribolojik özelliklerdeki kötüleşme bu ifadenin doğruluğunu ortaya koymaktadır (Ayatollahi ve ark., 2012).

GNP oranı arttıkça aşınma miktarının daha da azalması beklenmektedir. Şekil 4.17.b'deki sonuçlar incelendiğinde %0.5 katkılarından sonra artan katkı oranlarında aşınma miktarında beklenildiği gibi bir düşüş olmamış, aksine artış gözlenmiştir. Bunun temel nedenlerinden biri belirtildiği gibi artan katkı oranlarında meydana gelen aglomerasyonlardır. Aşınma sırasında temas yüzeyinden malzeme kaldırılırken, aglomera olmuş bölgelere denk gelindiğinde tek seferde yüzeyden kaldırılan malzeme miktarı homojen bölgelere göre daha fazladır. Ağırlık kaybında meydana gelen artış, diğer parametreler sabit olduğunda, aynı şartlar altında aşınma miktarında artışa neden olmaktadır.



Şekil 4.17. Epoksi/BF kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarlarının artan GNP katkısıyla değişimi, a) 10 N ve b) 15 N

Şekil 4.18'de katkısız ve GNP katkılı kompozit test numunelerinin aşınma testi sonrası oluşan aşınma izlerinin fotoğrafları verilmiştir. İzler incelendiğinde %0.5 GNP katkılı numunede aşınma izinin diğerlerine kıyasla daha düzgün olduğu ve homojen bir yol izlediği görülmektedir. Bununla birlikte hemen hemen bütün numunelerde aşınma bölgelerindeki iz derinliği ve genişliğinde farklılıklar mevcuttur. Bazı bölgelerde meydana gelen hasar (aşınma izi genişliği ve derinliği) daha fazladır ve homojen değildir. Bilindiği gibi kompozit malzemeler geleneksel ve standartlaştırılmış malzemelere kıyasla daha üstün özelliklere sahiptir. Ancak bütün bölgelerde homojen bir yapının elde edilememesi kompozitlerin dezavantajlarından biridir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde kuru kayma aşınma testi sırasında meydana gelen aşınma bölgelerindeki homojen olmayan yapının nedeni kompozitin farklı fiber ve reçine bölgelerine sahip olmasıyla açıklanmaktadır (Viña ve ark., 2008).



Şekil 4.18. Aşınma testi sonrası katkısız ve GNP katkılı kompozit test numuneleri

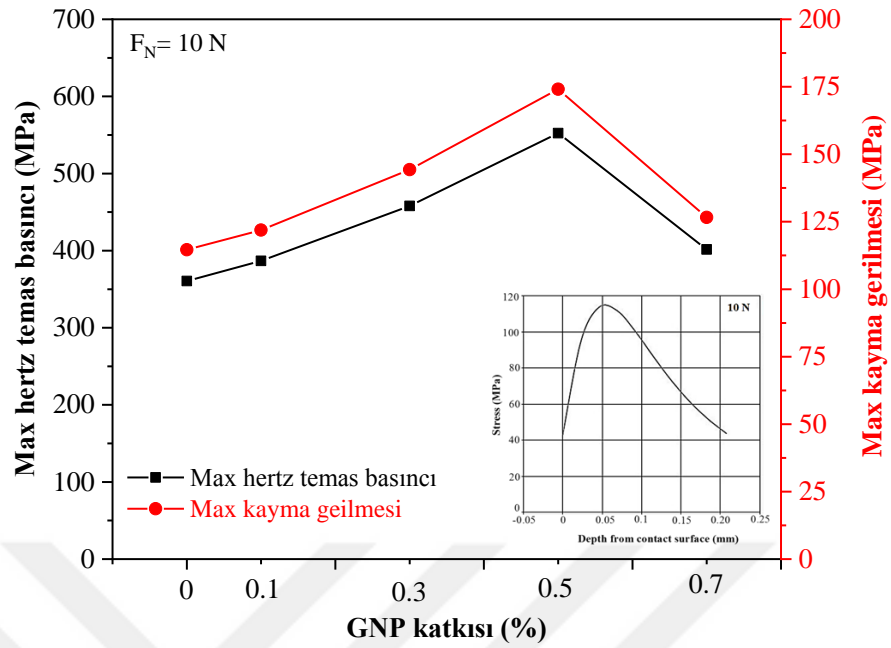
Fiber takviyeli kompozit malzemelerde fiber oryantasyonunun sürtünme katsayısı ve aşınma üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Aşınma testinden elde edilen sürtünme katsayısı, kayma fiber yönüne paralel olduğunda, paralel olmayan doğrultuya kıyasla daha düşük değerlerde seyretmektedir. Fiberlere paralel olmayan kayma doğrultusunda, fiber takviyeli epoksi kompozit numunelerde daha fazla fiber kopmaları ve bunun bir sonucu olarak daha fazla ağırlık kaybı meydana gelebilmektedir (Sahin ve ark., 2017). Kuru kayma aşınması sırasında aşındırıcı bilye, tabakalı kompozit numune üzerinde fiberlere paralel ve açılı olarak hareket ettiğinde meydana gelen aşınma mekanizmaları farklılık göstermektedir.

Fiber oryantasyonunun grafit fiber kompozitlerin sürtünme ve aşınma özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada, farklı fiber oryantasyonuna sahip numunelerin sürtünme ve aşınma davranışlarındaki farklılıkların temel olarak fiber oryantasyonundaki mikro yapının neden olduğu anizotropik özelliklerden kaynaklandığı ifade edilmiştir (Shim ve ark., 1992).

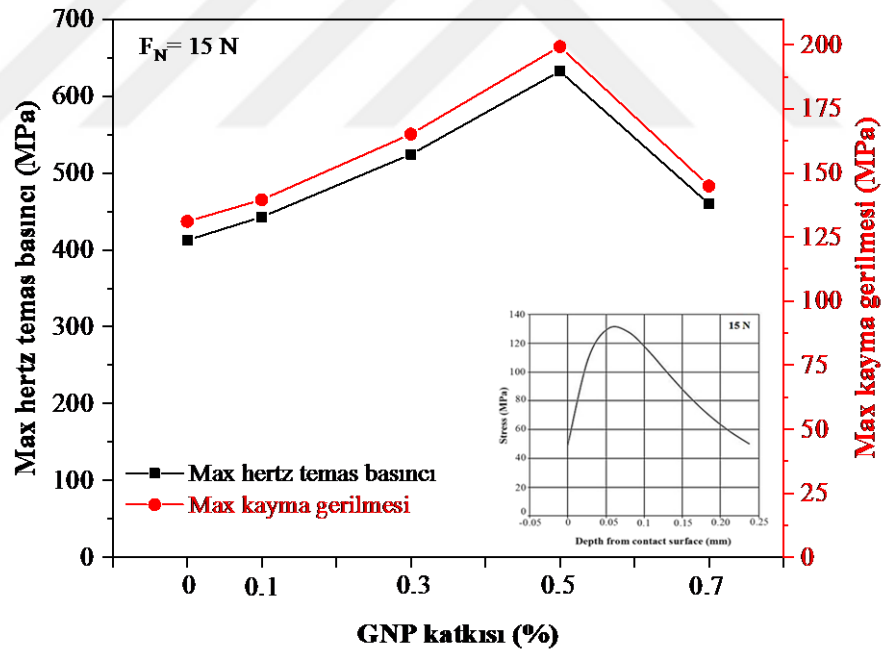
Numunelerdeki aşınma izi genişliği ve derinliğindeki farklılıkların bir diğer nedeni temas yüzeyi basıncıdır. Temas yüzeyi basıncı ve sıcaklığı, aşınma mekanizmasının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, aşınma prosesinin karmaşık yapısı nedeniyle, aşınma için genel bir gerilme modeli oluşturmak zordur. Hertz temas teorisi, temas basıncı ve aşınma yüzeyindeki maksimum gerilmeyi hesaplamak için kullanılabilir. Aşındırıcı bilye kompozit malzeme ile bir kuvvet altında temas ettiğinde, aralarındaki nokta veya çizgi teması alan temasına geçmekte ve gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmeler ve yüzey basıncı, Hertz temas teorisine göre düzlem yüzey üzerinde küresel temasla hesaplanmaktadır. Şekil 4.19'da farklı yükler altında temas yüzeyi basıncı ve kayma gerilmesinin değişimi verilmiştir. Artan yüklerle birlikte numunelerin temas yüzeylerindeki basınç ve kayma gerilmesi değerleri de artış göstermektedir. Hertz temas teorisi hesaplarına göre 10 N ve 15 N yükler altında temas yüzeyi basıncı ve kayma gerilmesi değerleri 360 MPa-632 MPa arasında değişmektedir. Aşınma testleri sırasında uygulanan yük sabit tutulmuştur. Grafiklerden görüldüğü gibi yük sabit olsa bile temas yüzeyinde oluşan basınç ve kayma gerilmelerinin değerleri değişmektedir. Bunun temel nedeni üretilen kompozitlerin GNP katkısıyla değişen elastisite modülü değerleridir.

Polimerlerin viskoelastik bir davranış gösterdiği ve uygulanan yük veya basınç altında deformasyonlarının visko-elastik olduğu bilinmektedir. Bu ifadeye bağlı olarak, sürtünme katsayısının yük veya basınçla değişimi, en genel haliyle $\mu = kN^{n-1}$ denklemiyle ifade edilmektedir. Burada μ sürtünme katsayısı, N yük, k ve n (n; elastik ve plastik deformasyon arasındaki etkileşimin miktarına bağlı olarak 2/3 ve 1 arasında değişen değerler almaktadır) ise sabitlerdir (Zhang ve ark., 2009c).

Bu denkleme göre, sürtünme katsayısı, yük veya basınç artışı ile azalmaktadır, ancak uygulanan yük veya basınç, polimerin sınır yük veya basınç değerlerine yükseldiğinde, polimer malzemenin kritik yüzey enerjisi sayesinde sürtünme ve aşınma artacaktır (Ünal ve ark., 2009).



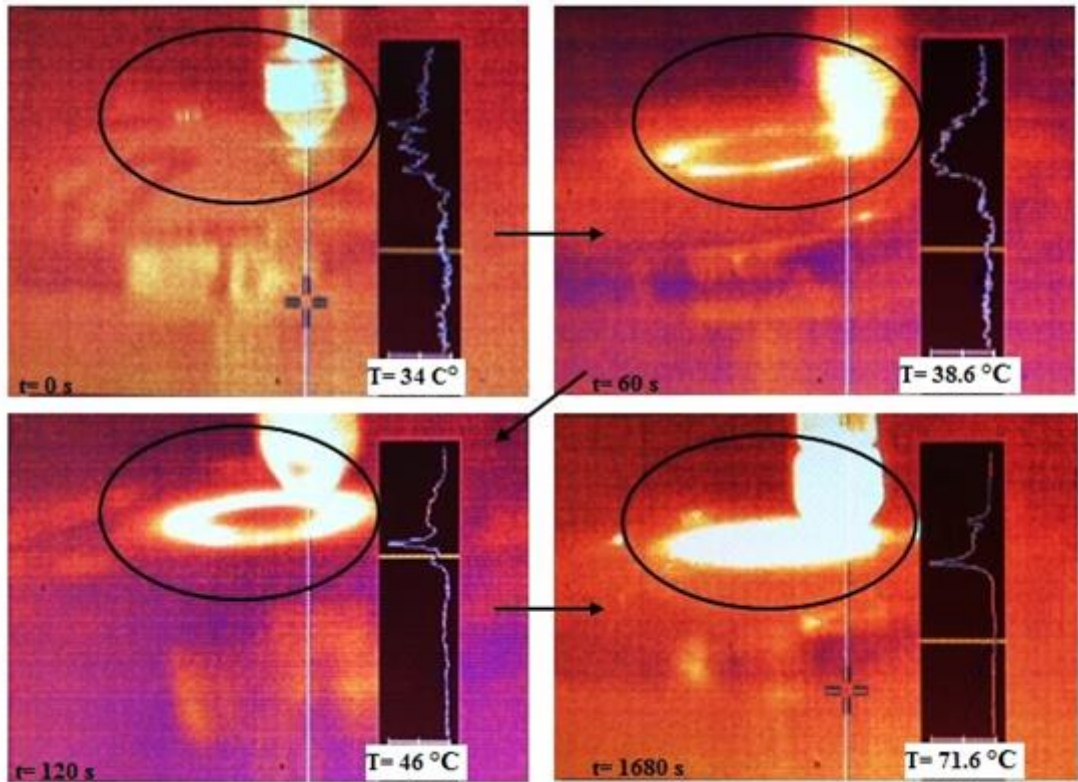
a)



b)

Şekil 4.19. Numunelerin temas yüzeyi basıncı ve kayma gerilmesinin a) 10 N ve b) 15 N yük altında değişimi

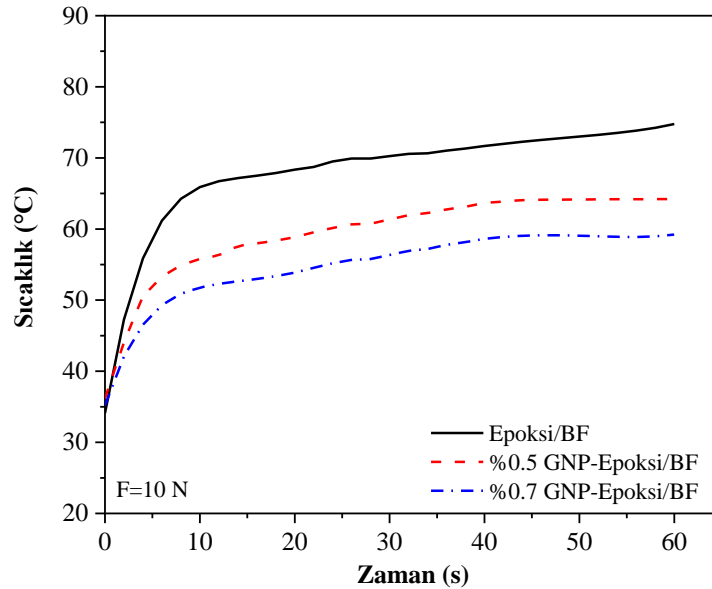
Kompozitlerin farklı yükler altındaki ve farklı ortamlardaki sürtünme ve aşınma performanslarını daha iyi açıklayabilmek için testler sırasında termal kamera yardımıyla temas bölgesi sıcaklıkları kayıt altına alınmıştır. Termal özellikler, aglomerasyonlara karşı mekanik ve tribolojik özellikler kadar duyarlı değildir. GNP katkısı arttıkça kompozitlerin termal iletkenlikleri artmaktadır. Bu nedenle aşınma testleri sırasında katkısız ve katkılı kompozit numunelerdeki sıcaklık farkını değerlendirebilmek için, Epoksi/BF kompozitler ve ağırlıkça en yüksek oranda GNP içeren %0.7 GNP katkılı Epoksi/BF nanokompozitlerin temas bölgesi sıcaklıkları kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.20’de aşınma testi sırasında temas bölgesinde oluşan ısının zamanla aşınma izi sınırları içerisinde dağılımı görülmektedir. Grafen sıcaklık direnci oldukça yüksek (-75 °C - +200 °C) olan, yüksek termal iletkenliğe sahip bir malzemedir. Bu özelliği takviye edildiği malzemelerin termal iletkenliğini arttırmada önemli rol oynamaktadır. GNP katkılı kompozitlerde, grafen yüksek termal iletken bir kanal görevi görür; modifiye yüzey, polimer matrisin moleküler zincirleriyle kovalent ve kovalent olmayan bir bağ sağlar. Bu bağlanma grafenden polimere fonon transferini kolaylaştırır ve ayrıca polimerden grafene fonon transferini teşvik eder (Li ve ark., 2017b).



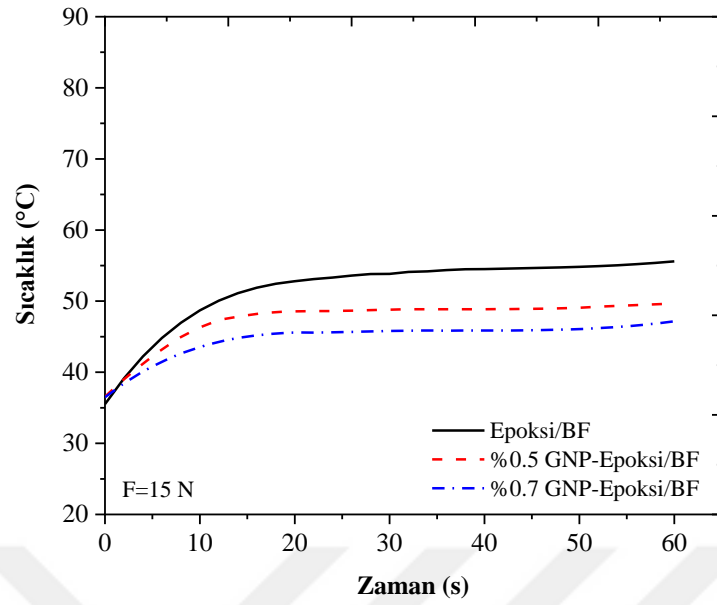
Şekil 4.20. Aşınma testi sırasında sıcaklık dağılımı

GNP katkısıyla termal iletkenliği artırılan Epoksi/BF kompozitlerin aşınma testi sırasında temas bölgesi sıcaklığı 70 °C'lerden, 55 °C'ye kadar düşürülmüştür. GNP katkılı kompozitin termal iletkenliği daha yüksek olduğu için temas bölgesi daha çabuk ısınmakta, ancak artan iletkenlikle birlikte daha hızlı bir ısı transferi olduğu için, temas bölgesindeki ısı hızlı bir şekilde kompozitin yüzeyine dağıtılmakta, böylelikle temas bölgesindeki sıcaklık değeri düşmektedir. Sürtünme katsayısında meydana gelen azalmanın bir diğer nedeni, grafen nanopartiküllerin yüksek ısı iletkenlikleri sayesinde aşınma yüzeyindeki ısınmayı azaltması olarak ifade edilebilir.

Şekil 4.21'deki grafiklerden yükün artmasıyla temas bölgesi sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Aşınma testlerinde 10 N yük altında Epoksi/BF kompozitin temas bölgesi sıcaklığı bir saatin sonunda ~75 °C'ye ulaşırken, 15 N yük altında sıcaklık ~56 °C civarındadır. Sıcaklık arttıkça polimer yumuşamakta ve sürtünme katsayısı azalmaktadır. 15 N yük altında oluşan ısının bir kısmı polimeri yumuşatmak için matris tarafından absorbe edilmekte ve böylelikle son durumda temas bölgesinin sıcaklığı 10 N yük altındaki değerlerden daha düşük değerlerde seyretmektedir. GNP katkılı Epoksi/BF nanokompozitlerin temas bölgesi sıcaklıklarında 10 N ve 15 N yükler altında sırasıyla ortalama ~15 °C ve ~8 °C düşüş sağlamıştır.



a)



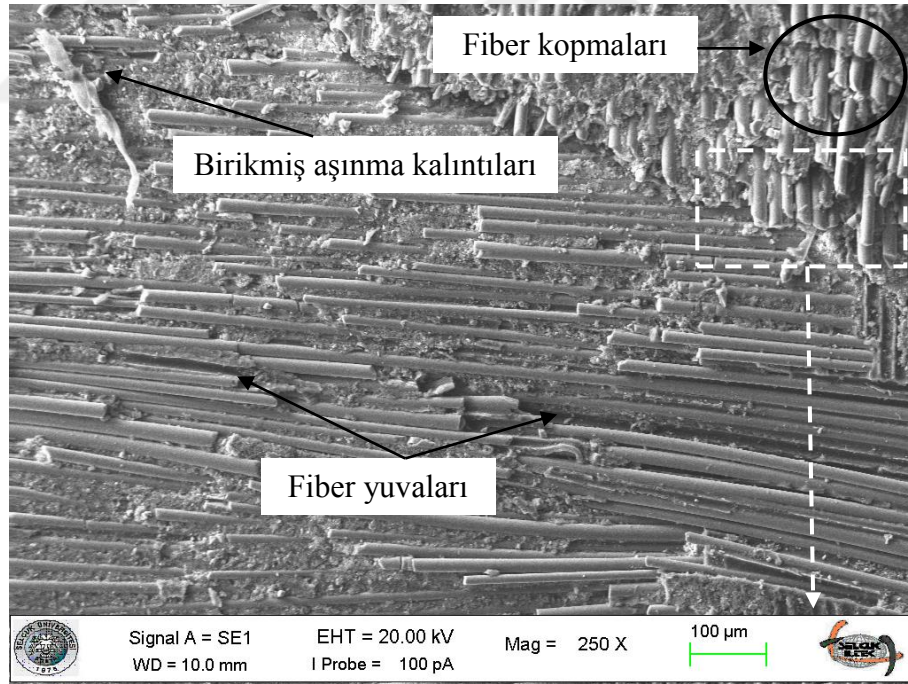
b)

Şekil 4.21. Aşınma testi sırasında temas bölgesi sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi, a) 10 N ve b) 15 N, (L=2500 m, V=0.75 m/s)

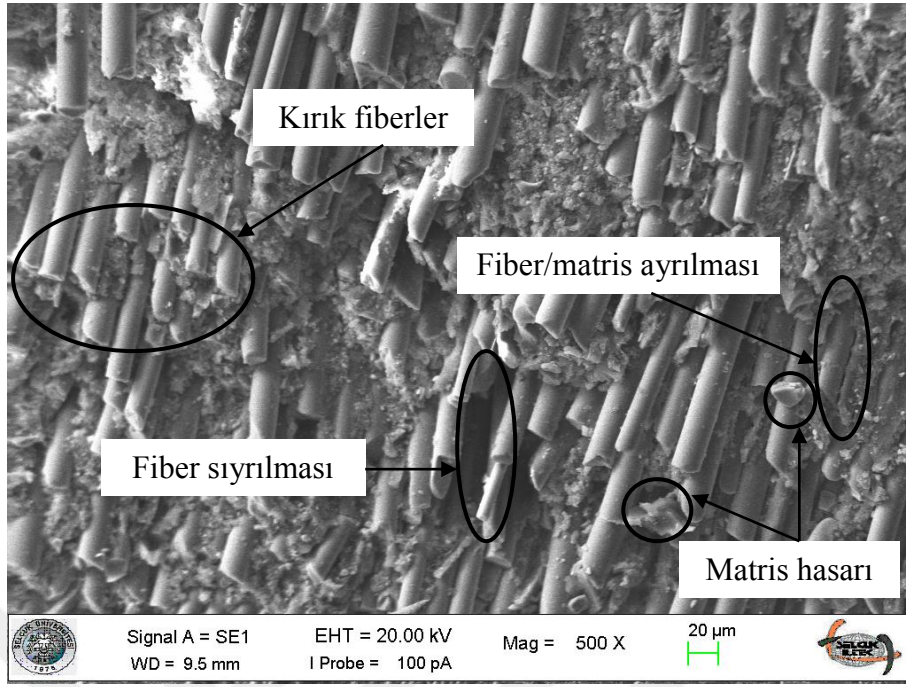
4.3.2. Aşınma yüzeylerinin hasar analizi

Aşınma testine tabi tutulmuş numunelerin sürtünme ve aşınmaya bağlı olarak temas yüzeylerinde meydana gelen hasarın ve baskın aşınma mekanizmalarının SEM yardımıyla tanımlanması mümkündür. Katkısız (a, b, c) ve %0.5 GNP katkılı (d, e, f) Epoksi/BF kompozitlerin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.22'de verilmiştir. Kompozit numunelerin aşınma yüzeylerinde abrazif aşınma mekanizmasının baskın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte GNP katkılı ve katkısız Epoksi/BF kompozitlerin SEM görüntüleri arasında önemli farklılıklar gözlenmiştir. Aşınma testi sırasında kompozitlerde ilk olarak polimer matris hasara uğramaktadır. Aynı test koşulları ve süresi altında katkısız bazalt fiber kompozitlerde kayma sırasında yüzeydeki matrisin tamamıyla birlikte ilk fiber tabakasındaki fiberlerin tamamına yakını koparılmıştır. Şekil 4.22.a ve Şekil 4.22.b'de görüldüğü gibi katkısız kompozitlerdeki fiberler ve epoksi matris daha fazla hasara uğramıştır. Kayma etkisi altında fiberlerin bir kısmı eksene açılı, bir kısmı ise eksene dik olarak koparken, matriste parçalanmalar gözlenmiştir. Bazalt fiberler ile epoksi matris arasında ara yüzey ayrılmalarının etkisiyle fiber sıyrılmalarına da rastlanmıştır.

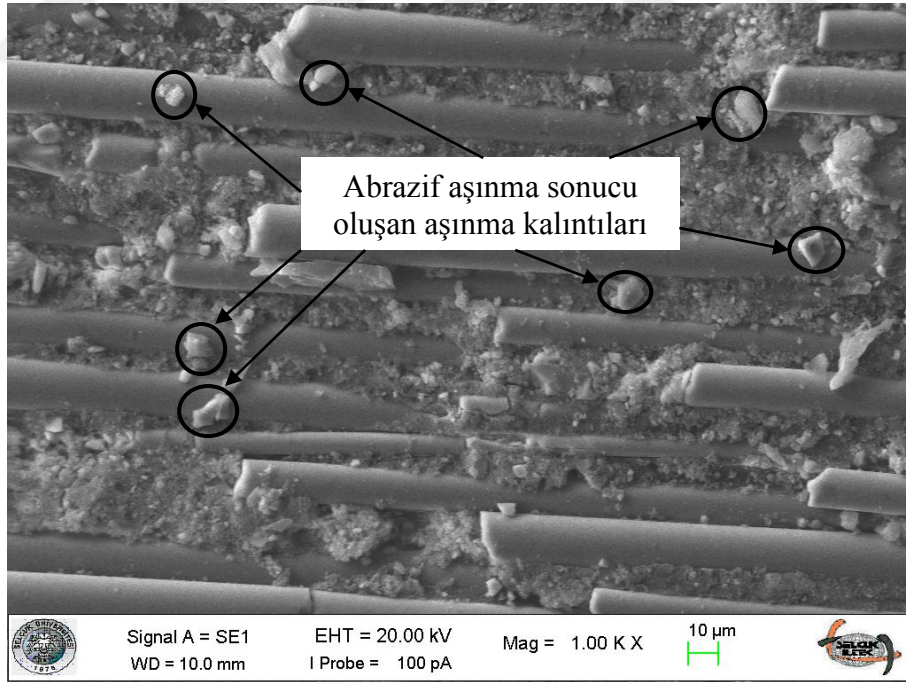
Abrazif aşınma sonucu oluşan aşınma kalıntıları katkısız kompozitlerde, GNP katkılı kompozitlere kıyasla oldukça fazladır (Şekil 4.22.c). Mekanik ve tribolojik özellikler bakımından en yüksek performans sergileyen ağırlıkça %0.5 GNP içeren Epoksi/BF nanokompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde Şekil 4.22.d'de, kayma etkisi altında matris malzemesinin tamamının yüzeyden kaldırılamadığı, fiberlerin bir kısmı hasara uğrarken bir kısmının matris ile korunmaya devam ettiği görülmektedir. GNP'ler yüzeyde bir yağ filmi gibi görev yaparak Epoksi/BF kompozitlerin temas yüzeylerinde daha az hasar oluşmasına katkı sağlamıştır. Epoksi içerisinde homojen olarak dağıtılan GNP'ler fiberler ve matris arasındaki etkileşimi (güçlü bağlanma) arttırmıştır (Şekil 4.22.e). Fiber ve matris arasındaki yüksek bağlanma mukavemeti fiberlerin sıyrılmaya, matrisin ise parçalanmaya karşı direncini arttırmıştır. GNP'lerin mekanik özellikleri arttırdığı sonucu göz önünde bulundurulduğunda, beklenildiği gibi GNP katkılı epoksi matrisin, katkısız kompozitlerle kıyaslandığında daha az hasara uğradığı SEM görüntüleriyle de desteklenmiştir.



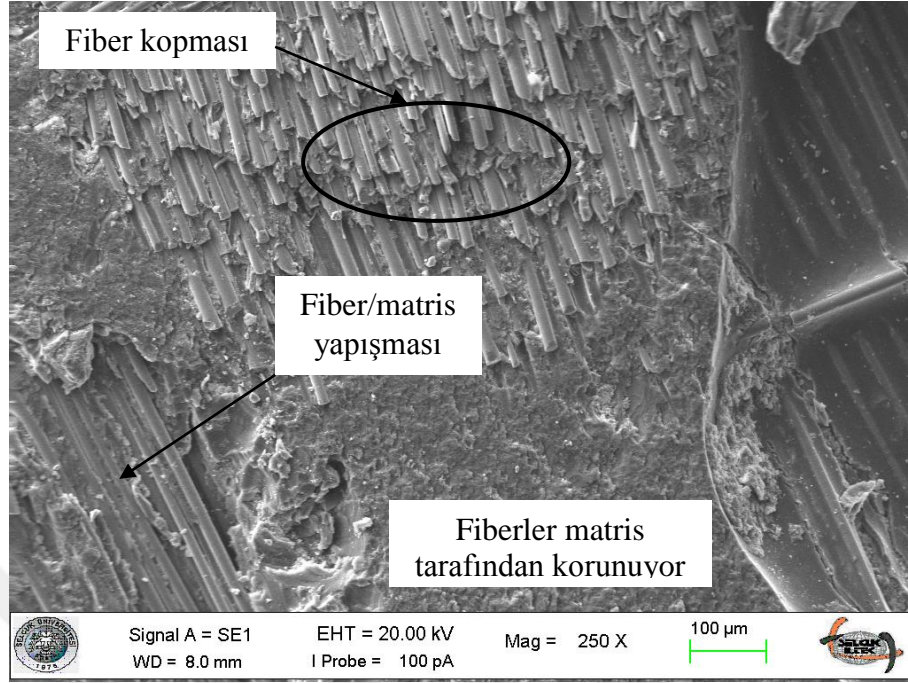
a)



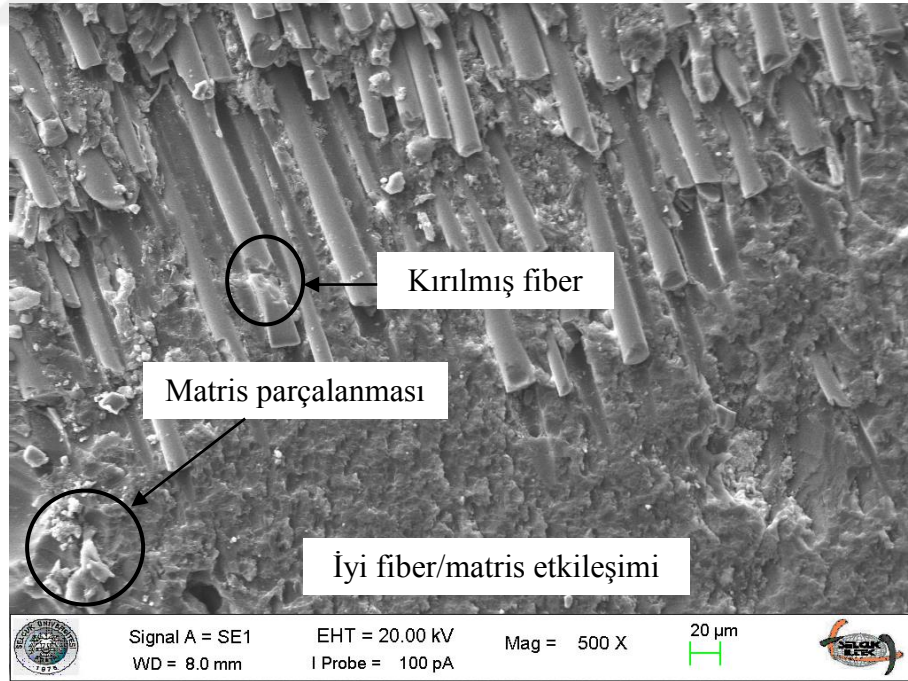
b)



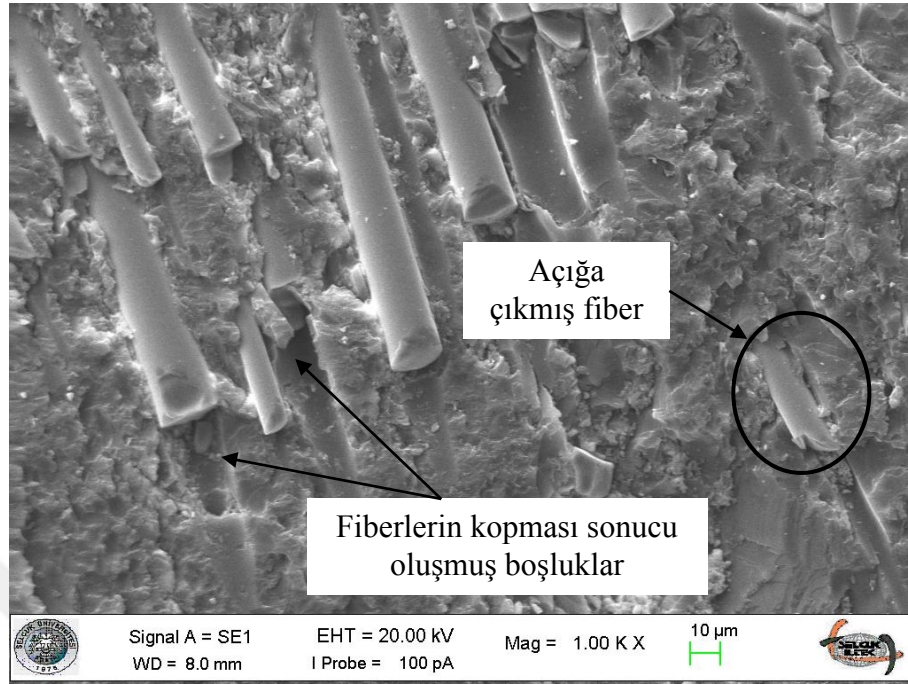
c)



d)



e)



f)

Şekil 4.22. BFRP kompozitlerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri ($F_N=10$ N, $L=2500$ m, $V=0.75$ m/s)
a), b), c) Epoksi/BF kompozit ve d), e), f) %0.5 GNP-Epoksi/BF nanokompozit

4.3.3. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin sürtünme ve aşınma testleri

Tuzlu su ortamında 6 ay yaşlandırılan kompozitlerin 2'şer aylık periyotlar sonunda tekrarlanan aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir. Çizelgedeki sayısal veriler değerlendirildiğinde periyotlar sonunda sürtünme katsayısı ve aşınma miktarlarında zamanla azalma meydana geldiği görülmektedir. Epoksi/BF kompozitin sürtünme katsayısı 2.ayın sonunda % 4.2'lik bir düşüş gösterirken, 4. ve 6. ayların sonunda sırasıyla % 15 ve % 19 azalmıştır. Genel olarak katkısız ve GNP katkılı bütün kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı değerleri azalmıştır. 6.ayın sonunda %0.3 GNP katkılı nanokompozit haricindeki bütün kompozitlerde sürtünme katsayısında yaklaşık % 19 oranında bir azalma meydana gelmiştir. 4. ayın sonunda %0.5 GNP katkılı kompozitlerin sürtünme katsayısı % 8 azalırken, katkısız Epoksi/BF kompozitlerde azalma % 15 seviyesindedir.

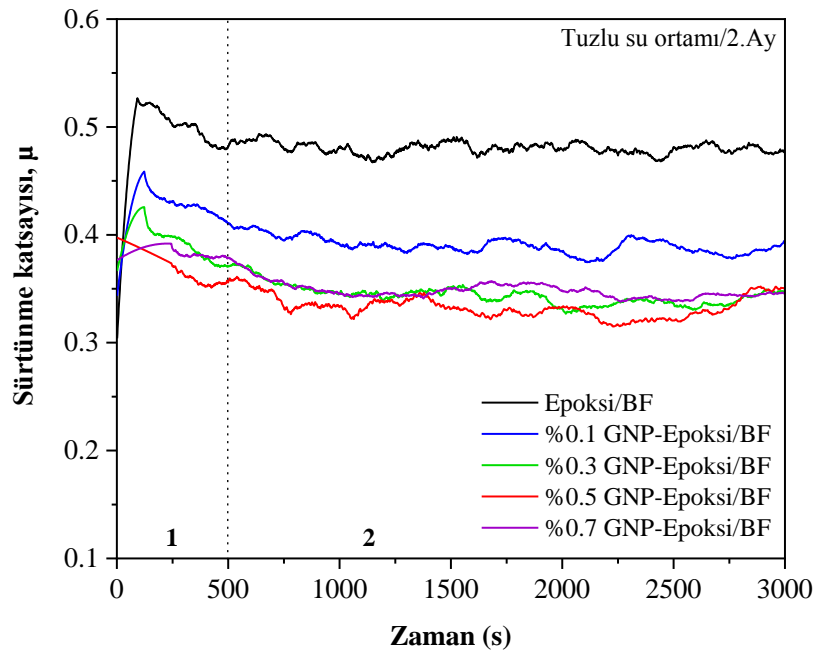
Çizelge 4.7. Tuzlu su yaşlandırmasının BFRP kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı üzerine etkisi

	Yaşlandırma Süresi (Ay)	Sürtünme Katsayısı, μ	Azalış (%)	Aşınma miktarı ($10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$)	Azalış (%)
Epoksi/BF	0	0.47		24.61	
	2	0.45	4.2	23.46	4.6
	4	0.40	14.9	21.50	12.6
	6	0.38	19.1	21.16	14.0
%0.1 GNP- Epoksi/BF	0	0.42		15.91	
	2	0.40	4.7	15.05	5.4
	4	0.39	7.1	14.47	9.0
	6	0.34	19.0	12.35	22.3
%0.3 GNP- Epoksi/BF	0	0.39		12.38	
	2	0.36	7.7	11.97	3.3
	4	0.35	10.2	10.55	14.8
	6	0.34	12.8	9.42	23.9
%0.5 GNP- Epoksi/BF	0	0.36		9.72	
	2	0.34	5.5	8.97	7.7
	4	0.33	8.3	7.52	22.6
	6	0.29	19.4	6.61	31.9
%0.7 GNP- Epoksi/BF	0	0.42		12.47	
	2	0.36	14.3	11.74	5.8
	4	0.35	16.6	11.35	8.9
	6	0.34	19.0	10.18	18.4

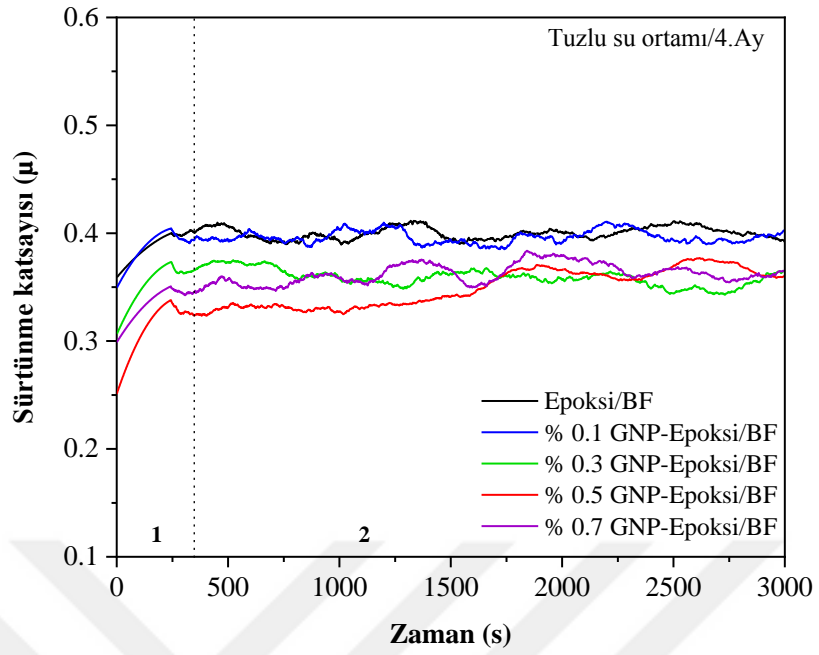
Grafenin atomları çok sıkı bir şekilde dizildiğinden, içinden çok küçük atomların geçişine dahi izin vermeyeceği bilinmektedir. Grafen epoksi matris içindeki boş alanları bloke edebilen yapı çekirdekleri olarak davranmaktadır. Bu özelliğinden yola çıkarak homojen olarak dağıtılmış olan GNP'lerin epoksi içerisinde bariyer görevi yaparak kompozitlerin daha az su absorbe ettiği söylenebilmektedir. Ancak homojen olarak dağıtılamayan GNP'ler matris içerisinde aglomerasyonlara neden olur, aglomera grafen tabakaları matriste su istilası için uygun çok sayıda deliğe yol açmaktadır (Qiu ve ark., 2018). Çalışmada GNP'lerin homojen olarak dağıtılabildiği en yüksek ağırlıkça GNP katkı oranı %0.5'tir. %0.5 GNP katkılı kompozitler daha az tuzlu su absorbe ettiklerinden fiber-matris arasındaki bağlanma, Epoksi/BF kompozitlere ve düşük katkı oranlarındaki GNP-Epoksi/BF nanokompozitlere kıyasla daha az hasara uğramıştır.

Bu mekanizma nanokompozitin yaşlandırma süresince mekanik özelliklerini korumaya çalışmasının yanında aşınmaya karşı direnç göstermesinde de etkilidir.

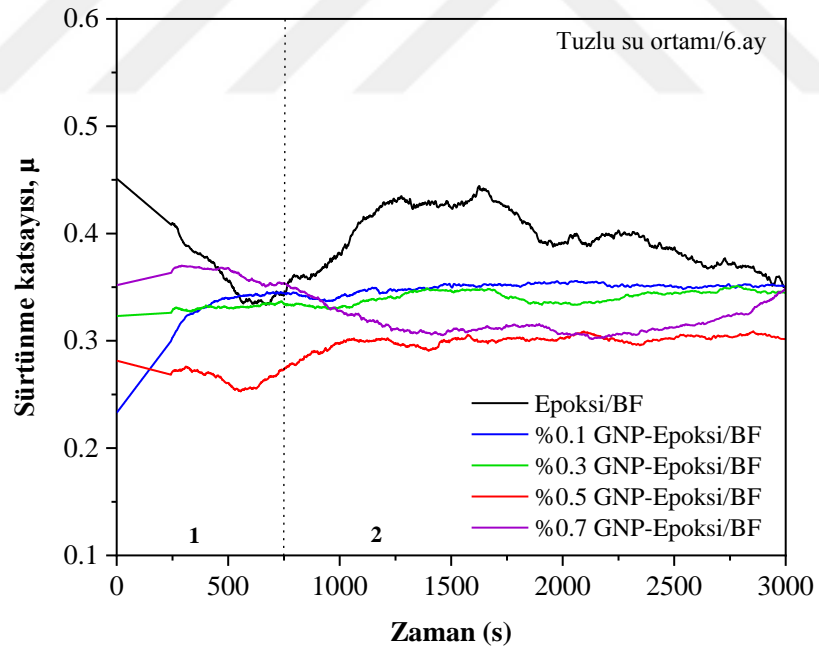
Tuzlu suda yaşlandırıldıktan sonra aşınma testine tabi tutulan kompozit numunelerin 2., 4. ve 6. sonunda sürtünme katsayılarının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.23'te verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı grafikleri incelendiğinde 2. ayın sonunda sürtünme katsayısı eğrilerinin, normal ortam aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı eğrileriyle benzer karakteristikte, kararlı aşınma bölgesine geçiş sürelerinin ise daha kısa olduğu görülmektedir. 4. ayın sonunda Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin sürtünme katsayısı eğrileri birbirine yaklaşmış, sürtünme katsayıları arasındaki fark azalmıştır. Yaşlandırma süresi uzatılarak 6.aya ulaşıldığında kompozitlerin tümünde yaklaşık 1200 m kayma mesafesine kadar sürtünme katsayılarında stabilizasyon sağlanamamış, kararlı aşınma bölgesine geçiş süreleri artış göstermiştir. Aşındırıcı bilye kompozit numuneler üzerinde yaklaşık 1200 m yol aldıktan sonra GNP-Epoksi/BF kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları stabilize olup kararlı bir rejime ulaşırken, Epoksi/BF kompozitlerde sürtünme katsayısı 1500 m kayma mesafesine kadar artış göstermiş, bu mesafeden sonra tekrar düşüşe geçmiştir..



a)



b)



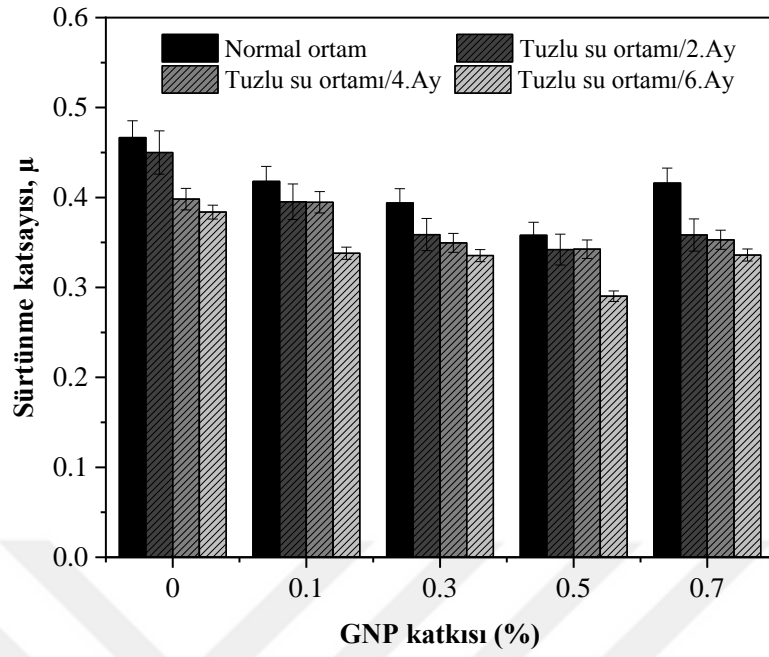
c)

Şekil 4.23. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin farklı yaşlandırma süreleri sonunda sürtünme katsayılarının zamana bağlı olarak değişimi, $F_N=10\text{ N}$, $L=2500\text{ m}$
a) 2.ay sonu, b) 4.ay sonu ve c) 6.ay sonu

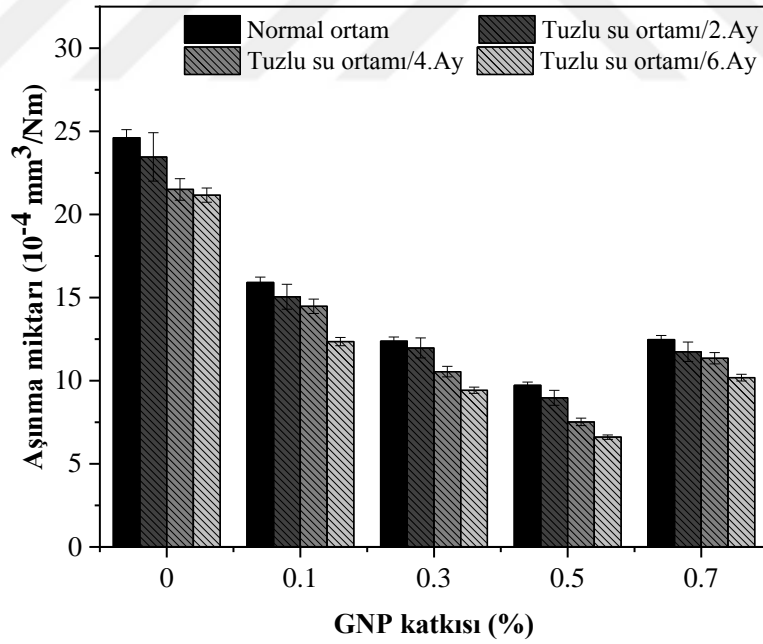
Epoksi/BF kompozit GNP-Epoksi/BF nanokompozitlere kıyasla daha fazla hidrofilik grup oranına sahiptir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte, hidrofilik gruplar daha fazla su molekülünün kompozit yapıdaki boşluğu doldurmasına neden olur. Su absorbe eden kompozitte fiberler ve matriste meydana gelen şişme miktarı farklıdır. Farklı oranlardaki şişmenin etkisiyle meydana gelen gerilmeler çatlak oluşumuna neden olur, mevcut çatlakların büyümesini ve ilerlemesini hızlandırır. Tuzlu suda yaşlandırılan kompozit numuneler aşınma testinden önce bir bakıma ön hasara uğramaktadır. GNP katkısız kompozitlerde tuzlu su absorpsiyonunun daha fazla olması ön hasar mekanizmalarını geliştirmektedir. Ön hasara uğrayan yapı aşınma testi sırasında matrisin daha çabuk ve fazla parçalanmasına, fiberlerde sıyrılma ve kopmaların kolaylaşmasına neden olmaktadır. Artan yaşlandırma süreleri sonunda sürtünme katsayısı eğrilerinde görülen dalgalanmaların; i) yüzeyde biriken tuz kristallerinin yüzey pürüzlülüğünde meydana getirdiği değişimden, ii) belirli bölgelerde ilk fiber tabakasının yüzeyden tamamen koparılmasının ardından ikinci fiber tabakasına geçiş sürecinden ve iii) bu geçiş sürecinde aşındırıcı bilyenin fiberlere paralel olmayan doğrultuda dokuma kumaşın birleşme noktalarına temas ettiğinde sekmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarlarının farklı yaşlandırma süreleri sonunda değişimi Şekil 4.24'te, artan GNP katkısıyla değişimi ise Şekil 4.25'te verilmiştir. 6.ayın sonunda Epoksi/BF numunelerin aşınma miktarı % 14 azalırken, %0.5 GNP katkılı Epoksi/BF kompozitlerde bu oran % 32'ye ulaşmıştır. Tuzlu suda yaşlandırılan numunelerin yüzeylerinde oluşan bileşikler yağlayıcı film görevi görerek sürtünme katsayısını azaltmış, sürtünme katsayısının azalmasıyla kompozitlerin yüzeylerinden kaldırılan malzeme kaybı da azalmıştır. Buna bağlı olarak aşınma miktarı değerlerinin normal ortamdaki değerlerle kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmüştür.

Kompozit malzemeler tuzlu su ortamında bekletildiğinde bazalt fiberden Ca, Mg, Al ve K dahil olmak üzere bazı bileşenler ayrılır. Bu elementler kompozitlerin yüzeylerinde $Mg(OH)_2$ ve $CaCO_3$ 'ün birikmesine neden olabilmektedir. Bunun yanında farklı hidratların ve yüzeyde oksit filminin oluşması da mümkündür. Malzemelerin yüzeyinde oluşan bu çeşitli bileşikler ve film tabakalarının sınır yağlama etkisi vardır ve kayma yüzeylerinin doğrudan temasını engellemektedir. Bu mekanizma tribolojik özelliklerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Tuzlu suda yaşlandırılan kompozitlerin yüzeylerinde biriken element ve bileşikler EDX analiz sonuçlarında değerlendirilmiştir.

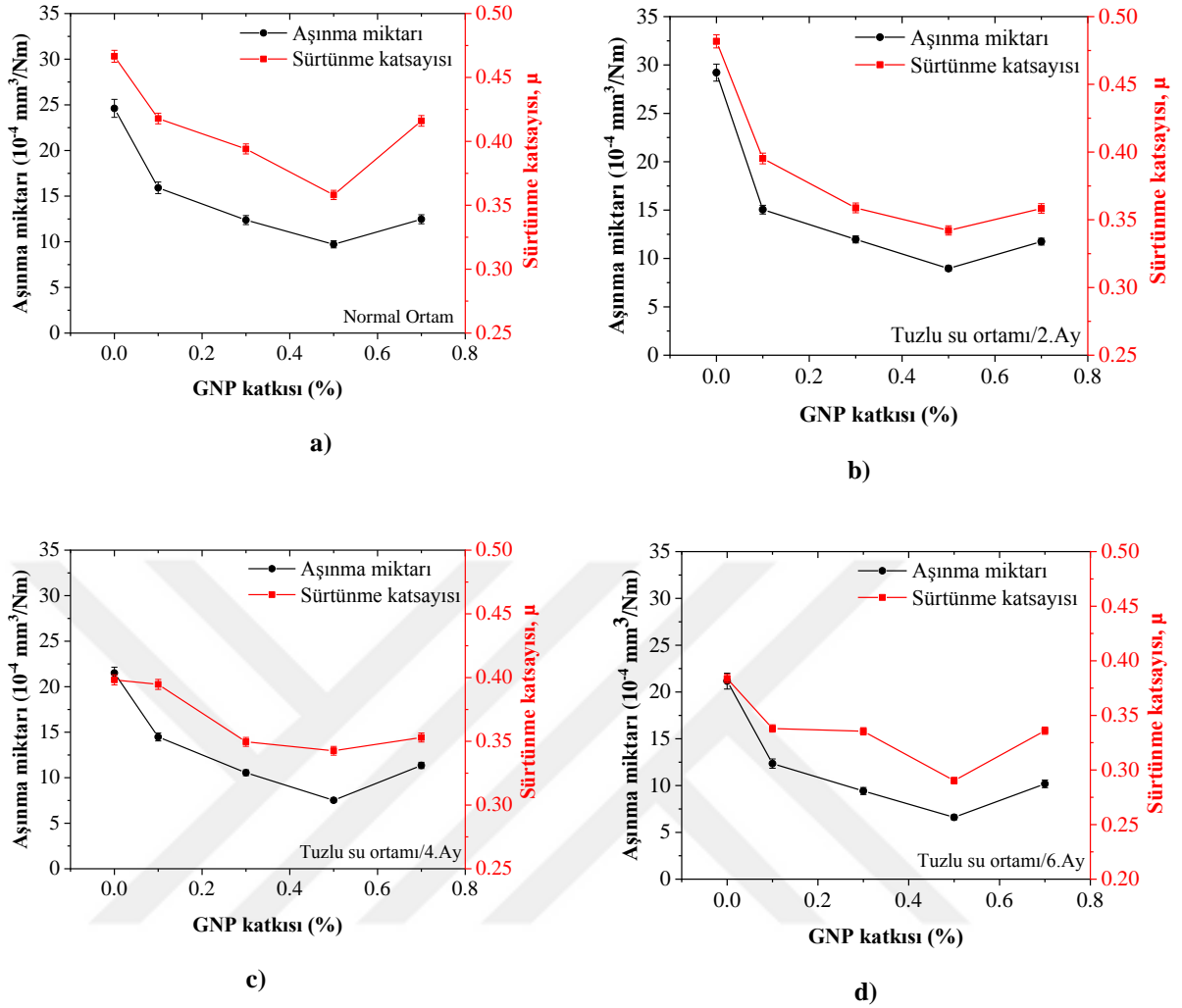


a)



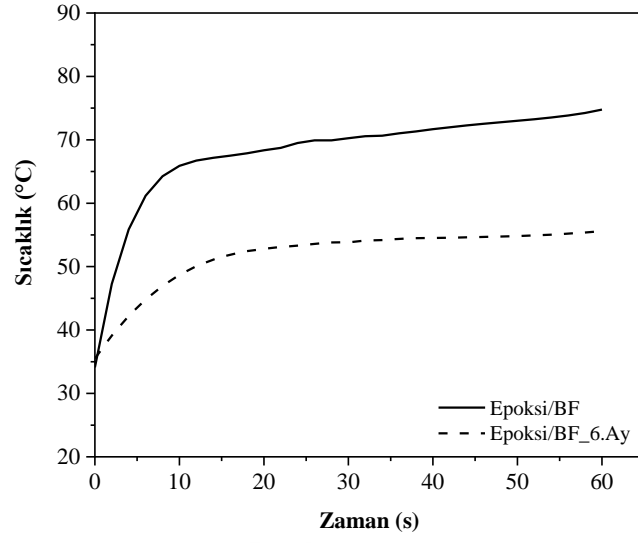
b)

Şekil 4.24. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin farklı yaşlandırma süreleri sonunda a) sürtünme katsayısı ve b) aşınma miktarlarının değişimi

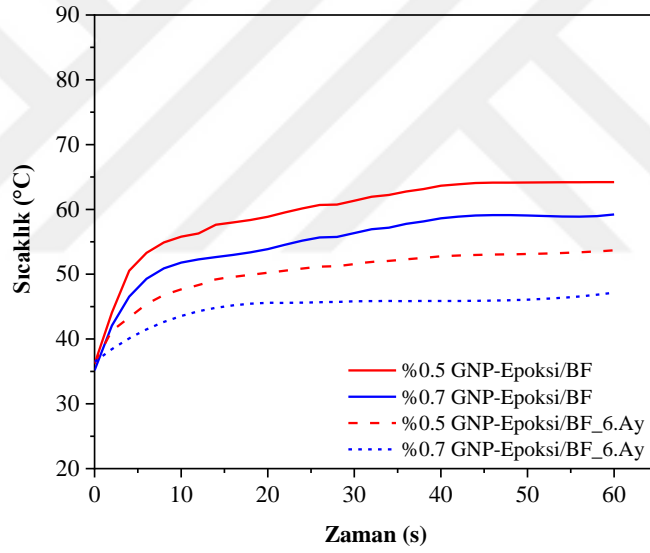


Şekil 4.25. Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarlarının artan GNP katkısıyla değişimi a) normal ortam, b) 2.ay sonu, c) 4.ay sonu ve d) 6.ay sonu

Şekil 26'da aşınma testi sırasında temas bölgesi sıcaklığının yaşlandırmaya bağlı olarak değişimi verilmiştir. 6. ayın sonunda aşınma bölgesi sıcaklık değerleri Epoksi/BF kompozit için 75 °C'den 60 °C'ye; GNP katkılı Epoksi/BF nanokompozitler için 56 °C'den 47 °C'ye düşmüştür. Normal ortam ile karşılaştırıldığında, tuzlu su maruziyetinin, aşınma testi esnasında numune ve aşındırıcı bilye arasındaki sıcaklığı azalttığı, hafif bir ısı yayılımının meydana geldiği ve bu nedenle numunede soğutmanın daha yoğun olarak devam ettiği verilen sıcaklık eğrilerinden anlaşılmaktadır (Buketov ve ark., 2016). Tuzlu suda yaşlandırılan numunelerin temas bölgelerindeki sıcaklık düşüşü, yüzeyde oluşma ihtimali yüksek olan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ve CaCO_3 gibi, sürtünme ve aşınmayı azaltıcı yönde etki eden bileşiklerin meydana getirdiği film tabakasının sıcaklık düşürücü etkilerine atfedilmiştir.



a)



b)

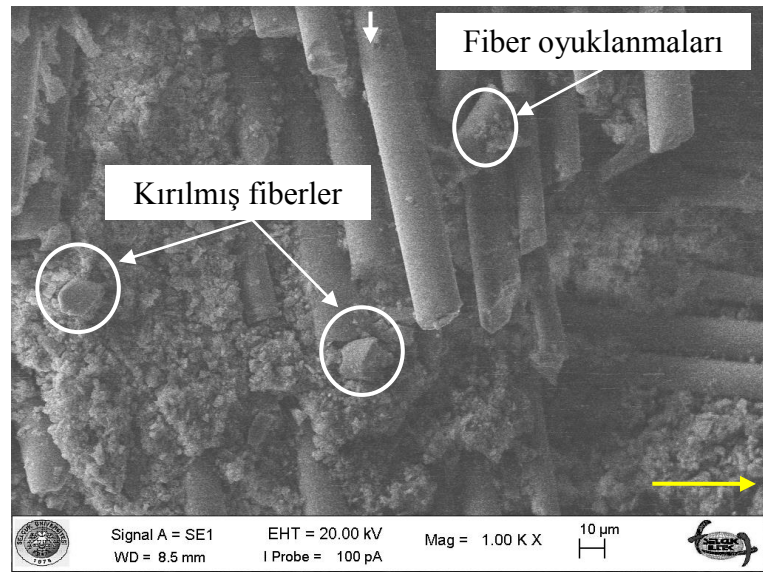
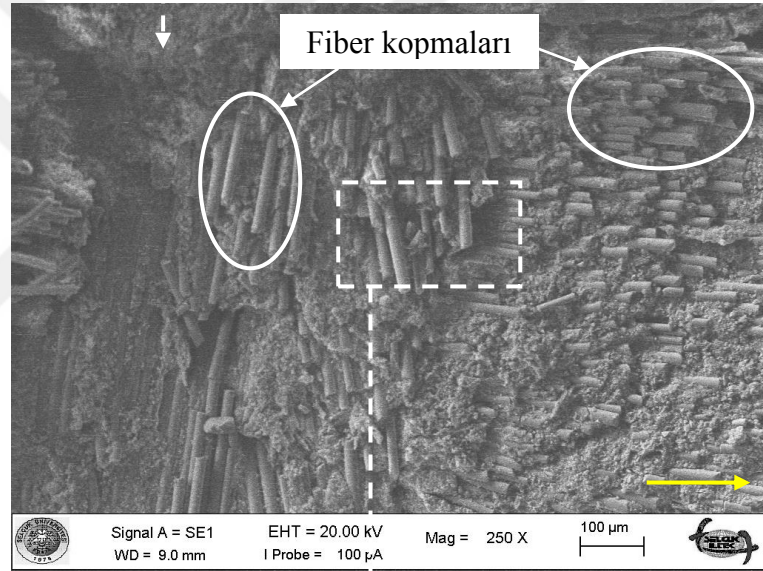
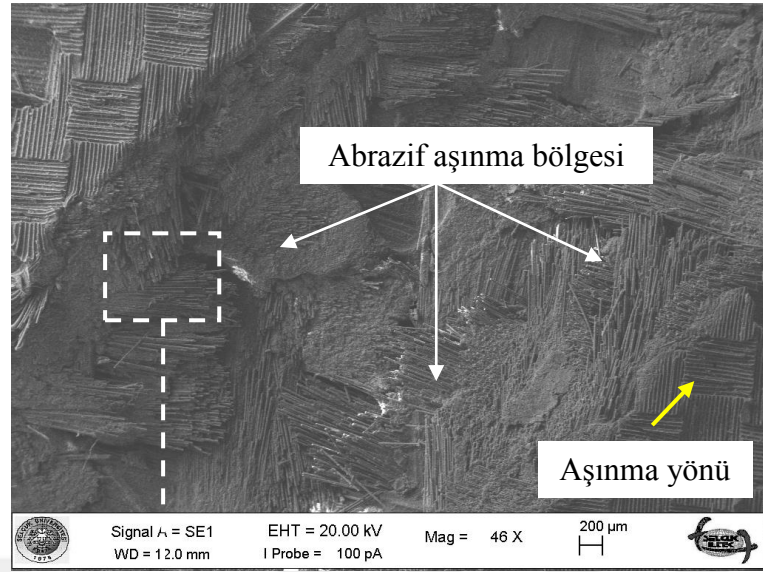
Şekil 4.26. Aşınma testi sırasında temas bölgesi sıcaklığının tuzlu su yaşlandırmasına bağlı olarak değişimi a) Epoksi/BF kompozit ve b) GNP-Epoksi/BF nanokompozitler

4.3.4. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin hasar analizleri

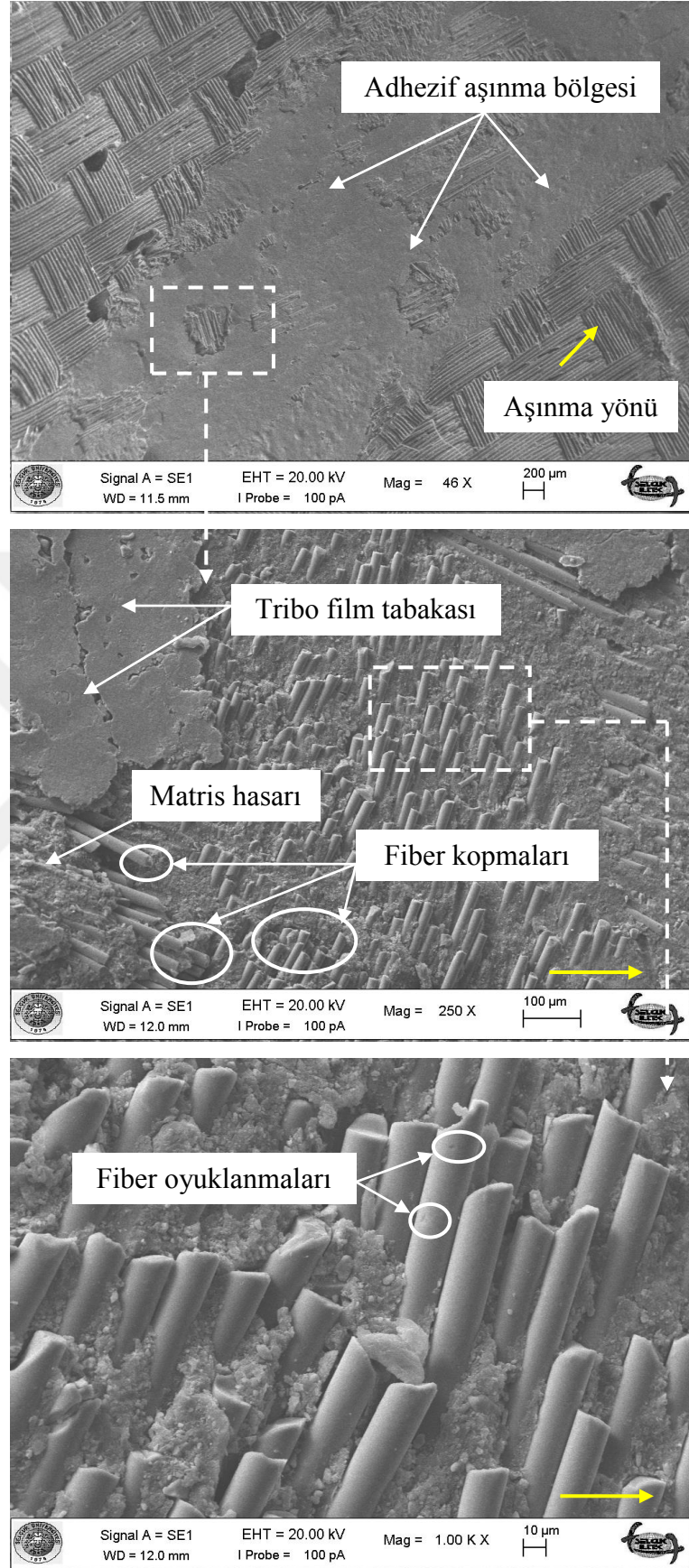
Şekil 4.27’de 6 ay tuzlu suda yaşlandırılan katkısız (a) ve %0.5 GNP katkılı (b) Epoksi/BF kompozitlerin aşınma yüzeylerine ait farklı büyütme oranlarında SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde katkısız Epoksi/BF matrisin tuzlu su maruziyetiyle GNP katkılı nanokompozitlerin matrisine kıyasla daha fazla hasara uğradığı görülmektedir. Tuzlu su matrise ufalanmış bir görüntü kazandırmıştır. Fiberler ile matris arasındaki bağlanmanın bozulduğu dikkati çekmektedir. GNP katkılı kompozitlerin fiber-matris bağlanmasının tuzlu su maruziyetiyle daha az hasara uğradığı SEM görüntülerinden açıkça söylenebilmektedir. Kompozitlerin yapısındaki bozunmanın temel sebebi kompozitlerin su alarak şişmesi, matris ve fiberlerde meydana gelen gerilmeler, fiber-matris ara yüzeyinin hasara uğraması olarak ifade edilebilir.

Üretim sırasında meydana gelen kompozit yapıdaki muhtemel boşluklar, tuzlu suda yaşlandırma esnasında su ile dolar. Boşluk içerisinde artan çözelti hacminin sınırlara uyguladığı iç basınç delaminasyonlara neden olabilir. Yapıdaki mevcut kusurlar (çatlak veya boşluklar) zamanla gelişerek su absorpsiyonunun artışına sebep olabilecek daha büyük çatlaklar, boşluklar veya su kanalları oluşturabilir (Şekil 4.28).

Şekil 4.29’daki SEM görüntülerinde tuzlu su maruziyetinin fiber ve matris üzerindeki etkileri görülmektedir. Tuzlu su çözeltisine maruz kalan bazalt fiberlerin yüzeylerinde küçük aşınmalar ve tuz birikintileri gözlenmiştir. Fiberlerdeki aşınma ve korozyon yüzeyseldir. Bazalt fiberler cam fiberlere kıyasla daha yüksek korozyon direnciyle bilinmektedir. Analiz sonuçları absorbe edilen tuzlu suyun matrisi büyük ölçüde hasara uğrattığını, fiberler üzerindeki etkisinin daha az olduğunu kanıtlamıştır. GNP katkısız kompozitlerde tuzlu su matrisi daha fazla hasara uğratmıştır. GNP’ler oluşturdukları bariyer etkisiyle matrisin daha az su absorbe etmesini sağlamış, ancak yine de absorbe edilen tuzlu su miktarı matrisi hasara uğratmak için yeterli olmuştur. Katkısız kompozitlerde matris tamamen parçalanırken, GNP katkılı kompozitlerde matris su alarak şişmiş ve derin çatlaklarla birlikte yarıklar meydana gelmiştir. Kompozitlerde ilk hasarın matriste meydana geldiği ardından fiberlere taşındığı bilinmektedir. GNP katkısız kompozitlerde matris tamamen parçalanmış, fiber yüzeylerinde oyuklar meydana gelmiştir. GNP katkısı fiberlerin korunmasında etkili olmuştur. Matriste derin çatlaklar oluşmuş, fiber yüzeylerinde ise küçük aşınma bölgeleri gözlenmiştir. Fiber yüzeylerinde görülen belirgin birikintilerin epoksi kalıntısı, tuz veya korozyon ürünü olması muhtemeldir.

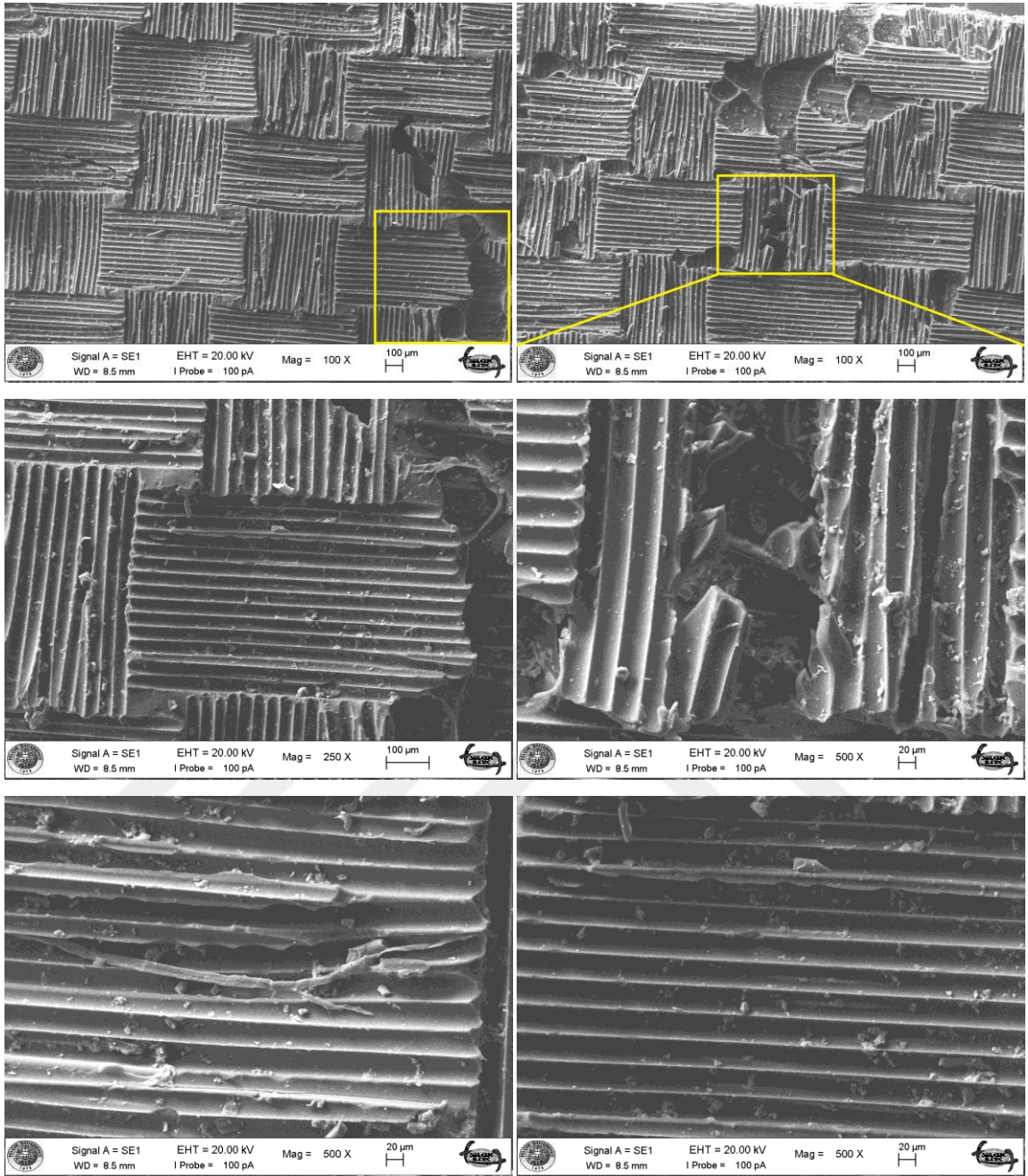


a)

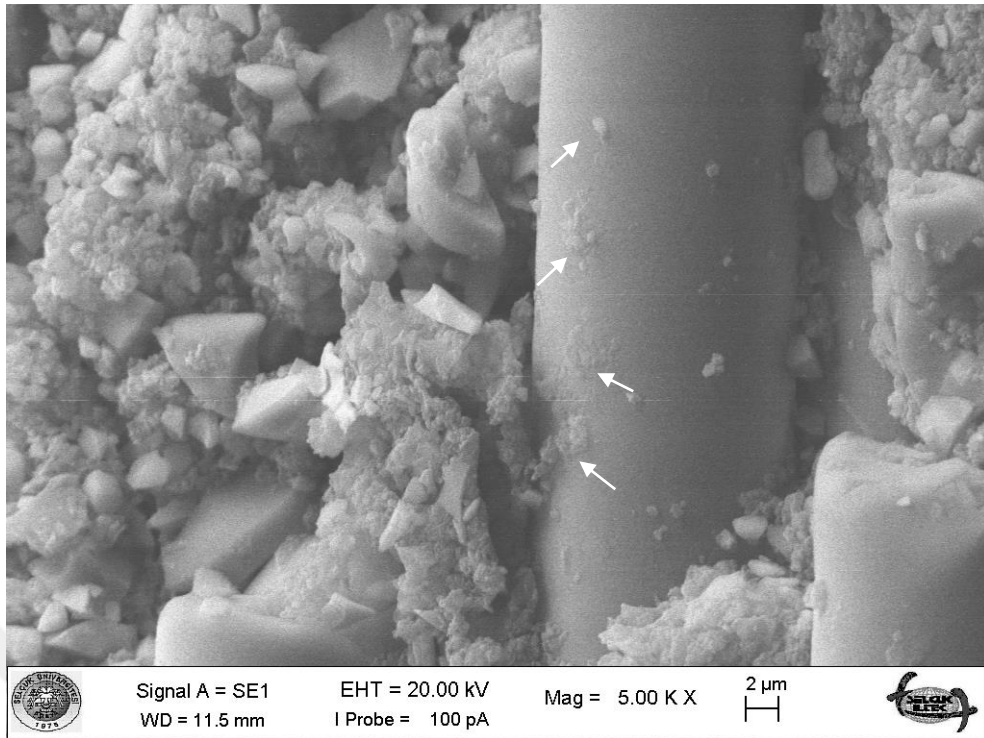


b)

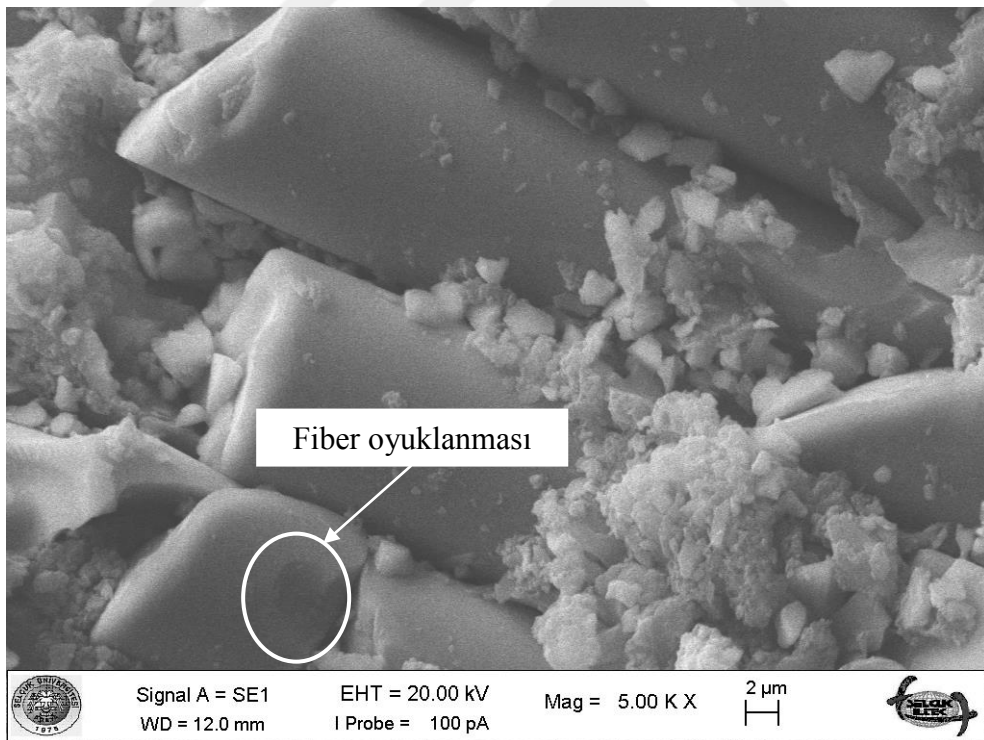
Şekil 4.27. 6 ay tuzlu suda yaşlandırılan BFRP kompozitlerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri
a) Epoksi/BF kompozitler; b) GNP-Epoksi/BF nanokompozitler



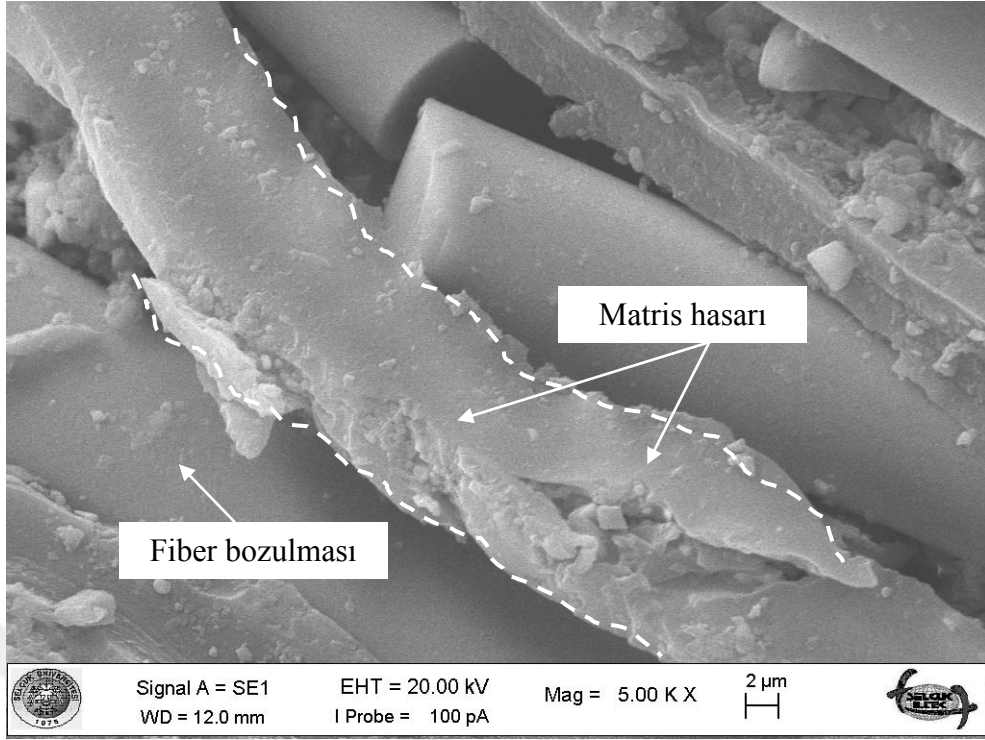
Şekil 4.28. Tuzlu suda yaşlandırmanın, BFRP kompozitlerin yüzeylerinde meydana getirdiği hasar



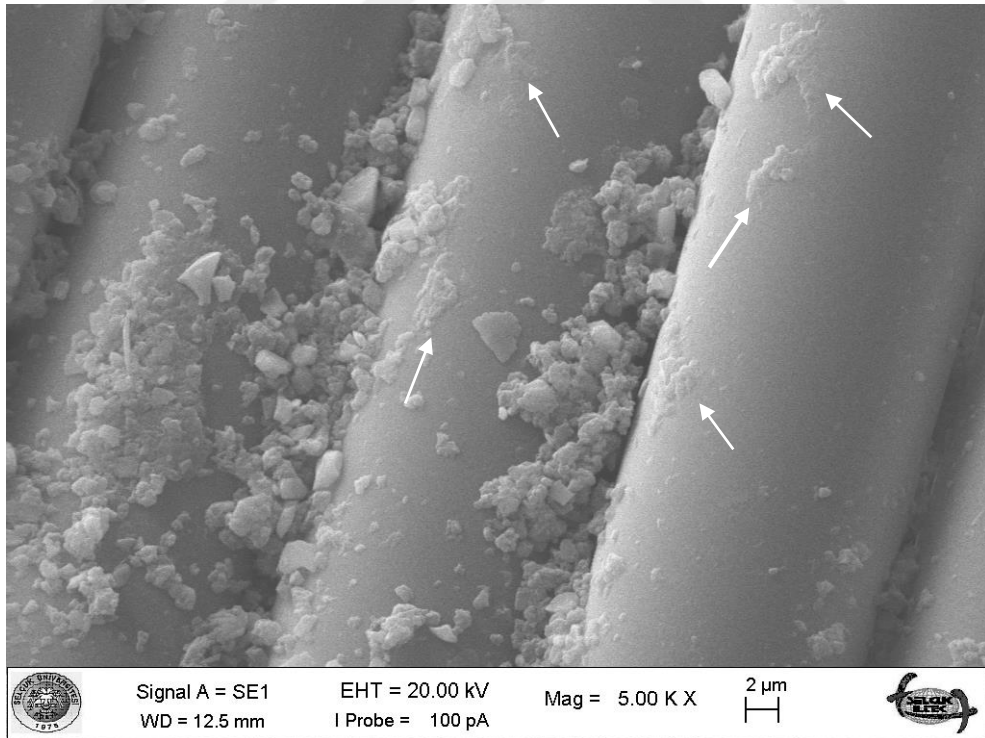
a)



b)



c)

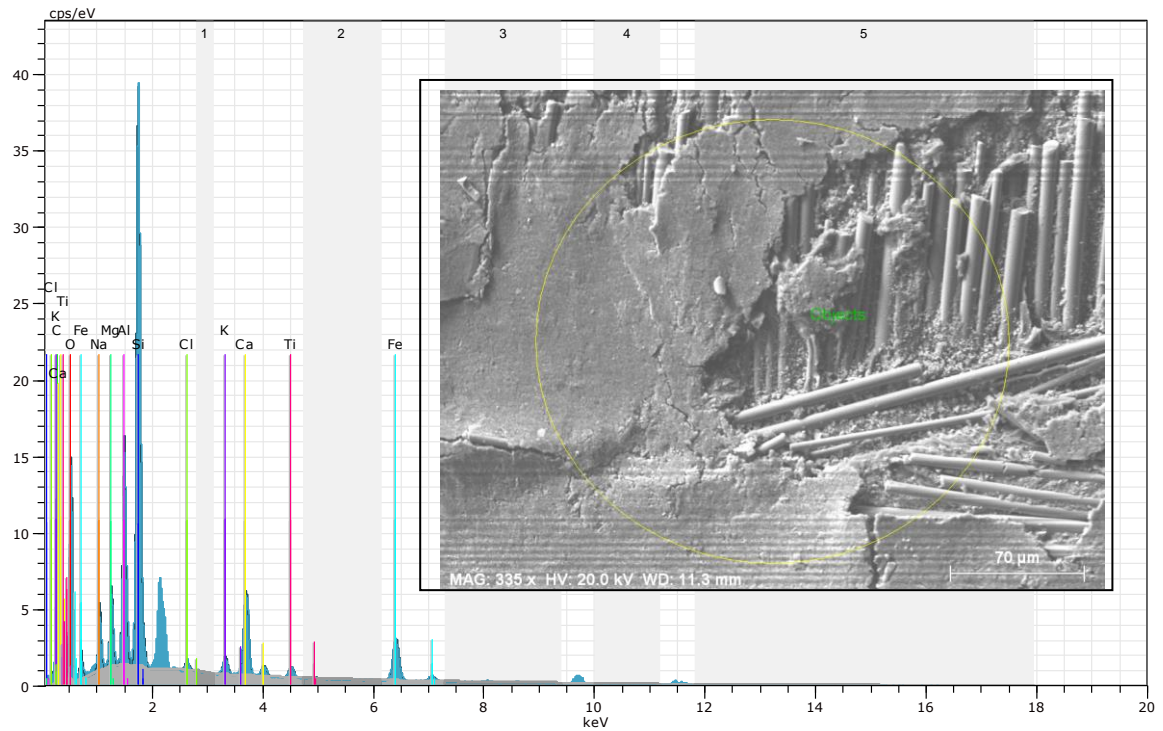


d)

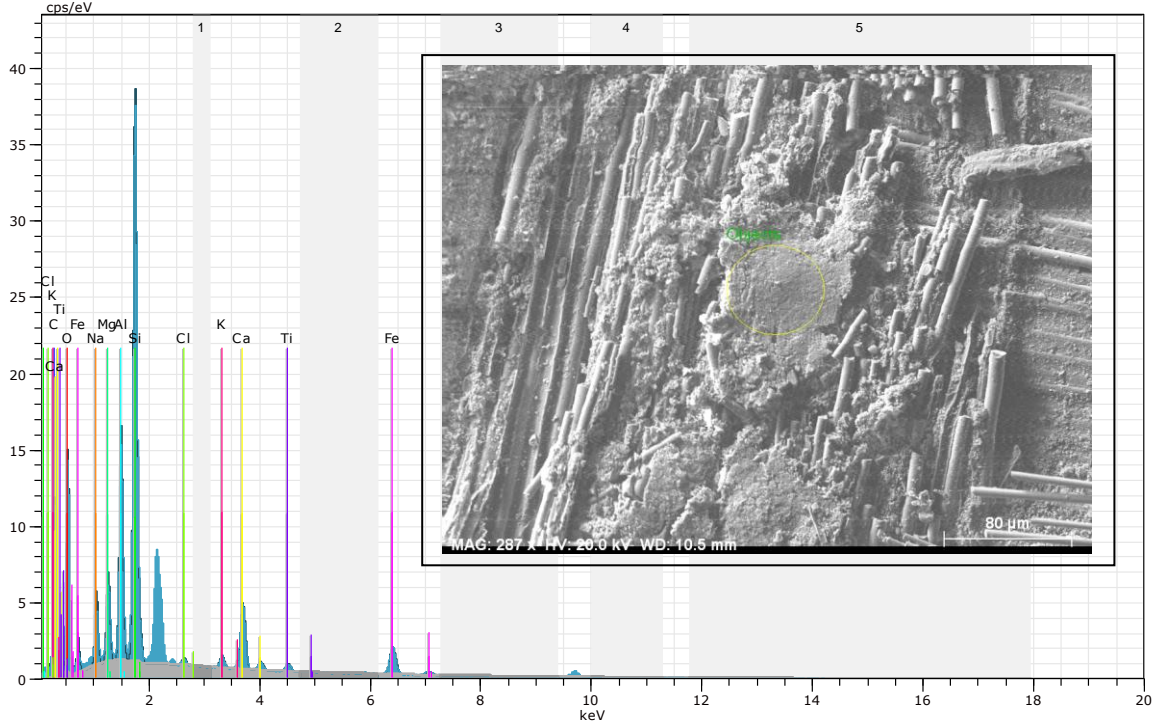
Şekil 4.29. Tuzlu suda yaşlandırmanın matris ve fiberler üzerindeki etkileri
 a), b) Epoksi/BF kompozitler; c), d) GNP-Epoksi/BF nanokompozitler

4.3.5. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin EDX analizleri

Tuzlu suda yaşlandırılan Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin aşınma sonrası yüzeyleri EDX ile incelenerek, yüzeyde bulunan elementler ve % konsantrasyonları belirlenmiştir. EDX analiz sonuçları, kompozitlerin yapısından tuzlu suya geçen iyonların yanı sıra, tuzlu suda yaşlandırılan kompozitlerin yüzeylerinde meydana gelebilecek elementer çökeltme veya bileşik oluşumlarının yorumlanmasında yardımcı olmaktadır. Şekil 4.30 ve 4.31’de sırasıyla Epoksi/BF kompozitlerin ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin yaşlandırma öncesi ve tuzlu suda yaşlandırma sonrası (6.ay) EDX analiz sonuçları verilmiştir. EDX analizlerinde, iyon değiştirme mekanizmalarını vurgulamak için, iyonların tepe noktalarının yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Pik yoğunlukları elementlerin yüzdeleri ile orantılıdır. Analiz sonuçlarında, analizin yapıldığı bölgenin SEM görüntüsü, taranan bölgedeki elementlerin pik yoğunlukları ve yaşlandırma süreleri sonundaki yüzdeleri verilmiştir.



a)



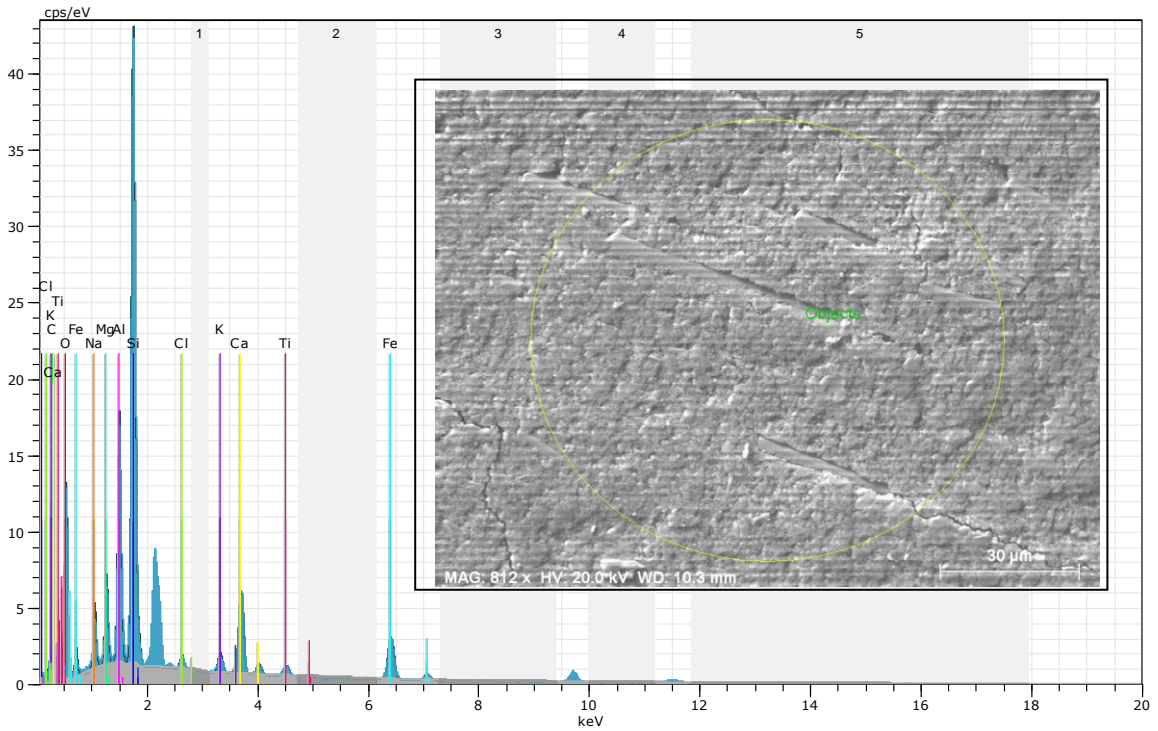
D)

Şekil 4.30. Tuzlu suda yaşlandırılan Epoksi/BF kompozitlerin EDX analizi
a) normal ortam ve b) 6.ay sonu

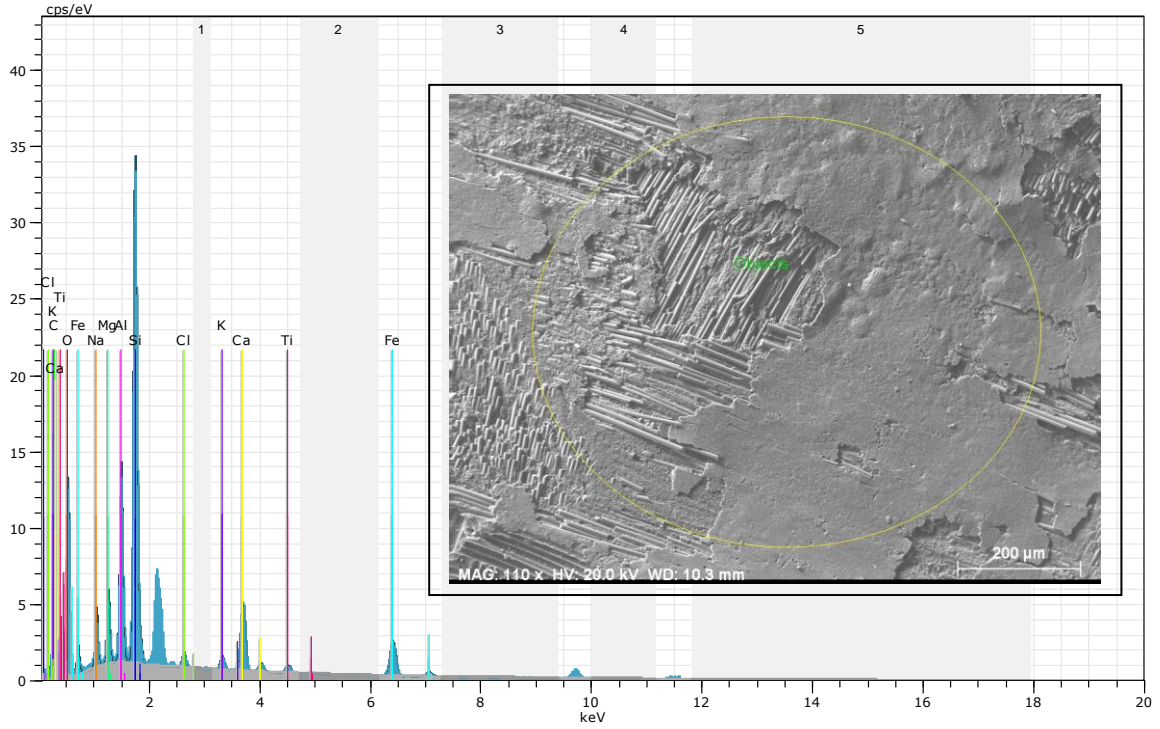
Çizelge 4.8 ve 4.9’da sırasıyla tuzlu suda yaşlandırılan Epoksi/BF kompozitlerin ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin element değişimleri % olarak verilmiştir. Bazalt fiberin yapısındaki elementlerin yaşlandırma süreleri sonunda azalma eğiliminde oldukları çizelgede görülmektedir. Kompozitlerdeki elementlerin %’leri yaşlandırma süreleri arttıkça azalmıştır. Bu azalma eğilimi yapıdaki temel elementlerin çözünerek tuzlu suya difüze olduğunu kanıtlamaktadır. Difüzyon mekanizmalarının desteklenmesinde özellikle Al, Mg, Fe ve Ca elementlerinin % değişimleri dikkate alınmaktadır. Analize göre, fiberlerin temel değiştirilebilen katyonları Si, Ca, Fe, Al, Mg, Ti iyonlarıdır (Afroz ve ark., 2017). Epoksi/BF kompozit malzemelerin yüzeyinde normal ortam şartlarında % 7.09 Al, % 3.06 Mg, % 5.63 Fe ve % 5.31 Ca tespit edilmiştir. 6. ayın sonunda Al % 5.75’e, Mg % 2.37’ye, Fe % 5.05’e ve Ca % 4.07’ye düşmüştür. Si ve Ti konsantrasyonlarının, kararlı kimyasal yapıları nedeniyle genellikle azalması beklenmez (Wei ve ark., 2011).

Çizelge 4.8. Tuzlu suda yaşlandırılan Epoksi/BF kompozitlerin element değişimi

Element	Normal Ortam		2. Ay Sonu		4. Ay Sonu		6. Ay Sonu	
	Kütle Oranı	Atom Oranı	Kütle Oranı	Atom Oranı	Kütle Oranı	Atom Oranı	Kütle Oranı	Atom Oranı
	%	%	%	%	%	%	%	%
O	47.28	56.88	46.32	53.56	43.82	49.63	44.66	49.68
C	10.36	16.60	15.43	23.77	18.93	28.56	20.26	30.02
Si	15.69	10.75	14.14	9.31	13.99	9.03	12.97	8.22
Fe	5.63	1.94	5.97	1.98	5.39	1.75	5.05	1.61
Al	7.09	5.06	6.24	4.28	6.17	4.14	5.75	3.79
Ca	5.31	2.55	4.86	2.24	4.43	2.00	4.07	1.81
Na	3.33	2.78	2.68	2.16	2.62	2.06	3.01	2.33
Mg	3.06	2.42	2.45	1.87	2.55	1.90	2.37	1.74
K	0.95	0.47	0.83	0.39	0.92	0.43	0.69	0.26
Ti	1.11	0.45	0.87	0.34	0.76	0.29	0.73	0.33
Cl	-	-	0.21	0.11	0.42	0.22	0.43	0.22



a)



b)

Şekil 4.31. Tuzlu suda yaşlandırılan GNP-Epoxy/BF nanokompozitlerin EDX analizi
a) normal ortam ve b) 6.ay sonu

Çizelge 4.9. Tuzlu suda yaşlandırılan GNP-Epoxy/BF nanokompozitlerin element değişimi

Element	Normal Ortam		2. Ay Sonu		4.Ay Sonu		6. Ay Sonu	
	Kütle Oranı %	Atom Oranı %	Kütle Oranı %	Atom Oranı %	Kütle Oranı %	Atom Oranı %	Kütle Oranı %	Atom Oranı %
O	47.42	53.16	49.41	54.45	49.76	53.93	49.69	53.09
C	17.13	25.57	18.09	26.56	19.80	28.58	21.58	30.71
Si	13.91	8.88	12.16	7.63	11.04	6.82	10.65	6.48
Fe	3.94	1.26	3.72	1.17	3.45	1.07	3.66	1.12
Al	6.36	4.23	5.79	3.78	5.27	3.39	4.85	3.08
Ca	3.72	1.66	3.73	1.64	3.55	1.54	3.36	1.44
Na	3.22	2.51	2.90	2.22	2.95	2.23	2.65	1.97
Mg	2.80	2.07	2.52	1.83	2.38	1.70	2.23	1.57
K	0.60	0.27	0.73	0.33	0.70	0.31	0.57	0.25
Ti	0.64	0.24	0.63	0.23	0.68	0.25	0.53	0.19
Cl	-	-	0.31	0.16	0.40	0.20	0.24	0.11

4.3.6. Yaşlandırılmış GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin FTIR analizleri

Katkısız ve ağırlıkça %0.7 oranında GNP içeren katkılı kompozitlerin tuzlu suda yaşlandırılmadan önce ve 6 ay tuzlu suda yaşlandırıldıktan sonra FT-IR analizleri yapılmıştır. Tuzlu suyun epoksi matris ve nanokompozitlerde kimyasal etkileşimlere neden olup olmadığı ve su absorpsiyonunun yapıdaki grupları nasıl etkilediği spektrumlar yardımıyla yorumlanmıştır.

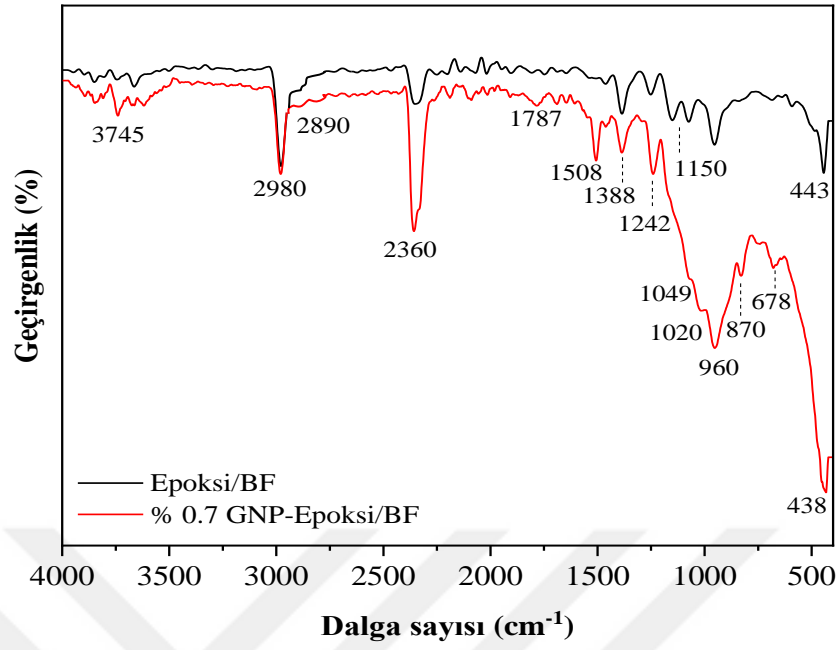
Şekil 4.32’de Epoksi/BF kompozit ve %0.7 GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerin normal ortam ve 6 ay tuzlu su ortamında yaşlandırıldıktan sonraki FT-IR spektrumları verilmiştir. FT-IR spektrumlarında $4000-1500\text{ cm}^{-1}$ arasındaki bantlar fonksiyonel bölgeyi tanımlamakta ve bu bölgede OH, C=O, N-H gibi yaygın fonksiyonel grupları temsil eden pikler görülmektedir. $1500-400\text{ cm}^{-1}$ arasındaki bölgeye parmak izi bölgesi denilmektedir. Bu bölgedeki absorpsiyon bantları, genellikle molekül içi fenomenlerden kaynaklanır ve büyük oranda maddeye özgüdür (Bergström, 2015). $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki gerilme bantları C-H gerilme titreşimine ait karakteristik CH₂ (metilen) ve CH₃ (metil) gruplarını temsil etmektedir (Iorio ve ark., 2017). $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki yoğun bantlar Al-O-Si ağının gerilme titreşimlerine atfedilmektedir. $1400-1700\text{ cm}^{-1}$ aralığında orta yoğunlukta algılanan bantlar, Me-O-H bağlarının gerilme titreşimlerine bağlanabilir, burada Me bazalt fiberin bileşenleri olan metalleri temsil eder (Rybin ve ark., 2013). $2876, 2890, 2892, 2980$ ve 2985 cm^{-1} ’deki karakteristik bantlar alifatik C-H gerilme titreşimine aittir (Alamri ve Low, 2012; Vahedi ve Pasbakhsh, 2014; Sharma ve ark., 2018). Spektrumun düşük enerji bölgesinde $1000-740\text{ cm}^{-1}$ ’de tespit edilen absorpsiyon bantları bazalt fiberlerin tipik Si-O titreşimlerine karşılık gelmektedir (Iorio ve ark., 2017). 1076 cm^{-1} ve 1032 cm^{-1} ’de görülen pikler epoksi reçine içerisindeki eter grubundaki (C-O-C), 960 cm^{-1} , 870 cm^{-1} ve 825 cm^{-1} ’de görülen pikler ise oksiran gruplarındaki (C-O-C) gerilmeleri göstermektedir (Zhao ve ark., 2016).

Su, çoğunlukla $3700-3500\text{ cm}^{-1}$ (serbest OH) ve $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ (bağlı OH) aralığında dalgalanmalarda algılanır. Kuru koşullarda amin ile muamele edilmiş epoksilerin FTIR analizlerinde $3600-3100\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığındaki geniş spektrum alkol, amin veya karboksilik asidin varlığına atfedilmektedir (Sharma ve ark., 2018). Serbest ve hidrojen bağlı hidroksil gruplarının OH gerilme titreşimleri genellikle $3400-3000\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki piklerle karakterize edilmektedir. Ancak bazı durumlarda

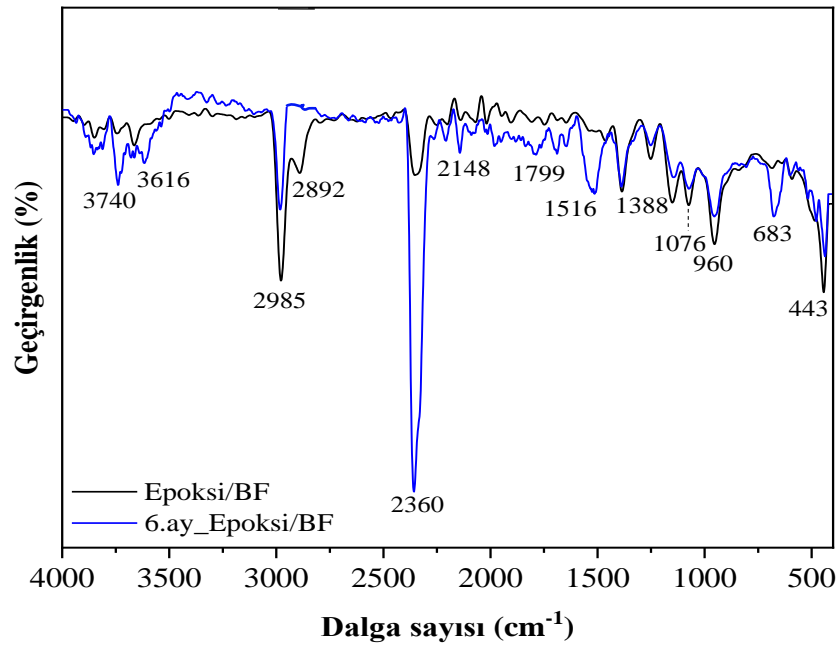
O-H gerilme bantları $3800-3200\text{ cm}^{-1}$, O-H eğilme bantları ise $1700-1600\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenebilir (Ferreira ve ark., 2019).

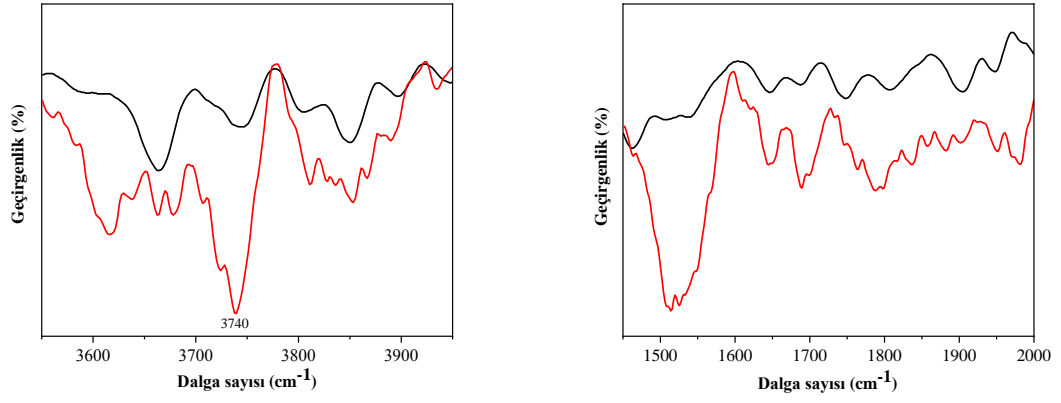
Şekil 4.32.a'daki spektrumlar değerlendirildiğinde piklerin şiddetindeki artış ve azalışın dışında, grafenin yapısından gelen bazı ilave titreşim bantları gözlenmiştir. Bunların dışında, GNP katkısıyla epoksi reçine arasında kimyasal bir etkileşim olmadığı sonucuna varılabilir. 1020 cm^{-1} ve 1049 cm^{-1} 'deki pikler GNP'lerin yüzeyindeki COOH'ın -OH bağlarının eğilme deformasyonunun bir göstergesidir (Garg ve ark., 2015). C=C ve C-C, grafenin petek yapısını oluşturur. O ve H atomları, grafenin yüzeyinde O-H, C-H ve C=O fonksiyonel grupları formunda bulunur (Jamali ve ark., 2018). $1388-1787\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki pikler yeni hidroksil ve karboksil gruplarının oluşmasından kaynaklanan C=O gerilme titreşimlerine aittir (Rodbari ve ark., 2016).

Şekil 4.32.b. ve c'de tuzlu suda yaşlandırılan kompozitlerin hidroksil gerilme titreşim pik zirvelerinde bir artış olmuştur. Bir başka ifadeyle yaşlandırmanın ardından, IR geçirgenliğinde düşüş meydana gelmiştir. Bu değişim emilen sudan kaynaklanmaktadır. Elde edilen pik yoğunluklarındaki azalma emilen su miktarı için gözlenen eğilim ile tutarlıdır. Emilen su, epoksi zincirlerindeki hidrofilik bölgelerle van der Waals ve hidrojen bağları şeklinde etkileşime girer. Etkileşimler kızılötesi radyasyonun absorpsiyonunu değiştirir ve IR emilim spektrumunu ve dolayısıyla IR geçirgenliğini etkiler. Su molekülleri OH içerir ve OH varlığı IR spektrumu pik yoğunlukları analiz edilerek izlenebilir (Sugiman ve ark., 2016). $1400-1700\text{ cm}^{-1}$ bölgelerinde bantların artması, bazalt fiber yüzeyinde metal hidroksitlerin oluşumu ile ilgilidir. Şekil 4.32.c'de $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ bölgelerinde bant yoğunluğundaki azalmanın, bazalt fiber yüzeyinde alümina silikat ağının azalması ile ilgili olduğu öne sürülebilir.

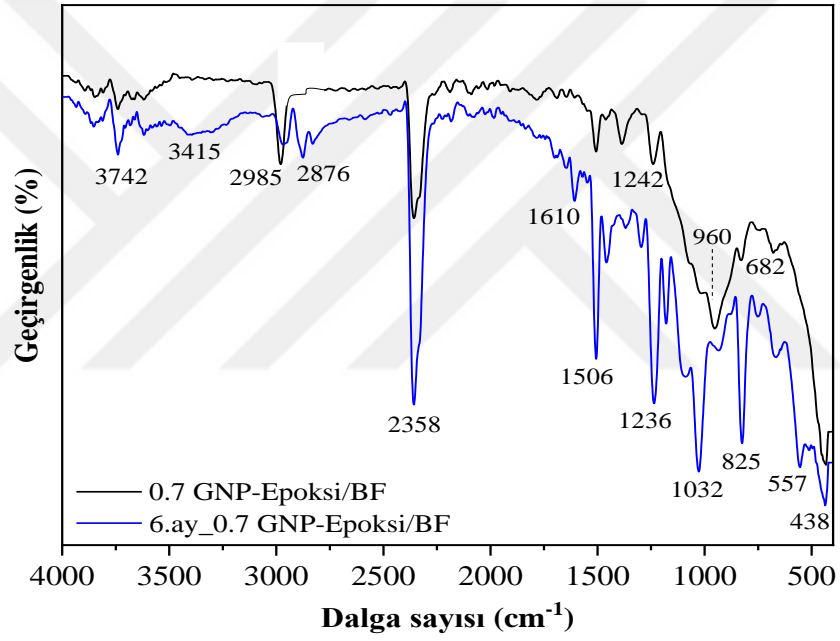


a)





b)



c)

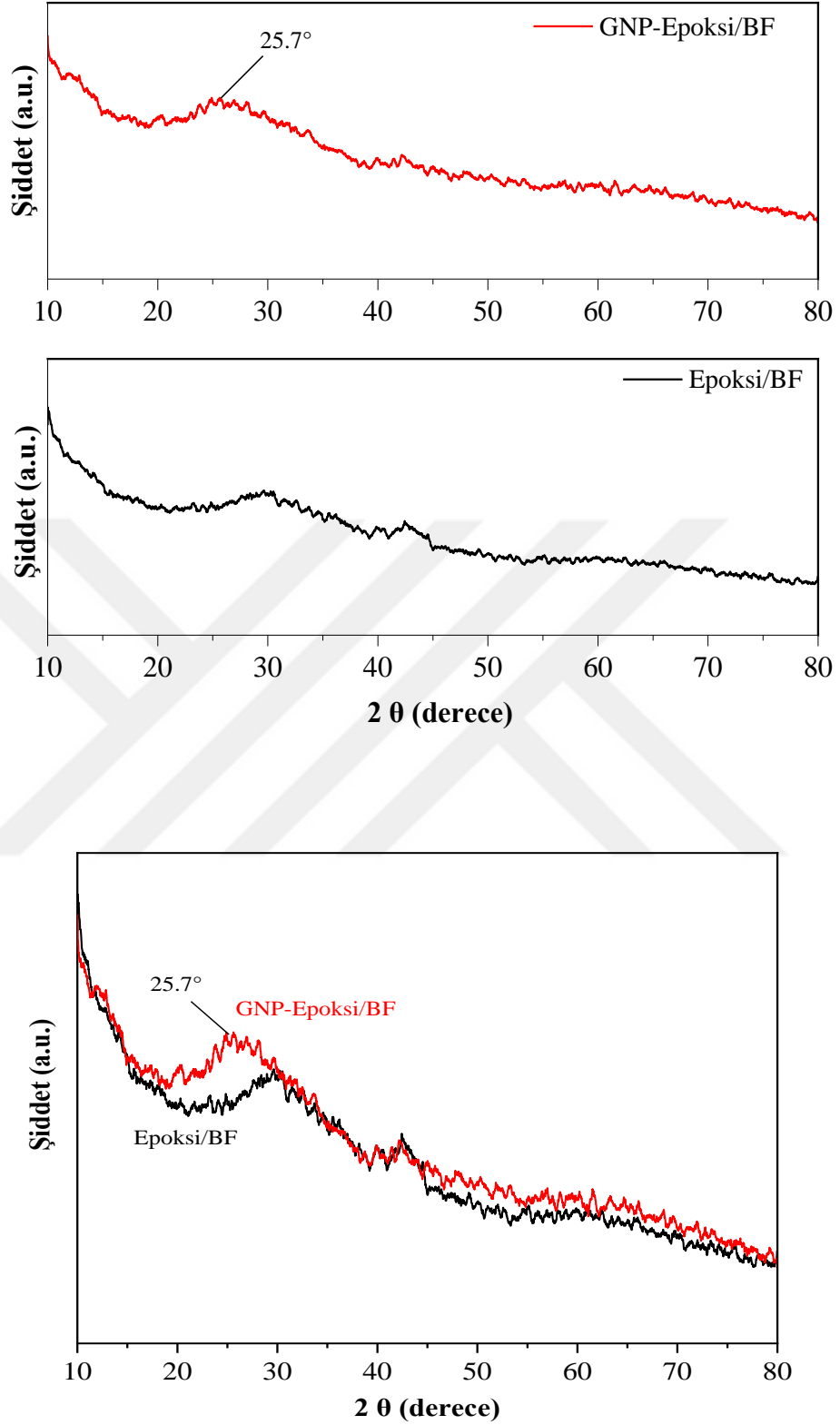
Şekil 4.32. BFRP kompozitlerin FT-IR spektrumları a) Epoksi/BF, %0.7 GNP-Epoksi/BF b) 6.ayın sonunda Epoksi/BF ve c) 6.ayın sonunda %0.7 GNP-Epoksi/BF

4.3.7. Aşınma kalıntılarının XRD analizi

Aşınma testine tabi tutulan kompozit test numunelerinin, testler sonrası oluşan aşınma kalıntıları XRD tekniği ile analiz edilmiştir. Aşınma kalıntıları analizi ile hem kompozitlerdeki amorf bileşenlerin varlığı doğrulanmış, hem de katkılı ve katkısız kompozitlerde meydana gelen aşınma mekanizmalarının benzerlikleri ve farklılıklarının yorumlanmasına katkıda bulunulmuştur.

Şekil 4.33'de aşınma testleri sırasında oluşan aşınma kalıntılarının XRD analizi sonuçları verilmiştir. GNP-Epoksi/BF nanokompozitten alınan aşınma kalıntılarının XRD paterninde $2\theta=25.7^\circ$ 'de görülen pik karbona aittir. Bu kırılma piki grafitin (002) yansımaya atfedilmektedir (Liu ve ark., 2013). Saf grafen genellikle $20^\circ-30^\circ$ arasında (Liu ve ark., 2013; Tuz Johra ve ark., 2014) belirgin karakteristik pik vermektedir. Aşınma kalıntıları içerisindeki grafinin varlığı, BFRP kompozitlerin epoksi reçinesinin GNP'lerle modifiye edildiğini de doğrulamaktadır. Epoksi/BF kompozitlere ait aşınma kalıntılarının XRD paterni literatürde saf epoksi için verilen XRD paterniyle benzerlik göstermektedir. Farklı olarak Epoksi/BF, ayrıca $2\theta > 40^\circ$ 'de kısa bir pik daha göstermiştir. Bu pik kristal olmayan çeşitli malzemelerde beklenen bir kırınımır (Jafari-Soghieh ve ark., 2019). Sonuçlar aşınmanın ekseriyetle polimer matriste meydana geldiğini destekler niteliktedir.

Aşınma kalıntılarının analizinden elde edilen XRD patterneleri incelendiğinde, mevcut pikler Epoksi/BF kompozit ve GNP-Epoksi/BF nanokompozitlerde herhangi bir oksitlenme, sıcaklığın etkisiyle epoksi matriste herhangi bir erime veya bozunma meydana gelmediğini, aşınmanın malzeme yüzeylerinden tamamen mekanik etkilerle parçacıkların koparılmasıyla suretiyle gerçekleştiğini desteklemektedir.



Şekil 4.33. BFRP kompozitlerin aşınma kalıntılarının XRD analiz sonuçları

4.3.8. Tuzlu suyun atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS) ölçümleri

Tuzlu suda yaşlandırılan kompozit numunelerin içerisinde bekletildiği tuzlu su çözeltileri 3.ay ve 6.ayların sonunda atomik absorpsiyon spektroskopisi ile analiz edilmiştir. AAS ölçümleri ile yaşlandırma süresince bazalt fiberlerin yapısından çözünen elementlerin tuzlu suya difüze olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Başlangıçta sadece Na ve Cl içeren tuzlu su çözeltisinde, 3. Ayın sonunda Mg, Al, Ca, Fe ve Na iyonları, 6.ayın sonunda bunlara ilave olarak K ve Ti iyonlarının varlığı tespit edilmiştir. EDS analizleriyle kompozitlerin yapısında mevcut bulunan, bazalt fiberlere ait bu elementlerin, tuzlu suda yaşlandırma süresince çözünerek difüze oldukları ölçüm sonuçlarıyla desteklenmiştir. Bahsedilen elementlerden bazılarının kompozitlerin yüzeyinde hidratlı bileşik oluşturma eğiliminde olduğu bilinmektedir. Kompozitlerin yüzeylerinde oluşan hidrat tabakası sürtünmeyi azaltarak aşınma miktarını düşürmüş ve aşınma testleri sırasında temas bölgesi sıcaklığının düşürülmesinde de etkili olmuştur.

Çizelge 4.10. Atomik absorpsiyon spektroskopisi ölçüm sonuçları

g/L	Mg	Al	Ca	K	Fe	Ti	Na
3.ay	2	3.6	2.4	0	8.2	0	9.9
6.ay	3.8	9.1	6.8	0.1	9.5	0.2	10.5

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Polimer matrisli kompozitlerin farklı nano takviyelerle modifiye edilerek çekme, eğilme ve darbe dayanımlarının geliştirilmesi, sürtünme katsayılarının düşürülerek aşınma performanslarının artırılması güncel olarak araştırılmaya devam eden bir konudur. Literatürde kendinden, mucize materyal olarak söz edilen grafen nanopartiküllerin polimerlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmesinin yanı sıra, özelliklerde kayba neden olabilen su absorpsiyonunu önemli ölçüde azalttığı bilinmektedir. Bu çalışmada epoksi matrisi ağırlıkça farklı oranlarda GNP'lerle modifiye edilen bazalt fiber takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları ve aşınma dirençleri incelenmiştir. GNP'ler epoksi matris içerisine %0.1, 0.3, 0.5 ve 0.7 oranlarında takviye edilmiştir. Artan yükün kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bazalt fiber yüksek korozyon direnciyle bilinen mineral kaynaklı doğal fiberlerden biridir. Çalışmada ayrıca bazalt fiber takviyeli kompozitler yüksek tuz konsantrasyonuna sahip tuzlu su ortamında 6 ay yaşlandırıldıktan sonra, 2., 4. ve 6. ayların sonunda özelliklerdeki düşüş ve artışlar değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasından aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Epoksi matris içerisine yapılan ağırlıkça %0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 takviyesinde, bütün katkı oranlarında saf epoksiye kıyasla sürtünme katsayısı ve aşınma miktarlarında belirgin düşüşler gerçekleşmiştir. GNP ile modifiye edilmiş epoksi matris en yüksek kararlı sürtünme katsayısı davranışını %0.3 ve %0.4 katkı oranlarında sergilemiştir. Sürtünme katsayısı değeri belirli bir süre artış ve dalgalanma gösterdikten sonra yaklaşık 0,17'de sabit kalmıştır. GNP katkısı sürtünme katsayısı değerlerinde % 13 ile % 43 arasında değişen düşüşler sağlamıştır. GNP içeriği ağırlıkça %0.1'den %0.4'e yükseltildiğinde, sürtünme katsayısı saf epoksiye kıyasla neredeyse 12 kat azalmış ve sabit bir değere yaklaşmıştır. Bu davranış grafen tarafından sağlanan yağlayıcılık, geliştirilmiş ısıl iletkenlik ve atomik bağlanma temel alınarak açıklanmıştır. GNP içeriği arttıkça, epoksi termal iletkenliği de artmış bu da arayüz sıcaklığını düşürmüştür.

- Ağırlıkça %0.1'den 0.5'e kadar değişen katkı oranlarında epoksi matrisin sertlik değerleri % 2.5-6.25 arasında artış göstermiştir. GNP takviyesi GNP-epoksi matris arasındaki yapışma kuvvetini etkili bir şekilde arttırmıştır. Bu artış GNP'lerin epoksi matrisinde iyi dağılmasına, epoksi matrisinde homojen ve kademeli dağılımı ile üç boyutlu bir ağın oluşmasına, üstün mekanik özelliklerine ve sahip oldukları yüksek yüzey hacim oranına atfedilmiştir.
- GNP'ler matris içerisine sadece %0,1 gibi oldukça düşük bir oranda takviye edildiğinde dahi saf epoksinin aşınma miktarını 21.82×10^{-5} mm³/Nm'den, 6.1×10^{-5} mm³/Nm'ye düşürerek yaklaşık % 70'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Aşınma performansında meydana gelen iyileşme; GNP'lerin yapısı (buruşuk yüzey yapısı sayesinde GNP-Epoksi arasında güçlü yapışma ve kenetlenme sağlaması, yapısındaki OH, karboksil/epoksi grupları, GNP'lerin iki boyutlu düzlemsel geometrisi), sahip olduğu üstün özellikler (yüksek spesifik yüzey alanı (2630 m²/g), gelişmiş camsı geçiş sıcaklığı) ve sağladığı katı yağlayıcılık ile ifade edilmiştir.
- %0.5 GNP katkısı Epoksi/BF kompozitlerin çekme mukavemetinde yaklaşık % 43, % uzama değerinde % 11 ve elastisite modülünde % 74.5'luk bir artış sağlamıştır. Sertlik ve elastisite değerlerinde meydana gelen artış, ikincil sert bir fazın (GNP) saf epoksiye dahil edilmesiyle açıklanmıştır. Epoksi matris içerisinde homojen olarak dağıtılan GNP'ler, büyüyen çatlakları köprüleyerek çatlak yayılımını engellemektedir.
- Tuzlu suda yaşlandırılan epoksi/BF kompozitlerin çekme mukavemetleri 2., 4. ve 6. ayların sonunda % 17.6, % 30.8 ve % 40.4 azalış, % uzama değerleri % 44, % 55.5 ve % 67 artış, elastisite modülleri ise % 26.1, % 31.1 ve % 42.7 oranlarında azalış göstermiştir. Bu belirgin düşüşlerin temel nedeni tuzlu suyun kompozit içerisine difüzyonu ve absorbe edilen tuzlu suyun fiber matris ara yüzüne etki ederek bağlanmayı zayıflatmasıdır.
- GNP takviyesi TGA analizlerde BF kompozitlerin toplam kütle kaybını % 16 oranında azaltmıştır.
- Epoksi içerisine dahil edilen ikinci sert bir faz olan GNP katkısı Epoksi/BF kompozitlerin sertlik değerlerinde yaklaşık % 3 ile % 8 arasında artış sağlamıştır.

- %0.5 GNP katkısı bazalt kompozitlerin sürtünme katsayısını % 23 azaltmıştır. Sürtünme katsayısı bakımından en iyi gelişme %0.5 GNP katkılı kompozitlerde sağlanmıştır.
- 10 N ve 15 N yükler altında, katkısız ve %0.5 GNP katkılı Epoksi/BF kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla; 0.47, 0.39 ve 0.36, 0.31'dir. Artan yükte birlikte Epoksi/BF kompozitin sürtünme katsayısı % 17 azalırken, %0.5 GNP katkılı Epoksi/BF kompozitlerde % 14'lük bir azalma meydana gelmiştir.
- %0.5 GNP katkısı, katkısız Epoksi/BF kompozitlerle kıyaslandığında, kompozitlerin 10 N ve 15N yükler altındaki aşınma miktarlarında ortalama % 60'lık bir azalma sağlayarak, tribolojik performanslarını arttırmıştır. Katı yağlayıcı etkisi olan GNP'ler makaslama (kırılma, kopma) etkisini azaltmış ve kayma sırasında temas bölgesindeki matris malzemenin sarılarak sürtünmenin azaltulmasını sağlamıştır.
- %0.7 katkısında diğer katkı oranlarına kıyasla değerler artmış olsa da, Epoksi/BF kompozitlerle kıyaslandığında 10 N ve 15 N yükler için sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı değerlerinde sırasıyla ortalama % 13 ve % 50'lik düşüş sağlanmıştır. %0.5 katkı oranıyla kıyaslandığında %0.7 katkı oranındaki artışın nedeni, nanopartiküllerin miktarı arttıkça artan aglomerasyonlarla açıklanmıştır. Aglomerasyonlar matris ve nano partiküller arasındaki arayüz zayıflatmış, bu etki SEM görüntüleriyle desteklenmiştir.
- Tuzlu suda yaşlandırılan Epoksi/BF kompozitin sürtünme katsayısı 2, 4 ve 6. ayların sonunda sırasıyla % 4.2, % 15 ve % 19 azalmıştır.
- 6.ayın sonunda Epoksi/BF numunelerin aşınma miktarı % 14, %0.5 GNP katkılı Epoksi/BF kompozitlerin aşınma miktarı ise % 32 azalmıştır. Tuzlu suda yaşlandırılan numunelerin yüzeylerinde oluşan bileşikler yağlayıcı film görevi görerek sürtünme katsayısını ve buna paralel olarak aşınma miktarını düşürmede etkili olmuştur.
- Tuzlu suda yaşlandırma, 6.ayın sonunda aşınma bölgesi sıcaklık değerlerini Epoksi/BF kompozitte % 20, GNP katkılı Epoksi/BF nanokompozitlerde % 16 düşürmüştür. Tuzlu su ortamında bekletilen numunelerin temas bölgelerindeki sıcaklık düşüşü, yüzeyde aşınmayı azaltıcı yönde etki eden bileşiklerin meydana getirdiği film tabakası ile açıklanmış, yüzeyde yağlayıcı film oluşumu SEM görüntüleriyle desteklenmiştir.

- Tuzlu suda yaşlandırılan kompozitlerin FTIR spektrumlarında gözlenen küçük OH pikleri, tuzlu suyun epoksi matrisin kimyasal bağ yapısına etki ettiğini göstermiştir.

5.2 Öneriler

Yapılan bu tez çalışmasında GNP'ler ile modifiye edilen epoksi matrisin bazalt fiberler iyi bir uyum yakaladığı ortaya konmuştur. Ancak ne var ki yüksek katkı oranlarında meydana gelen aglomerasyonlar özelliklerde düşüşe neden olmaktadır. GNP'lerin farklı kimyasallarla modifiye edilerek polimer matrisler içerisinde daha yüksek katkı oranlarında homojen dispersiyonu sağlanabilir. Bazalt fiberler cam ve karbon gibi fiberlerle birlikte kullanılarak hibrit nanokompozitlerin farklı özellikleri incelenebilir. Tuzlu suda yapılan yaşlandırma oda sıcaklığından farklı sıcaklıklarda yapılarak kompozitler üzerinde korozif termal yaşlandırma etkileri araştırılabilir. Tuzlu suyun haricinde asidik ve bazik gibi farklı ve daha kuvvetli korozif ortam şartlarının etkileri incelenebilir. Doğal bir mineral fiber olarak bilinen ve toksik etkileri olmayan bazalt fiberler, doğal reçinelere takviye edilerek, sağlığa zararı olmayan biyobozunur doğal kompozitler üzerine araştırmalar geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdelkader, A. F. ve White, J. R., 2005, Water absorption in epoxy resins: The effects of the crosslinking agent and curing temperature, *Journal of Applied Polymer Science*, 98 (6), 2544-2549.
- Abdullah, S. ve Ansari, M. N. M., 2014, Mechanical properties of graphene oxide (GO)/epoxy composites, p. 151-156.
- Afroz, M., Patnaikuni, I. ve Venkatesan, S., 2017, Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium, p. 191-203.
- Akçin, Y., Asi, O. ve Yeşil, Ö., 2013, Kompozit Malzemelerin Kaplanabilirliğinin İncelenmesi, *Investigation Of Coating Capability Of Composite Materials*, 19 (7), 319-322.
- Akinci, A., Yılmaz, S. ve Sen, U., 2012, Wear Behavior of Basalt Filled Low Density Polyethylene Composites, *Applied Composite Materials*, 19 (3), 499-511.
- Alamri, H. ve Low, I. M., 2012, Effect of water absorption on the mechanical properties of nano-filler reinforced epoxy nanocomposites, *Materials & Design*, 42, 214-222.
- Altın Karataş, M. ve Gökkaya, H., 2018, A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials, *Defence Technology*, 14 (4), 318-326.
- Andrić, L., Aćimović-Pavlović, Z., Trumić, M., Prstić, A. ve Tanasković, Z., 2012, Specific characteristics of coating glazes based on basalt, *Materials & Design*, 39, 9-13.
- Anonim, 2013, <https://chemistry.oregonstate.edu/courses/ch361-464/ch362/irinstrs.htm>: [10.06.2019]
- Anonim, 2019, https://www.wikiwand.com/en/Atomic_absorption_spectroscopy: [10.06.2019]
- Ary Subagia, I. D. G., Tijjing, L. D., Kim, Y., Kim, C. S., Vista Iv, F. P. ve Shon, H. K., 2014, Mechanical performance of multiscale basalt fiber–epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles, *Composites Part B: Engineering*, 58, 611-617.
- Assarar, M., Scida, D., El Mahi, A., Poilâne, C. ve Ayad, R., 2011, Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax–fibres and glass–fibres, *Materials & Design*, 32 (2), 788-795.
- Atta, N. F., Galal, A. ve El-Ads, E. H., 2015, Graphene — A Platform for Sensor and Biosensor Applications, In: *Biosensors - Micro and Nanoscale Applications*, Eds, p.

- Ayatollahi, M. R., Alishahi, E., Doagou-R, S. ve Shadlou, S., 2012, Tribological and mechanical properties of low content nanodiamond/epoxy nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, 43 (8), 3425-3430.
- Bahadur, S., 2000, The development of transfer layers and their role in polymer tribology, *Wear*, 245 (1), 92-99.
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F. ve Lau, C. N., 2008, Superior thermal conductivity of single-layer graphene, *Nano letters*, 8 (3), 902-907.
- Barari, B., Ellingham, T. K., Qamhia, I., Pillai, K. M., El-Hajjar, R., Turng, L.-S. ve Sabo, R., 2016, Mechanical characterization of scalable cellulose nano-fiber based composites made using liquid composite molding process, *Composites Part B: Engineering*, 84, 277-284.
- Baştürk, S., Uyanık, H. ve Kazancı, Z., 2014, An analytical model for predicting the deflection of laminated basalt composite plates under dynamic loads, *Composite Structures*, 116, 273-285.
- Benzarti, K. ve Colin, X., 2013, 12 - Understanding the durability of advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications, In: *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, Eds: Bai, J.: Woodhead Publishing, p. 361-439.
- Bergström, J., 2015, 2 - Experimental Characterization Techniques, In: *Mechanics of Solid Polymers*, Eds: Bergström, J.: William Andrew Publishing, p. 19-114.
- Bhuyan, M. S. A., Uddin, M. N., Islam, M. M., Bipasha, F. A. ve Hossain, S. S., 2016, Synthesis of graphene, *International Nano Letters*, 6 (2), 65-83.
- Brydson, J. A., 1999, 26 - Epoxide Resins, In: *Plastics Materials (Seventh Edition)*, Eds: Brydson, J. A., *Oxford: Butterworth-Heinemann*, p. 744-777.
- Buketov, A., Maruschak, P., Brailo, M., V. Akimov, A., S. Kobelnik, O. ve Panin, S., 2016, Tribological properties of epoxy composite materials for marine and river transport, p.
- Bulut, M., 2017, Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets, *Composites Part B: Engineering*, 122, 71-78.
- Burris, D. L., Boesl, B., Bourne, G. ve Gregory Sawyer, W., 2007, Polymeric Nanocomposites for Tribological Applications, p. 387-402.
- Camargo, P. H. C., Satyanarayana, K. G. ve Wypych, F., 2009, Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities, *Materials Research*, 12, 1-39.
- Campbell, F. C., 2004a, Chapter 3 - Thermoset Resins: The Glue That Holds the Strings Together, In: *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Eds: Campbell, F. C., *Amsterdam: Elsevier Science*, p. 63-101.

- Campbell, F. C., 2004b, Chapter 10 - Thermoplastic Composites: An Unfulfilled Promise, In: Manufacturing Processes for Advanced Composites, Eds: Campbell, F. C., *Amsterdam: Elsevier Science*, p. 357-397.
- Chairman, C. A. ve Kumaresh Babu, S. P., 2013, Mechanical and abrasive wear behavior of glass and basalt fabric-reinforced epoxy composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 130 (1), 120-130.
- Chang, L. ve Zhang, Z., 2006, Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO₂, *Wear*, 260 (7), 869-878.
- Chen, W., Shen, H., Auad, M. L., Huang, C. ve Nutt, S., 2009, Basalt fiber–epoxy laminates with functionalized multi-walled carbon nanotubes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40 (8), 1082-1089.
- Chenghong, H., Yubin, L., Zuoguang, Z. ve Zhijie, S., 2008, Impact Damage Modes and Residual Flexural Properties of Composites Beam, p. 1163-1175.
- Choudalakis, G. ve Gotsis, A., 2009, Permeability of polymer/clay nanocomposites: a review, *European Polymer Journal*, 45 (4), 967-984.
- Colombo, C., Vergani, L. ve Burman, M., 2012, Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites, *Composite Structures*, 94 (3), 1165-1174.
- Czigány, T., Pölöskei, K. ve Karger-Kocsis, J., 2005, Fracture and failure behavior of basalt fiber mat-reinforced vinylester/epoxy hybrid resins as a function of resin composition and fiber surface treatment, p. 5609-5618.
- Çelik Bedeloğlu, A. ve Taş, M., 2016, Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri (Graphene And Its Production Methods), p. 544-554.
- Daloia, D., 2014, Friction and Wear Behavior of Graphene Reinforced Epoxy Master of Science in Materials Engineering, *University of Dayton*, Dayton, Ohio
- Daniel Gay, S. V. H., Stephen W. Tsai, 2002, Composite Materials: Design and Applications, CRC Press p.
- Daood, S. S., Ord, G., Wilkinson, T. ve Nimmo, W., 2014, Fuel additive technology – NO_x reduction, combustion efficiency and fly ash improvement for coal fired power stations, *Fuel*, 134, 293-306.
- Davies, P. ve Verbouwe, W., 2017, Evaluation of Basalt Fibre Composites for Marine Applications, p.
- Deák, T. ve Czigány, T., 2009, Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison, *Textile Research Journal*, 79 (7), 645-651.

- Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S.-J. ve Hui, D., 2015, A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180.
- Dixit, D., Pal, R., Kapoor, G. ve Stabenau, M., 2016, 6 - Lightweight composite materials processing, In: *Lightweight Ballistic Composites (Second Edition)*, Eds: Bhatnagar, A.: Woodhead Publishing, p. 157-216.
- Dorigato, A. ve Pegoretti, A., 2012, Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates, p. 1773-1785.
- Du, X., Zhou, H., Sun, W., Liu, H. Y., Zhou, G., Zhou, H. ve Mai, Y. W., 2017, Graphene/epoxy interleaves for delamination toughening and monitoring of crack damage in carbon fibre/epoxy composite laminates, *Composites Science and Technology*, 140, 123-133.
- Ekrem, M., Duzcukoglu, H., Şenyurt, M., Sinan Sahin, Ö. ve Avcı, A., 2017, Friction and Wear Performance of Epoxy Resin Reinforced With Boron Nitride Nanoplatelets, 140.
- Ferreira, F. V., Franceschi, W., Menezes, B. R. C., Biagioni, A. F., Coutinho, A. R. ve Cividanes, L. S., 2019, Chapter One - Synthesis, Characterization, and Applications of Carbon Nanotubes, In: *Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites*, Eds: Yaragalla, S., Mishra, R., Thomas, S., Kalarikkal, N. ve Maria, H. J.: Elsevier, p. 1-45.
- Fiore, V., Di Bella, G. ve Valenza, A., 2011, Glass–basalt/epoxy hybrid composites for marine applications, *Materials & Design*, 32 (4), 2091-2099.
- Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G. ve Valenza, A., 2015, A review on basalt fibre and its composites, *Composites Part B: Engineering*, 74, 74-94.
- Fragassa, C., 2017, Marine Applications of Natural Fibre-Reinforced Composites: A Manufacturing Case Study, In, Eds, p. 21-47.
- Friedrich, K., Zhang, Z. ve Schlarb, A. K., 2005, Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites, *Composites Science and Technology*, 65 (15-16), 2329-2343.
- Friedrich, K., 2018, Polymer composites for tribological applications, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 1 (1), 3-39.
- Fu, S., Sun, Z., Huang, P., Li, Y. ve Hu, N., 2019, Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review, *Nano Materials Science*, 1 (1), 2-30.
- Ghalia, M. A. ve Abdelrasoul, A., 2019, 7 - Compressive and fracture toughness of natural and synthetic fiber-reinforced polymer, In: *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Eds: Jawaid, M., Thariq, M. ve Saba, N.: Woodhead Publishing, p. 123-140.

- Graham-Jones, J. ve Summerscales, J., 2015, Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites, p.
- Gutiérrez-González, C., Smirnov, A., Centeno, A., Fernandez, A., Alonso, B., Rocha, V. G., Torrecillas, R., Zurutuza, A. ve Bartolomé, J., 2015, Wear behavior of Graphene/Alumina Composite, *Ceramics International*, 41.
- Han, Z. ve Fina, A., 2011, Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review, *Progress in Polymer Science*, 36 (7), 914-944.
- Hao, L. C. ve Yu, W. D., 2010, Evaluation of thermal protective performance of basalt fiber nonwoven fabrics, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 100 (2), 551-555.
- Hollaway, L. C. ve Head, P. R., 2000, 6.25 - Composite Materials and Structures in Civil Engineering, In: Comprehensive Composite Materials, Eds: Kelly, A. ve Zweben, C., Oxford: Pergamon, p. 489-527.
- Holmberg, K. ve Erdemir, A., 2017, Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, *Friction*, 5 (3), 263-284.
- Hong, B., Xian, G. ve Li, H., 2017, Comparative Study of the Durability Behaviors of Epoxy- and Polyurethane-Based CFRP Plates Subjected to the Combined Effects of Sustained Bending and Water/Seawater Immersion, p.
- Hough, M. C. ve Wright, D. C., 1996, Two new test methods for assessing environmental stress cracking of amorphous thermoplastics, *Polymer Testing*, 15 (5), 407-421.
- Huang, X., Jiang, P. ve Tanaka, T., 2011, A review of dielectric polymer composites with high thermal conductivity, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 27 (4), 8-16.
- Iorio, M., Santarelli, M. L., González-Gaitano, G. ve Gonzalez-Benito, J., 2017, Surface Modification and Characterization of Basalt Fibers as Potential Reinforcement of Concretes, p.
- Jafari-Soghieh, F., Pajoohi-Alamooti, E. ve Behniafar, H., 2019, Bisphenol A Diglycidyl Ether-Based Epoxy Networks with Enhanced Storage Moduli Using Silica Nanoparticles Coated by NH₂-Functionalized Poly(tetramethylene oxide), *Polymer Science, Series A*, 61 (3), 357-365.
- Jamshaid, H. ve Mishra, R., 2016, A green material from rock: basalt fiber – a review, *The Journal of The Textile Institute*, 107 (7), 923-937.
- Jamshaid, H., 2017, Basalt fiber and its applications, *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 1 (6), 254-255.

- Jiang, Z., Zhang, H., Zhang, Z., Murayama, H. ve Okamoto, K., 2008, Improved bonding between PAN-based carbon fibers and fullerene-modified epoxy matrix, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39 (11), 1762-1767.
- Jiang, Z. ve Zhang, Z., 2013, Wear of Multi-Scale Phase Reinforced Composites, In, Eds, p. 79-100.
- Jones, R. M., 2014, Mechanics of composite materials, CRC press, p.
- Kafodya, I., Xian, G. ve Li, H., 2015, Durability study of pultruded CFRP plates immersed in water and seawater under sustained bending: Water uptake and effects on the mechanical properties, *Composites Part B: Engineering*, 70, 138-148.
- Karbhari, V. M. ve Xian, G., 2009, Hygrothermal effects on high VF pultruded unidirectional carbon/epoxy composites: Moisture uptake, *Composites Part B: Engineering*, 40 (1), 41-49.
- Karthikeyan, S., 2017, Development Of Tailor Made PTFE Coated Basalt And Jute Composite On Tribological Applications, Doctoral Thesis, *Kalasalingham University*, Tamil Nadu, India.
- Kawa, O. ve Litewka, P., 2015, Contact with Friction Between 3D Beams with Deformable Circular Cross-Sections, 63, 439-462.
- Kim, M. T., Kim, M. H., Rhee, K. Y. ve Park, S. J., 2011, Study on an oxygen plasma treatment of a basalt fiber and its effect on the interlaminar fracture property of basalt/epoxy woven composites, *Composites Part B: Engineering*, 42 (3), 499-504.
- Kim, M. T., Rhee, K. Y., Park, S. J. ve Hui, D., 2012, Effects of silane-modified carbon nanotubes on flexural and fracture behaviors of carbon nanotube-modified epoxy/basalt composites, *Composites Part B: Engineering*, 43 (5), 2298-2302.
- Kim, M. T., Rhee, K. Y., Lee, B. H. ve Kim, C.-J., 2013, Effect of Carbon Nanotube Addition on the Wear Behavior of Basalt/Epoxy Woven Composites, p.
- Kootsookos, A. ve Mouritz, A. P., 2004, Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites, *Composites Science and Technology*, 64 (10), 1503-1511.
- Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N. ve Trada, M., 2011, A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 42 (4), 856-873.
- Kuilla, T., Bhadra, S., Yao, D., Kim, N. H., Bose, S. ve Lee, J. H., 2010, Recent advances in graphene based polymer composites, *Progress in Polymer Science*, 35 (11), 1350-1375.

- Kumari, P. ve Liu, T., 2004, Effect of moisture on the dynamic mechanical relaxation of polyamide-6/clay Nanocomposites, p. 1823-1830.
- Kuzmin, K. L., Timoshkin, I. A., Gutnikov, S. I., Zhukovskaya, E. S., Lipatov, Y. V. ve Lazoryak, B. I., 2017, Effect of silane/nano-silica on the mechanical properties of basalt fiber reinforced epoxy composites, *Composite Interfaces*, 24 (1), 13-34.
- Ladhari, A., Ben Daly, H., Belhadjsalah, H., Cole, K. C. ve Denault, J., 2010, Investigation of water absorption in clay-reinforced polypropylene nanocomposites, *Polymer Degradation and Stability*, 95 (4), 429-439.
- Lagashetty, A. ve Venkataraman, A., 2005, Polymer nanocomposites, *Resonance*, 10 (7), 49-57.
- Lange, J. ve Wyser, Y., 2003, Recent innovations in barrier technologies for plastic packaging—a review, *Packaging Technology and Science*, 16 (4), 149-158.
- Larrinaga, P., Chastre, C., San-José, J. T. ve Garmendia, L., 2013, Non-linear analytical model of composites based on basalt textile reinforced mortar under uniaxial tension, *Composites Part B: Engineering*, 55, 518-527.
- Lee, J. H., Rhee, K. Y. ve Park, S. J., 2010, The tensile and thermal properties of modified CNT-reinforced basalt/epoxy composites, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (26), 6838-6843.
- Li, A., Zhang, C. ve Zhang, Y.-F., 2017a, Thermal Conductivity of Graphene-Polymer Composites: Mechanisms, Properties, and Applications, *Polymers*, 9 (9), 437.
- Li, A., Zhang, C. ve Zhang, Y.-F., 2017b, Thermal Conductivity of Graphene-Polymer Composites: Mechanisms, Properties, and Applications, *Polymers*, 9.
- Liu, Q., T. Shaw, M., Parnas, R. ve McDonnell, A.-M., 2006, Investigation of basalt fiber composite aging behavior for applications in transportation, p.
- Liu, S., Yan, H.-Q., Fang, Z. ve Wang, H., 2014, Effect of graphene nanosheets on morphology, thermal stability and flame retardancy of epoxy resin, *Composites Science and Technology*, 90, 40–47.
- Liu, W., Hoa, S. V. ve Pugh, M., 2008, Water uptake of epoxy–clay nanocomposites: Experiments and model validation, *Composites Science and Technology*, 68 (9), 2066-2072.
- Liu, Y., Yan, D., Zhuo, R., Li, S., Wu, Z. G., Wang, J., Ren, P., Yan, P. ve Geng, Z., 2013, Design, hydrothermal synthesis and electrochemical properties of porous birnessite-type manganese dioxide nanosheets on graphene as a hybrid material for supercapacitors.
- Lopresto, V., Leone, C. ve De Iorio, I., 2011, Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic, *Composites Part B: Engineering*, 42 (4), 717-723.

- Lu, C. ve Mai, Y.-W., 2005, Influence of aspect ratio on barrier properties of polymer-clay nanocomposites, *Physical review letters*, 95 (8), 088303.
- Lu, Z., Xian, G. ve Li, H., 2016, Effects of elevated temperatures on the mechanical properties of basalt fibers and BFRP plates, *Construction and Building Materials*, 127, 1029-1036.
- Lu, Z., Xie, J., Zhang, H. ve Li, J., 2017, Long-Term Durability of Basalt Fiber-Reinforced Polymer (BFRP) Sheets and the Epoxy Resin Matrix under a Wet-Dry Cyclic Condition in a Chloride-Containing Environment, *Polymers*, 9 (12), 652.
- Luo, J. J. ve Daniel, I. M., 2003, Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer/clay nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 63 (11), 1607-1616.
- Ma, G., Yan, L., Shen, W., Zhu, D., Huang, L. ve Kasal, B., 2018, Effects of water, alkali solution and temperature ageing on water absorption, morphology and mechanical properties of natural FRP composites: Plant-based jute vs. mineral-based basalt, *Composites Part B: Engineering*, 153, 398-412.
- Ma, J., Meng, Q., Zaman, I., Zhu, S., Michelmore, A., Kawashima, N., Wang, C. H. ve Kuan, H.-C., 2014, Development of polymer composites using modified, high-structural integrity graphene platelets, *Composites Science and Technology*, 91, 82-90.
- Mahdi, A. S. ve Mohsin, N. R., 2018, Water absorption and fatigue life of an Epoxy composite reinforced by glass fiber, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 454, 012007.
- Mallick, P. K., 2007, Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design, CRC press, p.
- Manikandan, V., Winowlin Jappes, J. T., Suresh Kumar, S. M. ve Amuthakkannan, P., 2012, Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 43 (2), 812-818.
- Menezes, P. L., Kailas, S. V. ve Lovell, M. R., 2011, Friction and transfer layer formation in polymer-steel tribo-system: role of surface texture and roughness parameters, *Wear*, 271 (9-10), 2213-2221.
- Metz, S. J., Van de Ven, W., Potreck, J., Mulder, M. ve Wessling, M., 2005, Transport of water vapor and inert gas mixtures through highly selective and highly permeable polymer membranes, *Journal of Membrane Science*, 251 (1-2), 29-41.
- Militky, J., Kovacic, V. ve Rubnerová, J., 2002, Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers, p.

- Militký, J., Mishra, R. ve Jamshaid, H., 2018, 20 - Basalt fibers, In: Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres (Second Edition), Eds: Bunsell, A. R.: Woodhead Publishing, p. 805-840.
- Milman, S. B., Velikanova, M. G. ve Kotov, L. E., 1996, Development and study of load-bearing heat insulation, *Cryogenics*, 36 (2), 127-130.
- Mishra, V., 2014, Physical, Mechanical and Abrasive Wear Behaviour of Jute Fiber Reinforced Polymer Composites, *National Institute of Technology*, Rourkela (India).
- Mitchell, B. S., 2004, An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers, John Wiley & Sons, p.
- Moosa, J., M.M, S. ve Abed Al-Hussein, O. M., 2016, Modification Polymer Matrix Composites By Addition Graphene, p. 41-46.
- Mourad, A.-H. I., Abdel-Magid, B. M., El-Maaddawy, T. ve Grami, M. E., 2010, Effect of Seawater and Warm Environment on Glass/Epoxy and Glass/Polyurethane Composites, *Applied Composite Materials*, 17 (5), 557-573.
- Mouritz, A. P., 2012, 13 - Polymers for aerospace structures, In: Introduction to Aerospace Materials, Eds: Mouritz, A. P.: Woodhead Publishing, p. 268-302.
- Müller, K., Bugnicourt, E., Latorre, M., Jorda, M., Echevoyen Sanz, Y., Lagaron, J. M., Miesbauer, O., Bianchin, A., Hankin, S., Bölz, U., Pérez, G., Jesdinszki, M., Lindner, M., Scheuerer, Z., Castelló, S. ve Schmid, M., 2017, Review on the Processing and Properties of Polymer Nanocomposites and Nanocoatings and Their Applications in the Packaging, Automotive and Solar Energy Fields, *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 7 (4), 74.
- Nadiv, R., Vasilyev, G., Shtein, M., Peled, A., Zussman, E. ve Regev, O., 2016, The multiple roles of a dispersant in nanocomposite systems, *Composites Science and Technology*, 133, 192-199.
- Namvar, F., Jawaid, M., M. Tahir, P., Mohamad, R., Azizi, S., Khodavandi, A., Rahman, H. ve Dehghan Nayeri, M., 2014, Potential Use of Plant Fibres and their Composites for Biomedical Applications, p.
- Nasir, V., Karimipour, H., Taheri-Behrooz, F. ve Shokrieh, M. M., 2012, Corrosion behaviour and crack formation mechanism of basalt fibre in sulphuric acid, *Corrosion Science*, 64, 1-7.
- Nir, Y., Narkis, M. ve Siegmann, A., 2000, Partially miscible EVOH/copolyamide-6/6.9 blends: The effect of stretching on the structure, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 38 (6), 813-822.
- Novák, J. ve Prach, K., 2010, Artificial sowing of endangered dry grassland species into disused basalt quarries, *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 205 (3), 179-183.

- Novitskii, A. G. ve V. Sudakov, V., 2004, An Unwoven Basalt-Fiber Material for the Encasing of Fibrous Insulation: an Alternative to Glass Cloth, p.
- Nunes, J. M. G., Kautzmann, R. M. ve Oliveira, C., 2014, Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil), *Journal of Cleaner Production*, 84, 649-656.
- Omrani, E., Barari, B., Moghadam, A. D., Rohatgi, P. K. ve Pillai, K. M., 2015, Mechanical and tribological properties of self-lubricating bio-based carbon-fabric epoxy composites made using liquid composite molding, *Tribology International*, 92, 222-232.
- Omrani, E., Menezes, P. L. ve Rohatgi, P. K., 2016, State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19 (2), 717-736.
- Öztürk, B., Arslan, F. ve Öztürk, S., 2007, Hot wear properties of ceramic and basalt fiber reinforced hybrid friction materials, *Tribology International*, 40 (1), 37-48.
- Pandian, A., Vairavan, M., J T, W. ve Uthayakumar, M., 2014, Effect of Moisture Absorption Behavior on Mechanical Properties of Basalt Fibre Reinforced Polymer Matrix Composites, p.
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A. ve Young, R. J., 2017, Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites, *Progress in Materials Science*, 90, 75-127.
- Park, S. ve Ruoff, R. S., 2009, Chemical methods for the production of graphenes, *Nature Nanotechnology*, 4, 217.
- Parnas, R., Shaw, M. ve Liu, Q., 2006, Basalt fiber reinforced polymer composites, p.
- Patel, D. K., Banerjee, S., 2008, A Comparative Study Of Effects On Characteristic Properties Of FRP Composites When Exposed To Distilled Water, NaCl- Water Solution And Sea Water Separately, Bachelor, *National Institute of Technology Rourkela*.
- Pei, X.-Q., Bennowitz, R. ve Schlarb, A. K., 2015, Mechanisms of friction and wear reduction by carbon fiber reinforcement of PEEK, *Tribology Letters*, 58 (3), 42.
- Peretz Damari, S., Cullari, L., Nativ, R., Nir, Y., Laredo, D., Grunlan, J. ve Regev, O., 2018, Graphene-induced enhancement of water vapor barrier in polymer nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, 134, 218-224.
- Poznyak, A., A. Levitskii, I. ve E. Barantseva, S., 2012, Basaltic and granitic rocks as components of ceramic mixes for interior wall tiles, p.

- Prabhakar, K., Debnath, S., Ganesan, R. ve Palanikumar, K., 2018, A review of mechanical and tribological behaviour of polymer composite materials, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 344, 012015.
- Prolongo, S., Jiménez-Suárez, A., Moriche, R. ve Ureña, A., 2018, Influence of Thickness and Lateral Size of Graphene Nanoplatelets on Water Uptake in Epoxy/Graphene Nanocomposites, *Applied Sciences*, 8 (9), 1550.
- Prolongo, S. G., Gude, M. R. ve Ureña, A., 2012, Water uptake of epoxy composites reinforced with carbon nanofillers, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43 (12), 2169-2175.
- Puggal, S., Dhall, N., Singh, N. ve Singh Litt, M., 2016, A Review on Polymer Nanocomposites: Synthesis, Characterization and Mechanical Prop, p.
- Qin, W., Vautard, F., Drzal, L. T. ve Yu, J., 2015, Mechanical and electrical properties of carbon fiber composites with incorporation of graphene nanoplatelets at the fiber–matrix interphase, *Composites Part B: Engineering*, 69, 335-341.
- Qiu, S., Liu, G., Li, W., Zhao, H. ve Wang, L., 2018, Noncovalent exfoliation of graphene and its multifunctional composite coating with enhanced anticorrosion and tribological performance, *Journal of Alloys and Compounds*, 747, 60-70.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.-Z. ve Koratkar, N., 2009a, Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content, *ACS Nano*, 3 (12), 3884-3890.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z. ve Koratkar, N., 2009b, Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content, *ACS Nano*, 3 (12), 3884-3890.
- Rahmat, M., Ghiasi, H. ve Hubert, P., 2011, An interaction stress analysis of nanoscale elastic asperity contacts, *Nanoscale*, 4, 157-166.
- Raju, P. M., 2013, Infiltration Growth processing of YBCO nano-composites: shape forming, microstructural and magnetic studies.
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Lu, Y., Asif, M., Hussain, S., She, J., Gou, J. ve Mao, J., 2013, Effect of graphene nanoplatelets (GNPs) addition on strength and ductility of magnesium-titanium alloys, *Journal of Magnesium and Alloys*, 1 (3), 242-248.
- Rashad, M., Pan, F., Yu, Z., Asif, M., Lin, H. ve Pan, R., 2015, Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets, *Progress in Natural Science: Materials International*, 25 (5), 460-470.
- Ray, S., Quek, S. Y., Easteal, A. ve Chen, X. D., 2006, The potential use of polymer-clay nanocomposites in food packaging, *International Journal of Food Engineering*, 2 (4).

- Regar, M. ve Amjad, A., 2016, Basalt Fibre – Ancient Mineral Fibre for Green and Sustainable Development, *Tekstilec*, 59, 321-334.
- Rege, S. K. ve Lakkad, S. C., 1983, Effect of salt water on mechanical properties of fibre reinforced plastics, *Fibre Science and Technology*, 19 (4), 317-324.
- Rybin, V. A., Utkin, A. ve Baklanova, N., 2013, Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers, p.
- Sahin, Y., Tokdede, A. ve Yankaş, M., 2017, The effect of fiber orientation on the dry wear behaviour of carbon fibre-reinforced epoxy composites, 8.
- Santos, T., Vasconcelos, G., de Souza, W., Costa, M. ve Botelho, E., 2015, Suitability of carbon fiber-reinforced polymers as power cable cores: galvanic corrosion and thermal stability evaluation, *Materials & Design (1980-2015)*, 65.
- Saravanan, D., 2006, Spinning the rocks - Basalt fibres, p.
- Scheffler, C., Förster, T., Mäder, E., Heinrich, G., Hempel, S. ve Mechtcherine, V., 2009, Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355 (52), 2588-2595.
- Sharma, B., Chhibber, R. ve Mehta, R., 2018, Seawater ageing of glass fiber reinforced epoxy nanocomposites based on silylated clays, *Polymer Degradation and Stability*, 147, 103-114.
- Shen, X.-J., Pei, X.-Q., Fu, S.-Y. ve Friedrich, K., 2013, Significantly modified tribological performance of epoxy nanocomposites at very low graphene oxide content, *Polymer*, 54 (3), 1234-1242.
- Shen, X.-J., Pei, X.-Q., Liu, Y. ve Fu, S.-Y., 2014, Tribological performance of carbon nanotube-graphene oxide hybrid/epoxy composites, *Composites Part B: Engineering*, 57, 120-125.
- Shim, H. H., Kwon, O. K. ve Youn, J. R., 1992, Effects of fiber orientation and humidity on friction and wear properties of graphite fiber composites, *Wear*, 157 (1), 141-149.
- Shokrieh, M. M. ve Memar, M., 2010, Stress Corrosion Cracking of Basalt/Epoxy Composites under Bending Loading, *Applied Composite Materials*, 17 (2), 121-135.
- Shoufan, C., Hongtao, L., Shirong, G. ve Gaofeng, W., 2011, Mechanical and tribological behaviors of UHMWPE composites filled with basalt fibers, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30 (4), 347-355.
- Sim, J., Park, C. ve Moon, D. Y., 2005, Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures, *Composites Part B: Engineering*, 36 (6), 504-512.

- Sims, G. D. ve Broughton, W. R., 2000, 2.05 - Glass Fiber Reinforced Plastics— Properties, In: *Comprehensive Composite Materials*, Eds: Kelly, A. ve Zweben, C., *Oxford: Pergamon*, p. 151-197.
- Singha, K., 2012, A short review on basalt fiber, p.
- Starkova, O., Buschhorn, S. T., Mannov, E., Schulte, K. ve Aniskevich, A., 2013a, Water transport in epoxy/MWCNT composites, *European Polymer Journal*, 49 (8), 2138-2148.
- Starkova, O., Chandrasekaran, S., Prado, L. A. S. A., Tölle, F., Mülhaupt, R. ve Schulte, K., 2013b, Hydrothermally resistant thermally reduced graphene oxide and multi-wall carbon nanotube based epoxy nanocomposites, *Polymer Degradation and Stability*, 98 (2), 519-526.
- Su Kim, H., Sung Bae, H., Yu, J. ve Kim, S. Y., 2016, Thermal conductivity of polymer composites with the geometrical characteristics of graphene nanoplatelets, p.
- Subramanian, R. V. ve Austin, H. F., 1980, Silane coupling agents in basalt-reinforced polyester composites, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1 (1), 50-54.
- Tan, B. ve Thomas, N. L., 2016, A review of the water barrier properties of polymer/clay and polymer/graphene nanocomposites, *Journal of Membrane Science*, 514, 595-612.
- Thakur, V. K., Thakur, M. K. ve Gupta, R. K., 2014, Review: Raw Natural Fiber-Based Polymer Composites, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 19 (3), 256-271.
- Thwe, M. M. ve Liao, K., 2002, Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo–glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33 (1), 43-52.
- Tsenoglou, C. J., Pavlidou, S. ve Papaspyrides, C. D., 2006, Evaluation of interfacial relaxation due to water absorption in fiber–polymer composites, *Composites Science and Technology*, 66 (15), 2855-2864.
- Tsujimoto, A., Barkmeier, W. W., Fischer, N. G., Nojiri, K., Nagura, Y., Takamizawa, T., Latta, M. A. ve Miazaki, M., 2018, Wear of resin composites: Current insights into underlying mechanisms, evaluation methods and influential factors, *The Japanese dental science review*, 54 (2), 76-87.
- Tuz Johra, F., Lee, J. ve Jung, W.-G., 2014, Facile and safe graphene preparation on solution based platform, p.
- Tyagi, A., 2011, Metal Casting- A General Review, Harinder Pal, Nrip Jit, Anand K Tyagi, Sarabjeet, *Advances in Applied Science Research*, (ISSN: 0976-8610) 2 (5): 360-371, 2011, p.

- Unterweger, C., Brüggemann, O. ve Fürst, C., 2014, Synthetic fibers and thermoplastic short-fiber-reinforced polymers: Properties and characterization, *Polymer Composites*, 35 (2), 227-236.
- Ünal, H., Yetgin, S., Mimaroglu, A. ve Sumer, M., 2009, The Effect of Test Parameters on Friction and Wear Performance of PTFE and PTFE Composites, p.
- Vahedi, V. ve Pasbakhsh, P., 2014, Instrumented impact properties and fracture behaviour of epoxy/modified halloysite nanocomposites, *Polymer Testing*, 39, 101-114.
- Varley, R. J., Tian, W., Leong, K. H., Leong, A. Y., Fredo, F. ve Quaresimin, M., 2013, The effect of surface treatments on the mechanical properties of basalt-reinforced epoxy composites, *Polymer Composites*, 34 (3), 320-329.
- Vasiliev, V. V. ve Morozov, E. V., 2018, Introduction, In: *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures (Fourth Edition)*, Eds: Vasiliev, V. V. ve Morozov, E. V.: Elsevier, p. xvii-xxv.
- Vikas, G., Sudheer, M., 2017, A Review on Properties of Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites, *American Journal of Materials Science*, 7(5), 156-165.
- Viña, J., García, M., A. Castrillo, M., Vina, I. ve Argüelles, A., 2008, Wear Behavior of a Glass Fiber-Reinforced PEI Composite, p.
- Walock, M., 2012, Nanocomposite coatings based on quaternary metal-nitrogen and nanocarbon systems.
- Wang, J.-S., Kim, J.-D. ve Yoon, H.-J., 2009, Mechanical characteristics of fused cast basalt tube encased in steel pipe for protecting steel surface, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19 (4), 935-940.
- Wang, J., Chen, B., Liu, N., Han, G. ve Yan, F., 2014, Combined effects of fiber/matrix interface and water absorption on the tribological behaviors of water-lubricated polytetrafluoroethylene-based composites reinforced with carbon and basalt fibers, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 59, 85-92.
- Wang, M., Zhang, Z., Li, Y., Li, M. ve Sun, Z., 2008, Chemical Durability and Mechanical Properties of Alkali-proof Basalt Fiber and its Reinforced Epoxy Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27 (4), 393-407.
- Wang, M., Yan, C. ve Ma, L., 2012, Graphene Nanocomposites, p.
- Wang, Q.-h., Zhang, X.-r. ve Pei, X.-q., 2010, Study on the friction and wear behavior of basalt fabric composites filled with graphite and nano-SiO₂, *Materials & Design*, 31 (3), 1403-1409.
- Wang, X., Qi, X., Lin, Z. ve Battocchi, D., 2018, Graphene Reinforced Composites as Protective Coatings for Oil and Gas Pipelines, *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 8 (12), 1005.

- Wang, Z., Cao, N., He, J., Du, R., Liu, Y. ve Zhao, G., 2017, Mechanical and anticorrosion properties of furan/epoxy-based basalt fiber-reinforced composites: ARTICLE, p.
- Wei, B., Cao, H. ve Song, S., 2010a, RETRACTED: Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (18), 4708-4715.
- Wei, B., Cao, H. ve Song, S., 2010b, Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment, *Materials & Design*, 31 (9), 4244-4250.
- Wei, B., Cao, H. ve Song, S., 2011, Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater, *Corrosion Science*, 53 (1), 426-431.
- Wei, J. ve Inam, F., 2017, Processing of epoxy/graphene nanocomposites: Effects of surfactants, *J Polym Sci Appl I*, 1, 2.
- Wei, J., Saharudin, M., Vo, T. ve Inam, F., 2017, Dichlorobenzene: An effective solvent for epoxy/graphene nanocomposites preparation, p.
- Wu, G., Wang, X., Wu, Z., Dong, Z. ve Zhang, G., 2014, Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments, *Journal of Composite Materials*, 49 (7), 873-887.
- Wu, X., Zhang, Y., Du, P., Jin, Z., Zhao, H. ve Wang, L., 2019, Synthesis, characterization and properties of graphene-reinforced polyimide coatings, *New Journal of Chemistry*, 43.
- Xie, H., Jiang, B., Dai, J., Peng, C., Li, C., Li, Q. ve Pan, F., 2018, Tribological Behaviors of Graphene and Graphene Oxide as Water-Based Lubricant Additives for Magnesium Alloy/Steel Contacts, *Materials (Basel, Switzerland)*, 11 (2), 206.
- Yang, P., Shams, S. S., Slay, A., Brokate, B. ve Elhajjar, R., 2015, Evaluation of temperature effects on low velocity impact damage in composite sandwich panels with polymeric foam cores, *Composite Structures*, 129, 213-223.
- Yazdani, B., Xu, F., Ahmad, I., Hou, X., Xia, Y. ve Zhu, Y., 2015, Tribological performance of Graphene/Carbon nanotube hybrid reinforced Al₂O₃ composites, *Scientific Reports*, 5, 11579.
- Yoo, B. M., Shin, H. J., Yoon, H. W. ve Park, H. B., 2014, Graphene and graphene oxide and their uses in barrier polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 131 (1).
- Yusriah, L., Mariatti, M. ve Abu Bakar, A., 2010, The properties of vinyl ester composites reinforced with different types of woven fabric and hollow phenolic microspheres, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29 (20), 3066-3073.

- Zhang, A., Li, D., Zhang, D., Lu, H., Xiao, H. ve Jia, J., 2011, Qualitative separation of the effect of voids on the static mechanical properties of hygrothermally conditioned carbon/epoxy composites, *eXPRESS Polymer Letters*, 5 (8).
- Zhang, G., Chang, L. ve Schlarb, A. K., 2009a, The roles of nano-SiO₂ particles on the tribological behavior of short carbon fiber reinforced PEEK, *Composites Science and Technology*, 69 (7), 1029-1035.
- Zhang, H., Yao, Y., Zhu, D., Mobasher, B. ve Huang, L., 2016a, Tensile mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer composite under varying strain rates and temperatures, *Polymer Testing*, 51, 29-39.
- Zhang, X., Pei, X. ve Wang, Q., 2009b, Friction and wear properties of polyimide matrix composites reinforced with short basalt fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 111 (6), 2980-2985.
- Zhang, X., Pei, X. ve Wang, Q., 2009c, Friction and wear properties of basalt fiber reinforced/solid lubricants filled polyimide composites under different sliding conditions, *Journal of Applied Polymer Science*, 114 (3), 1746-1752.
- Zhang, Y., Zhu, S., Liu, Y., Yang, B. ve Wang, X., 2015, The mechanical and tribological properties of nitric acid-treated carbon fiber-reinforced polyoxymethylene composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 132 (15).
- Zhang, Y., Fei, D., Xin, G. ve Cho, U.-R., 2016b, Surface modification of novel rice bran carbon functionalized with (3-Mercaptopropyl) trimethoxysilane and its influence on the properties of styrene-butadiene rubber composites, *Journal of Composite Materials*, 50 (21), 2987-2999.
- Zhang, Y., Zhang, D., Wei, X., Zhong, S. ve Wang, J., 2018, Enhanced Tribological Properties of Polymer Composite Coating Containing Graphene at Room and Elevated Temperatures, *Coatings*, 8 (3), 91.
- Zhao, Y., Wang, B., Chen, W., Li, A., Zheng, G., Liu, C., Chen, J. ve Shen, C., 2016, Effects of surface modification with 3-aminopropyltriethoxysilane on structure and mechanical property of multiwalled carbon nanotube/polycarbonate composites, *Polymer Composites*, 37 (6), 1914-1923.
- Zhou, S., Wang, J., Wang, S., Ma, X., Huang, J., Zhao, G. ve Liu, Y., 2018, Facile preparation of multiscale graphene-basalt fiber reinforcements and their enhanced mechanical and tribological properties for polyamide 6 composites, *Materials Chemistry and Physics*, 217, 315-322.
- Živković, I., Fragassa, C., Pavlović, A. ve Brugo, T., 2017, Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber reinforced green composites, *Composites Part B: Engineering*, 111, 148-164.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emine Feyza ŞÜKÜR
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Samsun / 27.04.1987
Telefon : 0506 655 25 07
E-Posta : efsukur@ktun.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Lise	: Cumhuriyet Lisesi (YDA), SAMSUN	2005
Üniversite	: Kırıkkale Üniversitesi	2010
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi	2014
Doktora	: Konya Teknik Üniversitesi	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2018	Selçuk Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2018-...	Konya Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, nanokompozitler

YABANCI DİLLER

İngilize, Almanca

YAYINLAR

Akay, S.B., Şükür, E.F., Türköz, M., Halkacı, H.S., Koç, M. ve Avcı, S., “Determination of Proper Loading Profiles for Hydro-Mechanical Deep Drawing Process Using FEA”, Applied Mechanics and Materials, 2014, [link](#)

Şükür, E.F., Türköz, M., Dilmeç, M., Halkacı, H.S. ve Halkacı, M., “Comparison of Flow Curves of AA 5457 O Sheet Material Determined by Hydraulic Bulge and Tensile Tests at Warm Forming Temperatures”, Journal of Testing and Evaluation, 2016, [link](#)