

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**

**DOĞAL LİF TAKVİYELİ PARTİKÜL DOLGULU POLİMER MATRİSLİ  
KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Yusuf Eren ERDOĞDU**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ**

**ARALIK 2020**

**T.C**  
**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**

**DOĞAL LİF TAKVİYELİ PARTİKÜL DOLGULU POLİMER MATRİSLİ  
KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Yusuf Eren ERDOĞDU**

**(23615180552)**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ**

**ARALIK 2020**

**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

**DOĞAL LİF TAKVİYELİ PARTİKÜL DOLGULU POLİMER**  
**MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK**  
**DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

DANIŞMAN

HAZIRLAYAN

PROF. DR. ŞEMSETTİN TEMİZ

YUSUF EREN ERDOĞDU

Jürimiz tarafından 30/12/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda bu tez **oybirliği /oyçokluğu** ile başarılı bulunarak **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı** Doktora Tezi olarak kabul etmiştir.

<b>Jüri Üyelerinin Unvanı Adı Soyadı</b>	<b>İmza</b>
1. Prof. Dr. M. Burhan KARAKOÇ	.....
2. Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ	.....
3. Prof. Dr. Mehmet KARAKAN	.....
4. Doç Dr. İ. Yasin SÜLÜ	.....
5. Dr. Öğretim Üyesi Şerif ÇİTİL	.....

**O N A Y**

Bu tez, İnönü Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../20... tarih ve 20.../..... sayılı Kararıyla da uygun görülmüştür.

.....

Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Kazım TÜRK

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalıőmasının her aőamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübelerini esirgmeden fikirlerime değer vererek yapıcı desteklerde bulunan, çalıőmaya imkan sağlamak için elinden geleni yapan danışman hocam Sayın Prof. Dr. şemsettin TEMİZ'e,

Çalıőmalarım sırasında çalıőmama zaman ayırmamı sağlayan ve beni destekleyen eőim Ceren'e ve bana enerji veren kızım Sebahat Beren'e,

Göremeseler de, kısıtlı imkanlarını eğitimim için seferber eden, beni yetiőtiren anne ve babama teşekkür ederim.

Bu alıőma; İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından (proje numarası: FDK-2019-1812) desteklenmiőtir. İlgili kuruma teőekkürlerimi sunarım.



## ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduđum ‘‘Dođal Lif Takviyeli Partikül Dolgulu Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Davranıřlarının İncelenmesi’’ bařlıklı bu çalıřmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı dűşecek bir yardıma bařvurmaksızın tarafımdan yazıldıđına ve yararlandıđım bűtűn kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yűntemine uygun biçimde gűsterilenlerden oluřtuđunu belirtir, bunu onurumla dođrularım.

Yusuf Eren ERDOĞDU



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....	i
ONUR SÖZÜ .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR .....	viii
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
<b>1.GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Kapsam .....	2
1.2 Hipotez .....	2
1.3 Amaç .....	3
<b>2. KOMPOZİT MALZEMELER</b> .....	<b>4</b>
2.1 Polimer Matrisli Kompozitler.....	4
2.1.1 Elyaf takviye malzemeleri .....	5
2.1.1.1 Doğal elyaf takviye malzemeleri.....	8
2.1.1.2 Sentetik elyaf takviye malzemeleri.....	12
2.1.2 Matris malzemeleri .....	13
2.1.2.1 Poliüre.....	14
2.1.3 Dolgu malzemeleri .....	19
2.2 DETPK'lerin Mekanik ve Tribolojik Özellikleri .....	20
2.2.1 Mekanik özellikler .....	20
2.2.2 Tribolojik özellikler.....	22
2.3 Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	26
2.3.1 VDRTK yöntemi .....	26
2.3.2 Elle yatırma yöntemi .....	28
2.3.3 Vakum torbalama yöntemi .....	28
2.3.4 Spreyleme yöntemi .....	29
2.3.5 Reçine transfer kalıplama yöntemi .....	30
2.3.6 Basınçla kalıplama yöntemi .....	30
2.3.7 Filament sarma yöntemi .....	31
2.3.8 Pultrüzyon yöntemi .....	32
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>33</b>
3.1 Malzemeler .....	33
3.1.1 Takviye malzemesi .....	33
3.1.2 Matris malzemesi.....	33
3.1.3 Dolgu Malzemesi.....	34
3.2 Kompozit Üretimi.....	36
3.2.1 Takviye malzemesinin hazırlanması .....	36
3.2.1 Matris malzemesinin hazırlanması .....	37
3.2.3 VDRTK ile kompozit üretimi.....	38
3.2.3.1 VDRTK işlemi elemanları.....	38
3.2.3.2 VDRTK ile üretim.....	39
3.3 Mekanik Testler.....	42
3.3.1 Mekanik testler için numune hazırlanması.....	42
3.3.2 Çekme testi .....	44
3.3.3 Eğilme testi .....	46

3.3.4 Darbe testi.....	47
3.4 Tribolojik Testler.....	50
3.4.1 Tribolojik testler için numune hazırlanması.....	50
3.4.2 Numune yoğunluklarının hesaplanması .....	52
3.4.3 Yüksek sıcaklıkta aşınma testleri .....	53
3.5 Morfolojik Analiz.....	56
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>58</b>
4.1 Üretilen Kompozit Plakalarda Takviye - Matris Oranları ve Elyafın İslanma Durumları .....	58
4.2 Mekanik Testlere Ait Bulgular .....	60
4.2.1 Çekme testi sonuçları.....	60
4.2.2 Eğilme testi sonuçları .....	62
4.2.3 Darbe testi sonuçları .....	64
4.3 Tribolojik Testlere Ait Bulgular .....	67
4.3.1 Numune yoğunlukları .....	67
4.3.2 Aşınma testleri.....	67
4.4 Morfolojik Analiz .....	74
4.4.1 Mekanik test numunelerinin SEM ve EDX analizi .....	74
4.4.2 Tribolojik test numunelerinin SEM ve EDX analizi .....	79
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>86</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>89</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>96</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1:</b> Dokuma tipleri ve özelliklerinin karşılaştırılması [17].....	7
<b>Çizelge 2.2:</b> Bazı doğal elyafların kimyasal içerikleri [28]. ....	9
<b>Çizelge 2.3:</b> Doğal elyafların mekanik özellikleri [28].....	11
<b>Çizelge 2.4:</b> Bazı PUr özelliklerinin diğer matris malzemeleriyle kıyaslanması [55].....	16
<b>Çizelge 3.1:</b> Bileşen özellikleri*.....	33
<b>Çizelge 3.2:</b> Poliaspartik PUr'ye ait mekanik ve fiziksel özellikler*.....	34
<b>Çizelge 3.3:</b> TiO <sub>2</sub> teknik özellikler [91]. ....	35
<b>Çizelge 3.4:</b> GNP teknik özellikler [92]. ....	36
<b>Çizelge 3.5:</b> VDRTK işlemi elamanları.....	38
<b>Çizelge 3.6:</b> Mekanik test numunelerinin 3 boyutlu modelleri ve standartları.....	43
<b>Çizelge 4.1:</b> Kompozit plakaların takviye-matris oranları.....	58
<b>Çizelge 4.2:</b> Çekme testi sonuçları.....	60
<b>Çizelge 4.3:</b> Üç nokta eğilme testi sonuçları.....	62
<b>Çizelge 4.4:</b> Kenara dik çentiksiz charpy darbe testi sonuçları.....	64
<b>Çizelge 4.5:</b> Yüzeye dik çentiksiz charpy darbe testi sonuçları.....	65
<b>Çizelge 4.6:</b> Aşınma numunelerinin yoğunlukları.....	67
<b>Çizelge 4.7:</b> Kompozit aşınma numunelerinin aşınma sonrası ağırlık kayıpları.....	72
<b>Çizelge 4.8:</b> Kompozit aşınma numunelerinin aşınma sonrası hesaplanan SAO değerleri.....	73

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimleri a) sürekli ve hizalı, b) süreksiz ve hizalı, c) süreksiz ve gelişigüzel yönlendirilmiş takviyeler [8].	5
Şekil 2.2: Yaygın kullanılan dokuma tipleri a) düz (bezayağı) örgü, b) dimi örgü, c) saten örgü [16].	6
Şekil 2.3: Doğal ve sentetik elyafların sınıflandırılması [18,19].	7
Şekil 2.4: Doğal elyafın yapısı [30].	10
Şekil 2.5: PUr oluşum reaksiyonu şeması [47].	14
Şekil 2.6: PUr ve PU teknolojileri [49].	14
Şekil 2.7: PUr'nin AFM görüntüsü [50].	15
Şekil 2.8: PUr uygulamalarının kullanım oranları [55].	17
Şekil 2.9: İzosiyanat ile elyafın reaksiyonu [29].	17
Şekil 2.10: Temel sürtünme mekanizmaları ve aşınma mekanizmaları ile ilişkileri [78].	23
Şekil 2.11: Kısa elyaf takviyeli polimer kompozitlerde aşınma durumunda genel olarak meydana gelen hasar mekanizmaları, a) matris aşınması ve elyafların incilmesi, b) elyafların kırılması, c) matris-elyaf arasında arayüz ayrılması, d) elyaf soyulması [80].	24
Şekil 2.12: VDRTK yöntemi [86].	27
Şekil 2.13: Elle yatırma yönteminin aşamaları [3].	28
Şekil 2.14: Vakum torbalama yöntemi [88].	29
Şekil 2.15: Spreyleme yöntemi [88,89].	29
Şekil 2.16: Reçine transfer kalıplama yöntemi [88,89].	30
Şekil 2.17: Basınçla kalıplama yöntemi, a) hamur yükleme, b) ve c) hamur sıkıştırma ve kütleme, d) parça çıkarma [3].	31
Şekil 2.18: Filament sarma yöntemi [3].	31
Şekil 2.19: Pultrüzyon yöntemi [90].	32
Şekil 3.1: TiO <sub>2</sub> SEM görüntüsü*.	35
Şekil 3.2: GNP'lere ait SEM görüntüsü [93].	36
Şekil 3.3: Takviye malzemesinin hazırlanması.	37
Şekil 3.4: Karıştırma işlemi.	37
Şekil 3.5: VDRTK işlemi görsel özeti.	39
Şekil 3.6: VDRTK düzeneği.	40
Şekil 3.7: GNP dolgusunda elyaf ıslanmaması sorunu.	41
Şekil 3.8: Çift taraflı akış uygulaması, a) işlem öncesi, b) işlem sonrası.	41
Şekil 3.9: Üretilen kompozit plakalar, a) GNP dolgulu plakalar, b) dolgusuz ve TiO <sub>2</sub> dolgulu plakalar.	42
Şekil 3.10: CNC lazer tezgahında numune hazırlanışı.	44
Şekil 3.11: Çekme testi genel görünümü, a) test öncesi, b) test sonrası.	45
Şekil 3.12: 3 nokta eğilme testi genel görünümü.	47
Şekil 3.13: Charpy darbe test cihazı.	48
Şekil 3.14: Numunelerin darbe cihazındaki konumları, a) yüzeye dik, b) kenara dik.	48
Şekil 3.15: Charpy test cihazındaki parametrelerin gösterimi.	49
Şekil 3.16: CNC lazer kesim tezgahında aşınma numunelerinin kesimi.	51
Şekil 3.17: Teste hazır hale getirilmiş numune.	51
Şekil 3.18: Aşınma numunelerinin yoğunluklarının belirlenmesi.	52
Şekil 3.19: Aşınma testi düzeneği.	53
Şekil 3.20: Metal karşı yüzeye ait yüzey pürüzlülüğü eğrisi.	54
Şekil 3.21: Test parametrelerinin Turkyus programına girilmesi.	55

<b>Şekil 3.22:</b> Termal görüntü alınması.....	56
<b>Şekil 3.23:</b> Altın-paladyum kaplanan kompozit numuneler. ....	56
<b>Şekil 3.24:</b> Taramalı elektron mikroskobu.....	57
<b>Şekil 4.1:</b> Dolgusuz ve TiO <sub>2</sub> dolgulu çekme numunelerinin kesit görüntüleri, a) dolgusuz, b) %0.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu, c) %1 TiO <sub>2</sub> dolgulu, d) %1.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu numuneler.....	59
<b>Şekil 4.2:</b> GNP dolgulu çekme numunelerinin kesit görüntüleri, a) %0.5 GNP dolgulu, b) %1 GNP dolgulu, c) %1.5 GNP dolgulu numuneler. ....	59
<b>Şekil 4.3:</b> Çekme testleri sonrası kopma hasarları, a) Dolgusuz, b) %0.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu, c) %1 TiO <sub>2</sub> dolgulu, d) %1.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu, e) %0.5 GNP dolgulu, f) %1 GNP dolgulu, g) %1.5 GNP dolgulu numuneler. ....	61
<b>Şekil 4.4:</b> Kompozit numunelerin çekme testleri sonrası ortalama E <sub>ç</sub> değerleri.....	61
<b>Şekil 4.5:</b> Dolgusuz 2 numaralı numunenin üç nokta eğilme testi görünümü, a) %5 gerinim anı, b) %9 gerinim anı. ....	63
<b>Şekil 4.6:</b> Eğilme testi sonraı numuneler, a) Dolgusuz, b) %0.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu, c) %1 TiO <sub>2</sub> dolgulu, d) %1.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu, e) %0.5 GNP dolgulu, f) %1 GNP dolgulu, g) %1.5 GNP dolgulu numuneler.....	63
<b>Şekil 4.7:</b> Çentiksiz Charpy darbe testi sonrası hasarlı numuneler, a) Dolgusuz, b) %0.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu, c) %1 TiO <sub>2</sub> dolgulu, d) %1.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu, e) %0.5 GNP dolgulu, f) %1 GNP dolgulu, g) %1.5 GNP dolgulu numuneler. ....	66
<b>Şekil 4.8:</b> 10 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait ortalama sürtünme katsayıları grafiği. ....	68
<b>Şekil 4.9:</b> 20 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait ortalama sürtünme katsayıları grafiği. ....	68
<b>Şekil 4.10:</b> 30 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait ortalama sürtünme katsayıları grafiği. ....	69
<b>Şekil 4.11:</b> 10 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait kayma mesafesi-arayüz sıcaklıkları grafiği. ....	70
<b>Şekil 4.12:</b> 20 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait kayma mesafesi-arayüz sıcaklıkları grafiği. ....	71
<b>Şekil 4.13:</b> 30 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait kayma mesafesi-arayüz sıcaklıkları grafiği. ....	71
<b>Şekil 4.14:</b> Dolgusuz numuneye ait elyaf ve matris yapıları SEM görüntüsü. ....	75
<b>Şekil 4.15:</b> %0.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu numuneye ait SEM görüntüsü.....	75
<b>Şekil 4.16:</b> %1 TiO <sub>2</sub> dolgulu numuneye ait SEM görüntüsü. ....	76
<b>Şekil 4.17:</b> %1.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu numuneye ait SEM görüntüsü. ....	76
<b>Şekil 4.18:</b> Matris bölgelerinin EDX analiz görüntüsü, a) %0.5 TiO <sub>2</sub> , b) %1 TiO <sub>2</sub> , %1.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu numuneler. ....	77
<b>Şekil 4.19:</b> %0.5 GNP dolgulu numuneye ait SEM görüntüsü. ....	78
<b>Şekil 4.20:</b> %1.5 GNP dolgulu numuneye ait SEM görüntüsü. ....	79
<b>Şekil 4.21:</b> %1.5 TiO <sub>2</sub> dolgulu numunenin 30 N yük, 150 °C sıcaklık ve 2 m/s kayma hızında 50 dk boyunca süren aşınma testi sonrası disk yüzeyinin SEM ve EDX analizi görüntüsü. ....	80
<b>Şekil 4.22:</b> Disk yüzeyinde nadir olan polimer kalıntılı bölge SEM ve EDX analizi görüntüsü. ....	81
<b>Şekil 4.23:</b> Dolgusuz kompozit numunelerin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri, a) 10 N-150 °C, b) 30 N-150 °C.....	82
<b>Şekil 4.24:</b> TiO <sub>2</sub> dolgulu kompozit numunelerin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri, a) 30 N-150 °C- %0.5 TiO <sub>2</sub> , b) 30 N-150 °C- %1TiO <sub>2</sub> , c) 30 N-150 °C- %1.5 TiO <sub>2</sub> .....	83
<b>Şekil 4.25:</b> GNP dolgulu kompozit numunelerin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri, a) 30 N-150 °C- %0.5 GNP, b) 30 N-150 °C- %1GNP, c) 30 N-150 °C- %1.5 GNP.....	84

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

<b>A<sub>0</sub></b>	: Numune orta bölgesi ilk kesit alanı
<b>a<sub>cU</sub></b>	: Charpy darbe dayanımı
<b>b</b>	: Numune genişliği
<b>d</b>	: İz çapı
<b>E</b>	: Kırılma enerjisi
<b>E<sub>c</sub></b>	: Numune kırılırken absorbe ettiği enerji
<b>E<sub>ç</sub></b>	: Elastisite modülü
<b>F</b>	: Kuvvet
<b>F<sub>N</sub></b>	: Yük
<b>g</b>	: Yerçekimi ivmesi
<b>h</b>	: Numune kalınlığı
<b>l</b>	: Numunenin uzamadan sonraki boyu
<b>L</b>	: Destek mesfesi
<b>l<sub>0</sub></b>	: Numune ilk boyu
<b>L<sub>p</sub></b>	: Sarkaç uzunluğu
<b>M</b>	: Çekiç ağırlığı
<b>m</b>	: Kütle
<b>n</b>	: Devir sayısı
<b>P</b>	: Çekme kuvveti
<b>R</b>	: Hareketli kafa hızı
<b>R<sub>a</sub></b>	: Yüzey pürüzlülüğü
<b>S</b>	: Kayma mesafesi
<b>V</b>	: Hız
<b>v</b>	: Hacim
<b>V<sub>c</sub></b>	: Dönme hızı
<b>W</b>	: Spesifik aşınma oranı
<b>Z</b>	: Dış elyaf gerilme hızı
<b>α</b>	: Düşme açısı
<b>β</b>	: Yükselme açısı
<b>Δl</b>	: Numunedeki uzama miktarı
<b>Δm</b>	: Aşınan kütle

$\varepsilon$	: Gerinim
$\sigma_c$	: Çekme gerilmesi
$\mu$	: Sürtünme katsayısı
$\rho$	: Yoğunluk
$\varnothing$	: Çap
<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>AFM</b>	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alüminyum Oksit
<b>AISI</b>	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
<b>ASTM</b>	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
<b>CNC</b>	: Bilgisayarlı Nümerik Kontrol
<b>DETPK</b>	: Doğal Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit
<b>dwg</b>	: Drawing
<b>EDX</b>	: Enerji Yayılımlı X Işını
<b>Fe</b>	: Demir
<b>GNP</b>	: Grafen Nanoplatelet
<b>HDI</b>	: Hekzametilen Diizosiyanat
<b>IPDI</b>	: İzoforon Diizosiyanat
<b>ISO</b>	: Uluslararası Standart Organizasyonu
<b>K</b>	: Potasyum
<b>MDI</b>	: Metilen Difenil Diizosiyanat
<b>Mg</b>	: Magnezyum
<b>MoS<sub>2</sub></b>	: Molibden Disülfid
<b>M.Ö.</b>	: Milattan Önce
<b>Na</b>	: Sodyum
<b>NCO</b>	: İzosiyanat
<b>NFC</b>	: Doğal Elyafli Kompozitler
<b>NH<sub>2</sub></b>	: Amin
<b>OH</b>	: Hidroksil
<b>Ort.</b>	: Ortalama
<b>pH</b>	: Power of Hydrogen
<b>PMK</b>	: Polimer Matrisli Kompozit
<b>PU</b>	: Poliüretan
<b>PUr</b>	: Poliüre

<b>SAO</b>	: Spesifik Aşınma Oranı
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SiC</b>	: Silisyum Karbür
<b>TiO<sub>2</sub></b>	: Titanyum Dioksit
<b>UD</b>	: Tek Yönlü
<b>UV</b>	: Ultraviyole
<b>VDRTK</b>	: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
<b>WF</b>	: Dokunmuş Kumaş Elyaf
<b>YBBO</b>	: Yıllık Birleşik Büyüme Oranı



# ÖZET

Doktora Tezi

## DOĞAL LİF TAKVİYELİ PARTİKÜL DOLGULU POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Yusuf Eren ERDOĞDU

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

96+xii sayfa

2020

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

Bu çalışmada, genellikle inşaat sektöründe yalıtım amaçlı kullanılan ve bir elastomer olan poliaspartik poliüre malzeme, matris olarak kullanılarak nano dolgulu doğal elyaf takviyeli kompozitler üretilmiştir. Nano dolgu olarak ağırlıkça farklı oranlarda TiO<sub>2</sub> ve GNP kullanılırken, doğal elyaf olarak yıllık bir bitki olan jütün liflerinden dokunmuş, düz örgü tipi kumaş kullanılmıştır. Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemiyle kompozit plakalar üretilmiş ve bu yöntemle GNP dolgulu kompozitler üretirken karşılaşılan güçlüklerle bazı değişiklikler yaparak çözüm üretilmeye çalışılmıştır. Üretilen plakalardan uygun ebatlarda numuneler kesildikten sonra mekanik özellikleri incelemek amacıyla oda sıcaklığında çekme, üç nokta eğilme, kenara dik ve yüzeye dik çentiksiz charpy darbe testleri uygulanmıştır. Tribolojik özellikleri incelemek amacıyla ise farklı yüksek sıcaklık seviyelerinde ve farklı yükler altında pim-disk tipi bir tribotest cihazı kullanılarak aşınma testleri uygulanmıştır. AISI 4140 ıslah çeliği karşı yüzeyinde, kuru sürtünme ortamında yürütülen aşınma testleri sırasında termal kamera yardımıyla ara yüz sıcaklıkları takip edilmiştir. Sürtünme katsayılarındaki değişim yük hücresi yardımıyla takip edilmiştir. Ayrıca aşınmadan dolayı gerçekleşen ağırlık kaybı hassas terazi yardımıyla takip edilerek spesifik aşınma oranları hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen veriler kıyaslanarak yorumlanmıştır. Testler sonrasında çekme testi numunelerinin kopma hasarlı bölgelerinde, aşınma testi numunelerinin temas yüzeylerinde ve metal karşı yüzeyde taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji yayımlı X-ışını (EDX) analizleri yapılarak farklı dolgu oranlarının mekanik ve tribolojik özelliklere etkileri morfolojik ve yapısal olarak yorumlanmıştır.

Poliaspartik poliüre matrisine nanodolgu yapılmasının belirli optimal durumlarda kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Poliüre, Doğal elyaf takviyeli kompozit, Nano dolgu, Vakum destekli reçine transfer kalıplama, Yüksek sıcaklıkta aşınma

## ABSTRACT

Phd. Thesis

### INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL BEHAVIORS OF NATURAL FIBER REINFORCED PARTICLE FILLED POLYMER MATRIX COMPOSITES

Yusuf Eren ERDOĞDU

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

96+xii pages

2020

Supervisor: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

In this study, nano-filled natural fiber reinforced composites were produced by using polyaspartic polyurea material, which is an elastomer and generally used for insulation purposes in the construction industry, as a matrix. Different proportions of TiO<sub>2</sub> and GNP were used as nano fillers, and plain weave type fabric, woven from an annual plant, jute fibers, was used as natural fibers. Composite plates were produced by the vacuum-assisted resin transfer molding method and a solution was tried to be created by making some changes to the difficulties encountered while producing GNP filled composites with this method. Tensile, three-point bending, unnotched edgewise and flatwise charpy impact tests were applied to examine the mechanical properties after cutting samples in appropriate sizes from the produced plates. In order to examine the tribological properties, wear tests were carried out using a pin-on-disc type tribotest device at different high temperature levels and different loads. During wear tests carried out in dry friction environment on the AISI 4140 steel counter surface, the change in the interface temperatures were monitored with the help of a thermal camera. The change in friction coefficients were followed by using load cell. In addition, weight loss due to wear was monitored with the help of precision scales and specific wear rates were calculated. Then the obtained data were compared and interpreted. After the tests, scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray (EDX) analyzes were performed on the tensile damaged areas of the tensile test specimens, the contact surfaces of the wear test specimens and the metal counter surface, and the effects of different filling ratios on the mechanical and tribological properties were interpreted morphologically and structurally.

It has been observed that nano-filling of polyaspartic polyurea matrix improves the mechanical and tribological properties of composites in certain optimal conditions.

**Keywords:** Polyurea, Natural fiber reinforced composite, Nanofiller, Vacuum assisted resin transfer molding, High temperature wear

## 1.GİRİŞ

Tarih boyunca, insanlar ihtiyaçları doğrultusunda kullanabilecekleri malzemelerin arayışı içinde olmuştur. Öyle ki, bu arayışların sonunda kullanılan malzemeler tarih öncesi çağlara isim dahi olabilmıştır. Taş devri (kabataş, yontma taş ve cilalı taş), maden devri (bakır, tunç, demir) gibi tarihsel süreçler, insanların dünyadaki serüveninde ihtiyaç duydukları ve kullandıkları malzemelerle tarih sayfasında nasıl ilerledikleri arasındaki ilişkiyi net olarak gösterebilecek örneklerdir. Bir yandan ihtiyaçlar için yeni malzemeler kullanılırken, diğer yandan kullanılan yeni malzemeler yeni ihtiyaçların doğmasına neden olmuştur. Bu döngü günümüzde de devam etmektedir. Teknoloji her geçen gün ilerlemekte ve bu ilerleyiş yeni arayışları da beraberinde getirmektedir. Geçmişte olduğu gibi günümüzde de mühendislik malzemelerinden genellikle bir çok şartı aynı anda sağlaması ve tek bünyede bulundurması, multi fonksiyonel olması beklenmektedir. Bu beklenti kompozit malzemelerin ortaya çıkmasında ve geliştirilmesinde önemli rol oynamıştır. Kompozitlerin tanımı da bunu karşılayacak şekilde, istenilen uygulama alanına göre bir araya getirilmiş ve birbirinde çözünmeyen iki veya daha fazla fazdan oluşan, mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklere sahip multifonksiyonlu malzemeler olarak yapılabilir [1].

İnsanoğlu ilk olarak doğada hazır bulunan ağaç, kemik gibi kompozit yapıları kullanmaya başlasa da daha sonra kendi ihtiyaçları doğrultusunda kompozit yapılar üretmeye başlamıştır. M.Ö. 1500 yıllarında Mısırlıların ve Mezopotamyalıların çamur ve samanı kullanarak kerpiç malzeme ile ev yapmaları, M.Ö. 300'lü yıllarda Büyük İskender'in kullandığı, keten ve doğal yollarla elde edilen yapıştırıcı kullanılarak bugünkü adıyla elle yatırma yöntemi uygulanarak yapılan linotorax zırhı, üretilen kompozit malzemelere örnek olarak gösterilebilir. 20. yüzyılda epoksi gibi sentetik reçinelerin ve cam elyaf, karbon elyaf, aramid gibi sentetik takviyelerin kullanılmaya başlamasıyla birlikte çok üstün özellikli kompozitler üretilmeye başlanmıştır. Ancak, sentetik bileşenli kompozitlerin kullanımlarının yaygınlaşması çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Kullanım ömrünü tamamlayan kompozit yapıların atıklarının doğa üzerinde oluşturacağı tahribat, üzerine düşünülmesi gereken bir gündem haline gelmiştir. Bu noktada geriye dönüş yaşanmış ve bahsedilen atık kütleinin tamamının veya bir kısmının eski dönemlerdeki gibi

biyobozunur malzemelerden oluşturulması ve çevre dostu kompozitler üretilmesi fikri yaygınlaşmaya başlamıştır.

## 1.1 Kapsam

Bu çalışmanın motivasyonunu oluşturan en önemli etmenlerden biri de çevresel kaygılardır. Bu nedenle yıllık bir bitki olan jüt lifleriyle (elyaflarıyla) elde edilmiş düz örgü tipi kumaşlar, takviye fazı olarak kullanılarak kompozit üretimi yapılmıştır. Diğer yandan, jüt gibi doğal elyafların dış ortam şartlarındaki ultraviyole (UV) dayanımı gibi zayıf olan özelliklerinin kullanım alanlarını sınırlandırması ve polimer matris olarak kullanılan epoksi gibi reçinelerin de aynı ortamda benzer zayıflıklar göstermesi kompozit üretiminde sınırlı olarak kullanılan poliaspartik poliüre malzemenin matris malzemesi olarak denenmesi fikrini doğurmuştur. Ayrıca poliaspartik poliüre matrisin mekanik ve tribolojik özelliklerini daha da geliştirebilmek için grafen nanoplatelet (GNP) ve titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) dolgular ağırlıkça farklı oranlarda uygulanarak kompozitler üretilmiştir. Dolgu yapıldıktan sonra yükselen viskoziteye rağmen çok büyük elemanların dahi verimli şekilde üretilebildiği vakum destekli reçine transfer kalıplama (VDRTK) metodu ile kompozitlerin üretilebilirliği denenmiştir. Üretilen kompozitlerin farklı nano dolgular için dolgu oranına göre mekanik özellikleri ve yine aynı malzemeler için farklı sıcaklıklardaki tribolojik davranışları incelenmiştir. Bu durumda çalışma literatürde incelendiği kadarıyla bir çok noktada ilkleri içerir duruma gelmiştir:

- Çalışmada ilk olarak doğal elyaf takviyeye sahip ve poliüre matrisin kullanıldığı kompozit üretilmiştir.
- İlk olarak VDRTK metodu uygulanarak poliüre matrisli kompozit üretilmiştir.
- İlk defa poliüre matrisle doğal elyaf takviye ve nanodolgu bir arada kullanılarak kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir.
- İlk olarak poliüre matrisli kompozitin yüksek sıcaklık uygulamalarındaki tribolojik davranışları incelenmiştir.

## 1.2 Hipotez

Çalışmanın hipotezi aşağıdaki maddelerle açıklanabilir:

- Elyaf takviyeli kompozitlerde elastomer sınıfindan malzemeler matris olarak kullanılabilir.

- Doğal elyaf takviyeli poliüre matrisli kompozitler üretilebilir.
- Bu kompozitler vakum destekli reçine transfer kalıplama (VDRTK) metodu ile üretilebilir ve bu sayede büyük boyutlu parçaların üretimi sağlanabilir.
- Bu kompozitlerde nano dolgu yapılarak matris modifikasyonu ile mekanik ve tribolojik özellikleri geliştirilebilir.
- Bu maddelerin toplamında dış koşullara ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı kompozitler geliştirilebilir.

### 1.3 Amaç

Çalışmanın amacı, kurulan hipotezi doğrularak dış ortam koşullarına dayanıklı, büyük kütlelerde üretim yapılabilen ve bu kütlelerin azımsanamayacak bir bölümünün biyobozunur malzemelerle oluşturulmuş çevre dostu kompozitler üretilmesini sağlamaktır.

Çalışmanın literatüre önemli bir katkı yapacağı ve kompozit üretiminde gerek doğal elyaf gerekse de poliüre (PUr) matris kullanımını yaygınlaştıracığı düşünülmektedir.

## 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, bileşenlerinin tek başına kullanıldığı hallerinden daha iyi özelliklerle sonuçlanan iki veya daha fazla malzemenin bir kombinasyonu olduklarından [2], kompozit malzemelerle polimer, metal veya seramiklerle tek başına elde edilemeyecek karma özellikler elde edilebilir [3]. Kompozitlerde bileşenlerden biri takviye fazı olarak adlandırılır ve takviye fazının içine gömüldüğü faza ise matris adı verilir. Takviye fazı malzemesi lifler, parçacıklar veya pullar halinde olabilirken matris fazını oluşturan malzemeler genellikle sürekli malzemelerdir [4]. Kompozitler matris malzemesine göre, polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve karbon matrisli kompozitler olarak sınıflandırılabilir [5]. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde polimer matrisli kompozitlere değinilecektir.

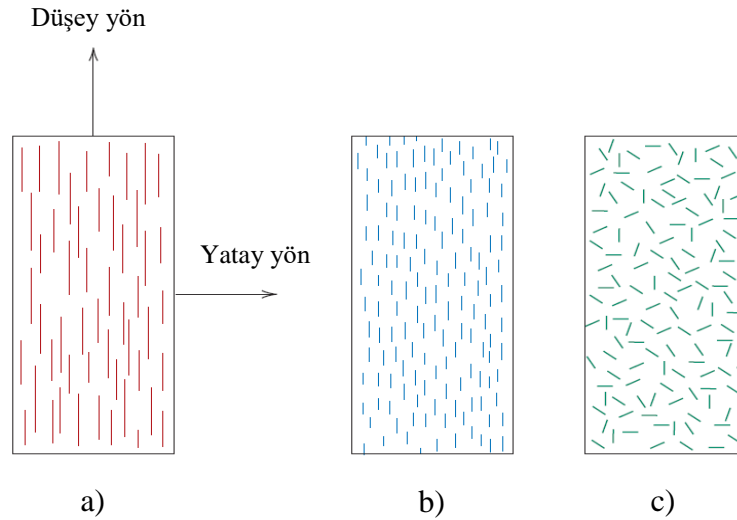
### 2.1 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimerler nispeten zayıf, düşük sertlikli malzemelerdir. Yapısal uygulamalar için kabul edilebilir mekanik özelliklere sahip malzemeler elde etmek için, bunların sürekli veya süreksiz elyaflarla takviye edilmesi gerekir [5]. Polimer matrisli kompozit (PMK) malzemeler, matris olarak organik polimer ve takviye olarak elyaf kullanılan malzemelerdir [6]. Polimerler, çeşitli bileşenlerde mühendislik sistemleri ve yapısal malzemeler olarak giderek artan sayıda uygulamalarda yer almaktadır [7]. Bu malzemelerin oda sıcaklığındaki üstün özelliklerinin yanında üretimlerinin kolay olması ve düşük maliyetli olmaları onları, kompozit uygulamalarında en yaygın ve fazla miktarda kullanılan grup yapmıştır [8]. Kompozitlerde takviye, elyaflar ve dolgu maddeleri şeklinde olabilir [9]. Elyaf takviyeli bir kompozitte, elyaflar yükü taşıırken, matris, yükün aktarılması için ortam görevi görür ve elyafları istenen yerde ve yönde tutar, aralarında bir yük aktarım ortamı oluşturur ve onları çevresel hasarlardan korur [7,10-12]. Elyaf matrise güç sağlayıp kompozitlerin mekanik özelliklerini artırır [9]. Bu mekanik özellikler, çok bileşenli bir kompozit sistem haline getirilmesi suretiyle, dolgu malzemesi olarak üçüncü bir fazın eklenmesiyle daha da artırılabilir [7]. Dolgu maddeleri eklenmesi, termal direnci, stabiliteyi, mukavemeti, aşınma direncini, gözenekliliği ve termal genleşme katsayısını artırabilir. Dolgular ana bileşenler olabilir veya elyaflara ek olarak eklenebilir. Ayrıca neredeyse her temel reçine özelliğini değiştirebilir veya elyaflı kompozitin özelliklerini geliştirebilir. Kompozitlerden beklenen

özelliklerin sağlanabilmesi için elyaf ve dolgu maddesinin uygun olarak seçilmesi önemlidir [9].

### 2.1.1 Elyaf takviye malzemeleri

Son bir kaç onyılıda elyaf taviyeli polimer kompozitlerin kullanımında yüksek bir artış meydana gelmiştir. Bu artışa, polimer ve elyafın uygun kombinasyonlarının düşük maliyetlerde yüksek performans, çok yönlülük ve işleme avantajları sağlamaları neden olmuştur [13,14]. PMK'ler genellikle elyaf takviyeler ile desteklenir. Elyaf takviyeler süreksiz halde veya sürekli halde bulunabilir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi süreksiz elyaflar kompozit içerisinde gelişigüzel dağılmış veya bir düzene bağlı olarak yönlendirilmiş olabilirken; sürekli elyaf takviyeler düzenli yönlendirilmiş (hızalı) şekilde bulunurlar. Sürekli elyaflar yön olarak tek yönlü, iki yönlü veya çok yönlü şekilde olabilir.



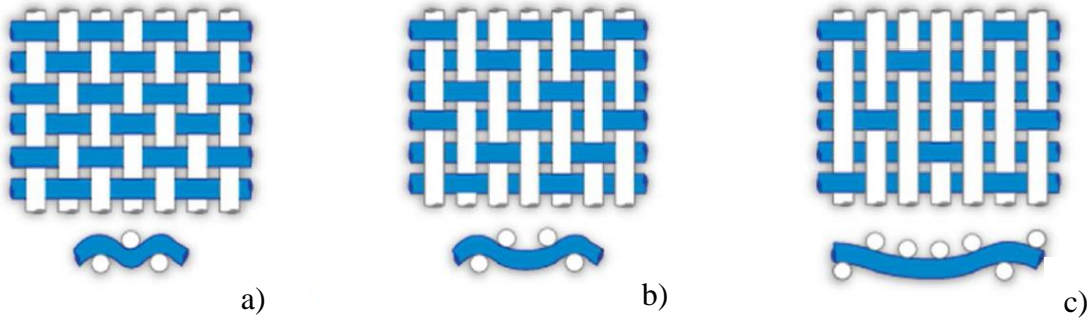
**Şekil 2.1:** Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimleri a) sürekli ve hizalı, b) süreksiz ve hizalı, c) süreksiz ve gelişigüzel yönlendirilmiş takviyeler [8].

Sürekli elyafları istenen yönde istenen özellikleri sağlayabilecek duruma getirebilmek için tek yönlü (UD) tabakalar üst üste dizilerek lamine kompozitler üretilir veya dokunmuş kumaş elyaf (WF) takviyeler kullanılır.

Yapısal uygulamalar için tek yönlü tabakalardan üretilen geleneksel lamine kompozitler, yüksek özgül sertlik ve yüksek özgül mukavemet ile karakterize edilir. Ancak bu kompozitler, daha düşük enine gerilme mukavemetleri nedeniyle darbe hasarına karşı oldukça hassastır. PMK'lerin darbe davranışını iyileştirmenin yollarından biri, tek yönlü katmanlar yerine WF katmanları kullanmaktır. WF, çözgü ve atkı iplerinin birbirine geçmesiyle kumaşın oluşturulduğu, dokuma işlemiyle üretilen bir kumaştır. Kumaşın

entegre doğası, dengeli düzlem içi özellikler sağlar. WF kompozitler, yüksek kırılma tokluğu ve kullanım kolaylığı ile öne çıkarlar. WF kompozitlerinin enine gerilme mukavemeti, UD kompozitlerinininkinden çok daha yüksektir. Bu, WF kompozitlerin üstün darbe direncine sahip olmalarının nedenlerinden biridir [15]. WF kompozitlerinde atkı ve çözgüler farklı elyaflardan oluşabilir. Böylece hibrit dokuma kumaşlar ile de kompozit üretimi mümkün hale gelir.

WF'lerin farklı dokuma tipleri vardır. Düz (bezayağı) örgü, dimi örgü ve saten örgü olarak Şekil 2.2'de görüldüğü gibi 3 ana dokuma tipi bulunur. Bu dokuma tipleri türetilerek oluşturulan çok sayıda dokuma tipi mevcuttur. Yüksek performanslı kompozitlerde kullanılan muhtemel en yaygın iki dokuma tipi, düz ve saten dokumalardır [2].



**Şekil 2.2:** Yaygın kullanılan dokuma tipleri a) düz (bezayağı) örgü, b) dimi örgü, c) saten örgü [16].

WF kompozitleri, gelişmiş darbe direnci, olağanüstü termal direnç, yorulma direnci, korozyon direnci ve daha iyi dengelenmiş özellikler sağlar. Dahası, WF kompozitlerinin kullanımı ve imalatı UD kompozitlere kıyasla daha kolay ve daha ucuzdur. WF kompozitleri oluşturmak için kullanılan tekstil dokuma prosesleri, nispeten kolaydır, uygun maliyetlidir ve daha kısa sürede daha büyük hacimler üretmeye olanak sağlar [17].

Bununla birlikte, bu kompozitlerin karmaşık mimarisi, ürün tasarımı için gerekli mekanik tepkinin tahmin edilmesinde zorluklara yol açar. Özellikle, karmaşık yapıları, dalgalanmaları, arayüzleri ve farklı yükleme koşulları altında anlaşılması zor davranışları, yapısal tasarım için temel özelliklerinin değerlendirilmesinin zorlaşmasına neden olur [17].

WF kompozitlerinin benzersiz bir özelliği, istenilen özelliklerini muhafaza ederek karmaşık eğriliklere uyacak şekilde kalıplanabilme yetenekleridir. Dokuma tipindeki değişim, elyafların mekanik olarak birbirine kenetlenmesini kontrol eder; bu, bir kompozitin "örtümünü" (kumaşın kalıbın şekline uyma yeteneğini) tanımlayan özelliktir. Benzer

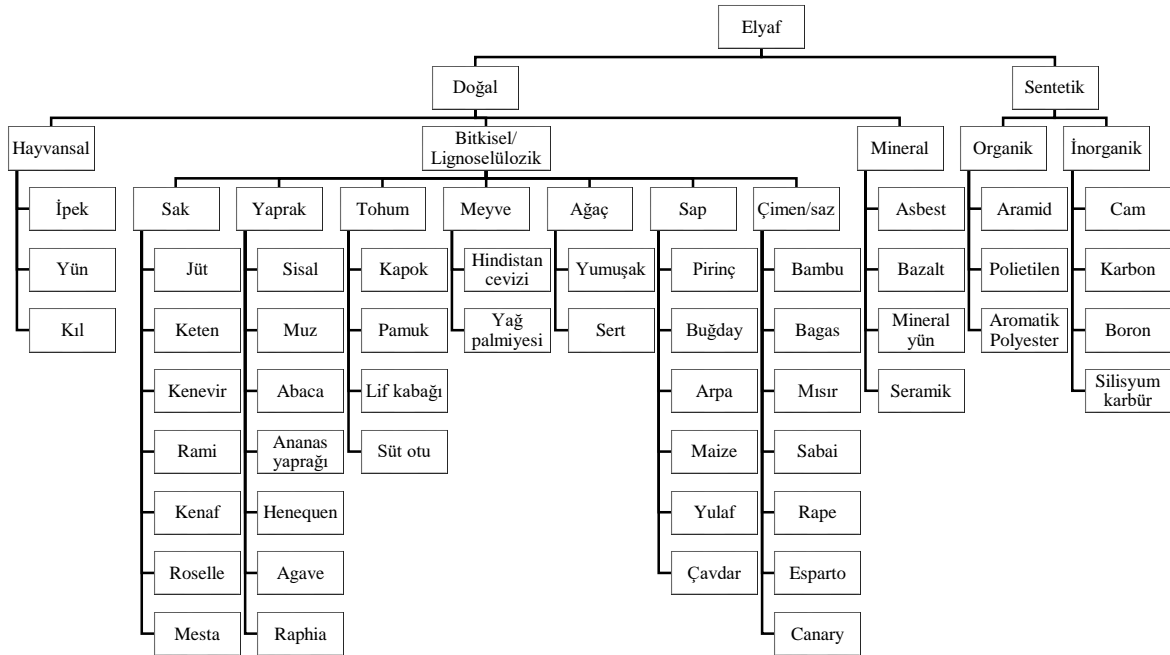
şekilde, hem yüzeyin pürüzsüzlüğü hem de kararlılık, ağırlıklı olarak dokuma tipinden etkilenen özelliklerdir [17]. Çizelge 2.1'de en sık kullanılan dokuma tipleri ve bazı özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

**Çizelge 2.1:** Dokuma tipleri ve özelliklerinin karşılaştırılması [17].

Dokuma tipi	Kararlılık	Örtüm	Gözeneklilik	Pürüzsüzlük	Simetri	Düşük kıvrımlılık
Düz	++++	++	+++	++	+++++	++
Dimi	+++	+++	++++	+++	+++	+++
Saten	++	+++++	+++++	+++++	+	+++++

+++++ = Mükemmel, ++++ = İyi, +++ = Kabul Edilebilir, ++ = Zayıf, + = Çok Zayıf

Düz dokumalar, diğer örgü türlerine göre daha fazla birim alan başına düşen geçmeye sahip olduklarından en sıkı temel kumaş tasarımlardır ve düzlem içi kayma hareketine en dayanıklı olanlardır. Bu nedenle, düz dokumalar, kullanım sırasında bozulmaya direnirler, ancak karmaşık konturlarda kullanılmaları zor olabilir. Ayrıca empenye sırasında ıslatılması daha zordur. Düz örgünün bir başka dezavantajı, her bir iplik tarafından sık sık yapılan yukarıdan aşağıya doğru konum değişimleridir. Bu dalgalanma veya iplik kıvrımı, kompozitin mukavemetini ve sertliğini azaltır [2]. Şekil 2.3'te elyafların sınıflandırılması sunulmuştur.



**Şekil 2.3:** Doğal ve sentetik elyafların sınıflandırılması [18,19].

Şekil 2.3'ten görüldüğü gibi, elyafları malzeme kökenlerine göre doğal ve sentetik elyaflar olarak 2 ana gruba ayıracak şekilde sınıflandırabiliriz. Özellikle bitkisel elyaflar bölgesel özgünlüklere göre daha da çeşitlendirilerek sınıflandırma genişletilebilir.

Elyafların kullanım sürecine bakılırsa, önce doğal elyafların kullanıldığını ve çok daha sonra sentetik elyafların kullanıma başladığı görülür. Ancak, çevresel kaygılar gibi bazı etmenler doğal elyafların kullanımının tekrar güncel olmasını sağlamıştır.

Lignoselülozik elyaflar, polimerik malzemelerle birlikte 3000 yıldan fazla bir süredir takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli plastiklerle ilgili çalışmalar, 1908'de fenolikler içinde selüloz malzeme kullanılması ile başlayıp daha sonra üre ve melamin kullanımı ile genişlemiştir ve cam elyaf takviyeli plastiklerin kullanımıyla birlikte hammadde statüsüne ulaşmıştır. Pamuk-polimer kompozitler, ordu tarafından radar uçakları için kullanılan ilk elyaf takviyeli plastiklerdir. En eski örneklerden biri (1950) Doğu Alman Trabant arabasıdır ve çerçevesi pamuk elyaflarıyla güçlendirilmiş polyesterden yapılmıştır [18].

#### **2.1.1.1 Doğal elyaf takviye malzemeleri**

Çevresel duyarlılığın ve toplumsal ilginin artması, yeni çevre düzenlemeleri ve petrol tüketiminin sürdürülemez olması çevre dostu malzemelerin kullanımı düşüncesini güçlendirmiştir. Doğal elyaflar da, sentetik elyaflarla karşılaştırıldıklarında iyi özelliklere sahip, çevre dostu malzemeler olarak kabul edilmektedir [20].

Dünya çapında doğal elyaf takviyeli kompozit endüstrisi sektörünün 2010 yılında 2.1 milyar ABD dolarına ulaştığı tespit edilmiştir [20]. NFC (Natural Fiber Composites) Endüstri Raporuna göre, küresel doğal elyaf takviyeli kompozit pazar büyüklüğü 2016'da 4.46 milyar ABD doları olarak değerlendirilirken 2024'e kadar %11.8'lik bir yıllık birleşik büyüme oranı (YBBO) ile 10.89 milyar ABD doları olacağı tahmin edilmektedir [21].

Doğal elyaflar düşük maliyetli, düşük yoğunluklu, yüksek özgül özelliklere sahip elyaflardır. Takviye malzemesi olarak kullanılan diğer elyafların aksine, biyobozunurdurlar ve aşındırıcı değildirler. İyi termal ve ses izolasyon özellikleri vardır. Aynı zamanda, kolay elde edilebilmeleri, kabul edilebilir özgül mukavemetlerinin, tokluklarının, sertliklerinin ve kendilerine has özelliklerinin bulunması, onları cam elyaf gibi kullanılan diğer elyaf takviyelerle rekabet edebilir hale getirmiştir [22-27]. Hafifliklerinin yanında ses absorbe etme etkinliklerinin fazla olması, özellikle otomotiv sektöründe tercih edilme

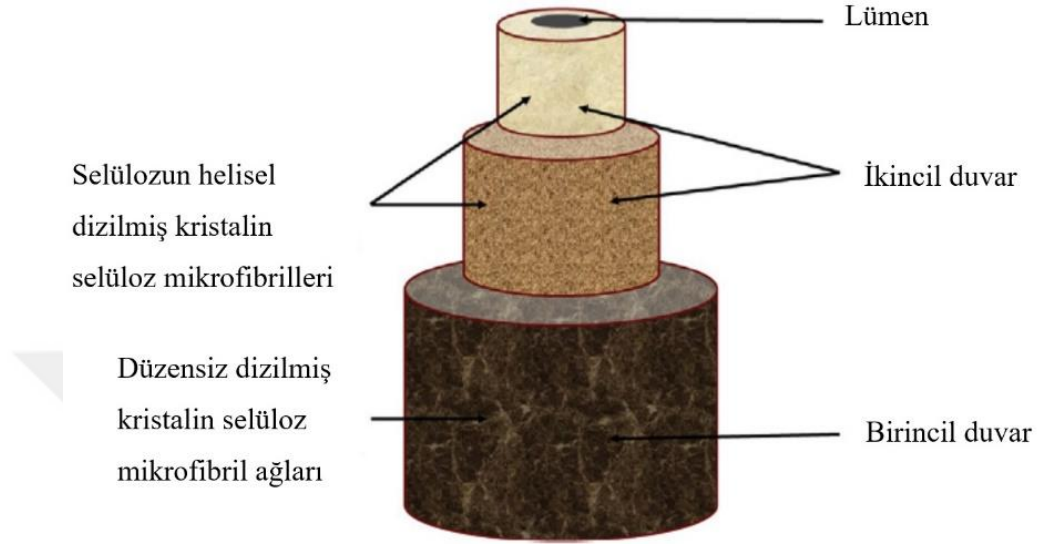
nedenlerindedir. Üstelik otomotiv parçalarında, bu tür elyaflarla üretilen kompozitler yalnızca bileşenin kütlesini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda üretim için gereken enerjiyi de %80 oranında azaltmaktadır [28].

Doğal elyafların kimyasal bileşimleri, elyaf türüne göre değişiklik gösterir. Elyaflar selüloz, hemiselüloz, pektin ve lignin içerir. Her bir bileşenin özellikleri, elyafın toplam özelliklerine katkıda bulunur. Hemiselüloz, elyafın biyobozunurluğundan, nem almasından ve en az termal direnç gösteren bileşen olduğu için ısıl bozunmasından sorumluyken; lignin, termal olarak kararlıdır, ancak UV bozunmasından sorumludur. Bu bileşenlerin her birinin yüzde bileşimi, elyaflara göre farklılık gösterir. Genel olarak elyaflar %60-80 selüloz, %5-20 lignin ve %20'ye kadar da nem içerirler [22]. Çizelge 2.2'de bazı doğal elyafların kimyasal içerikleri verilmiştir [28].

**Çizelge 2.2:** Bazı doğal elyafların kimyasal içerikleri [28].

<b>Elyaf</b>	<b>Selüloz Ağırlıkça%</b>	<b>Lignin Ağırlıkça%</b>	<b>Hemiselüloz Ağırlıkça%</b>	<b>Pektin Ağırlıkça%</b>	<b>Mum Ağırlıkça%</b>	<b>Nem içeriği Ağırlıkça%</b>
<b>Jüt</b>	61-71.5	12-13	13.6-20.4	0.4	0.5	12.6
<b>Kenevir</b>	70.2-74.4	3.7-5.7	17.9-22.4	0.9	0.8	10
<b>Kenaf</b>	31-39	15-19	21.5	-	-	-
<b>Keten</b>	71	2.2	18.6-20.6	2.3	1.7	10
<b>Rami</b>	68.6-76.2	0.6-0.7	13.1-16.7	1.9	0.3	8
<b>Sisal</b>	67-78	8-11	10-14.2	10	2	11
<b>Henequen</b>	77.6	13.1	4-8	-	-	-
<b>Pamuk</b>	82.7	-	5.7	-	0.6	-
<b>Kapok</b>	64	13	23	23	-	-
<b>Hindistan cevizi</b>	36-43	41-45	10-20	3-4	-	8
<b>Muz</b>	63-67.6	5	19	-	-	8.7
<b>Ananas yaprağı</b>	70-82	5-12	-	-	-	11.8

Doğal elyaflar Şekil 2.4'te gösterildiği gibi lümen, birincil duvar ve ikincil duvar olmak üzere 3 ana katmandan oluşurlar. Selüloz içeriği, birincil katmanlardan ikincil katmanlara doğru giderek artarken lignin içeriği azalır ve hemiselüloz miktarı ise her katmanda benzerdir [29].



**Şekil 2.4:** Doğal elyafların yapısı [30].

Doğal elyaf takviyeli polimer kompozit (DETPK)'lerin özellikleri, esas olarak elyaf takviyesinin fiziksel ve kimyasal yapısına bağlıdır. Doğal elyafların muhteviyatı (özellikle hemiselüloz, lignin, mumlar, pektin vb. gibi selüloz olmayan bileşenler) mekanik dayanımı önemli ölçüde etkiler. Selüloz olmayan bu bileşenlerin çıkarılması, kompozit malzemenin mekanik dayanımını artırır, çünkü bunların elyaf üzerinde bulunması elyaf ve matrisin birbirine bağlanma kabiliyetini azaltır [30]. Çizelge 2.3'te doğal elyafların mekanik özellikleri sunulmuştur.

Selüloz elyaflarda lignin bozunması 200 °C'de başlar. Başta selüloz olmak üzere diğer polisakkaritler de yüksek sıcaklıklarda oksitlenir ve bozunur. Doğal elyafların büyük çoğunluğu 160 °C'de dayanımlarını kaybederler [31]. Bu durum, doğal elyafları, yüksek kürlenme sıcaklığına sahip termosetlerle uyumsuz hale getirir ve düşük sıcaklık uygulamalarıyla sınırlar [32]. Doğal elyaflar çoğunlukla hidrofiliktir, bu durum hidrofobik matrislere bağlanma kabiliyetinin azalmasına yol açar [30,32,33]. Ayrıca sundukları mekanik özelliklerin değişkenliklerinin fazla olması, maksimum gerilme ve uzama değerlerinin düşük olması, ürün içinde hava kabarcıklarına neden olmaları, enjeksiyon

kalıplama makinasında nozül akışında sorunlara neden olmaları ve dış koşullara karşı zayıf direnç göstermeleri doğal elyafların bazı dezavantajlarıdır [32].

**Çizelge 2.3:** Doğal elyafların mekanik özellikleri [28].

Elyaf	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çap (µm)	Çekme dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)	Kopmadaki uzama (%)
Jüt	1.3-1.45	25-200	393-773	13-26.5	1.16-1.5
Kenevir	-	-	690	-	1.6
Kenaf	-	-	-	-	2.7
Keten	1.5	-	345-1100	27.6	2.7-3.2
Rami	1	-	400-938	61.4-128	1.2-3.8
Sisal	1.45	50-200	468-640	9.4-22	3-7
Pamuk	1.5-1.6	-	287-800	5.5-12.6	7-8
Kapok	-	-	-	-	1.2
Hindistan cevizi	1.15	100-450	131-175	4-6	15-40
Muz	-	-	1.7-7.9	-	1.5-9
Ananas yaprağı	-	20-80	413-1627	34.5-82.5	1.6

### Jüt Elyafı

Jüt elyafının mekanik ve fiziksel özellikleri, lifler üniform bir kesite sahip olduğundan oldukça tutarlıdır. Jüt elyafının yüksek düzeyde yönlendirilmiş zincir molekülleri, onu yük altında daha az uzayabilir hale getirir. Aynı zamanda jüt elyafı düşük ağırlığa ve neredeyse sentetik elyaflara eşit olan yüksek özgül mukavemet özelliğine sahiptir. Jüt takviyeli epoksi kompozitler, sentetik elyaf takviyeli kompozit malzemeler olan ikincil ve üçüncül yapı elemanlarının yerini yavaş yavaş almaktadır. Kompozit imalatında jüt elyafı kullanmanın dezavantajı, elyafın nispeten daha yüksek su emme kabiliyetine sahip olması ve yüksek yapısal yüklere dayanma kabiliyetinin daha az olmasıdır [34].

Jütün kayda değer gerilme mukavemetinin, düşük uzayabilirlik ve daha iyi nefes alabilirlik gibi özelliklerinin olması, sentetik malzemelere kıyasla uzun ömürlü ve tekrar kullanılabilir olmasını sağlar [35].

Jüt, corchorus cinsine ait yıllık bir bitkidir [36]. Piyasada capsularis (beyaz jüt) ve olitorious olmak üzere 2 tip jüt elyafı bulunur. Capsularis jüt, doğası gereği beyazımsıdır ve olitorious ise sarı, gri ve kahverengi olabilir [37]. Ağırlıklı olarak Hindistan ve Bangladeş'te yetiştirilen jüt, 2-3 aylık büyüme sonunda hasat edilir ve bu sırada boyu 3-5 metre civarındadır. Jüt, jüt sapı olarak bilinen özlü bir örtüye sahiptir ve lifler bu çekirdek etrafında uzunlamasına büyür. Jüt lifi, çürütme olarak bilinen bir işlemle özden ayrılır. Bu işlem, kesilmiş jüt saplarının birkaç hafta havuzlara yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Havuzdaki mikrobiyal etki jüt lifini yumuşatır ve tek tek lif ile öz arasındaki bağları zayıflatır. Elyaf demetleri daha sonra jüt çubuğundan elle sıyrılır ve kuruması için askılara asılır. Bu şekilde çok uzun elyaf demetleri elde edilebilir. Daha sonra elyaflar esnekliği artırmak için çeşitli yağlar veya yumuşatıcılarla işlenir, tekstil üretimi için uygun hale getirilir [36].

### **2.1.1.2 Sentetik elyaf takviye malzemeleri**

Sentetik elyaf takviyeli polimerler ilk olarak II. Dünya Savaşı'nın ardından cam elyaf takviyeli polimer kompozitler olarak ortaya çıkmıştır [38]. Cam elyafların düşük maliyeti, yüksek darbe direnci, yüksek çekme mukavemeti ve korozyon direnci, onları, kompozit uygulamalarında tercih nedeni yapmaktadır [2]. Boron, karbon ve aramid gibi daha yüksek mukavemetli, daha yüksek sertliğe ve daha düşük yoğunluğa sahip elyaflar ise 1960 ve 1970'li yıllarda uzay araştırmaları ve hava yolculuğunda daha zorlu koşullarla karşılaşılmasıyla doğan yüksek performans ihtiyaçlarını karşılayabilmek için ticarileştirilmiştir [38].

Cam elyafı, polimer matrisli kompozitlerde en yaygın kullanıma sahip olan elyaftır. Kendi içinde en yaygın çeşitleri E-camı ve S-camıdır. E- camı ucuzdur ve makul dayanıma sahiptir. S-camı ise pahalıdır ve yüksek çekme dayanımına sahiptir [3].

Karbon elyaflar çoğunluğu karbon atomlarından oluşan, yüksek sertlik, çekme mukavemeti, kimyasal direnç, sıcaklık toleransı gibi özelliklere sahip hafif ama pahalı elyaflardır [39].

Aramid elyafı yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Darbe dayanımı yüksektir. Balistik amaçlarla kullanımı yaygındır. Fakat çevresel koşullara direnci ve basma dayanımı zayıftır.

Boron elyafı çok pahalı bir elyaftır. Elyafların birer birer üretilmesi bunda etkilidir. Geniş çapa ve yüksek module sahip olduğu için sıkıştırılabilirlik özelliği çok üstündür. Ancak şekil vermesi ve işlemesi çok zor olduğundan karmaşık şekilli yapılar üretmeye uygun değildir [2].

Silisyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) elyafları yüksek elastik modüle sahiptir. Genellikle alüminyum (Al) ve magnezyum (Mg) gibi düşük yoğunluklu ve düşük modüllü metallere takviye olarak kullanılırlar [3]. Esas olarak seramik esaslı kompozitlerde kullanılırsalar da nadiren polimer kompozitlerde de kullanılırlar [2].

### 2.1.2 Matris malzemeleri

Kompozit malzemede elyafın istenilen performansı gösterebilmesi için matrisin de elyafa uygun olarak seçilmesi gereklidir. Matris seçilirken, polimerin doğal elyaflarla kimyasal ve fiziksel uyumunun yanı sıra, maliyet ve kullanım kolaylığı gibi unsurlar da göz önüne alınmalıdır [12].

Plastikler, değişen sıcaklık altındaki davranışlarına göre termoplastikler, termosetler ve elastomerler olarak sınıflandırılırlar. Ancak elastomerler sahip olduğu çapraz bağlardan dolayı genellikle termosetler içerisinde verilir.

Termoplastikler, termoset polimerlere göre birçok avantaj sunar. Termoplastik matrisli kompozitlerin avantajlarından biri, düşük işleme maliyetleridir. Bir diğeri, tasarım esnekliği ve karmaşık parçaların kalıplanmasının kolaylığıdır. Bu kompozitlerin işlenmesinde ekstrüzyon ve enjeksiyonla kalıplama gibi basit yöntemler kullanılmaktadır. Termoplastikte şimdiye kadar bildirilen çalışmaların çoğu, aspolietilen, polipropilen, polistiren ve poli vinil klorür gibi polimerlerle ilgilidir. Bunun başlıca nedeni, doğal elyafların termal bozunmasını önlemek için işlem sıcaklığının 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarla sınırlandırılmasıdır. Termoplastik kompozitler için, elyafların kompozitlerdeki dağılımı da üründe tutarlılık sağlamada önemli bir parametredir. Termoplastik kompozitler esnek ve dayanıklıdır, iyi mekanik özellikler sergilerler. Bununla birlikte, elyaf yükleme yüzdesi kompozitin işlenebilirliği ile sınırlıdır. Kompozitlerdeki elyaf dizilimi rastgeledir ve bu nedenle özellik modifikasyonu termoset kompozitlerde gözlemlendiği kadar yüksek değildir [22].

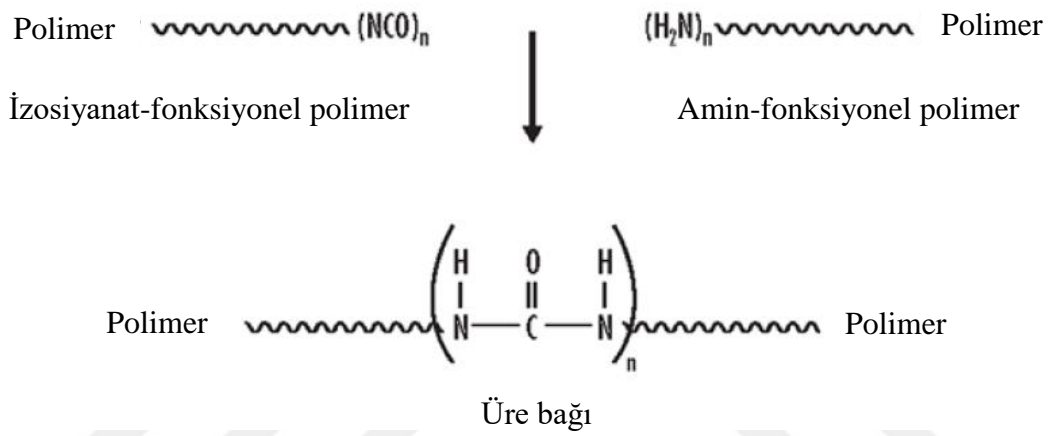
Doğal elyaflar için hâlihazırda matris olarak kullanımı hakim olan termoplastik malzemeler polipropilen, polietilen ve polivinil klorür iken, fenolikler ve polyesterler gibi termosetler de yaygın olarak kullanılan matrislerdir [28].

Elyaf takviyeli kompozit üretiminde termoset polimerler daha çok tercih edilmektedir [12]. Termosetlerin zincirleri arasında çok sayıda çapraz bağ bulunduğu için termoplastikler gibi ısı verilip tekrar kullanılabilir hale getirilemezler. Sertleştikten sonra yüksek ısıya maruz kalınca bozunurlar.

### 2.1.2.1 Poliüre

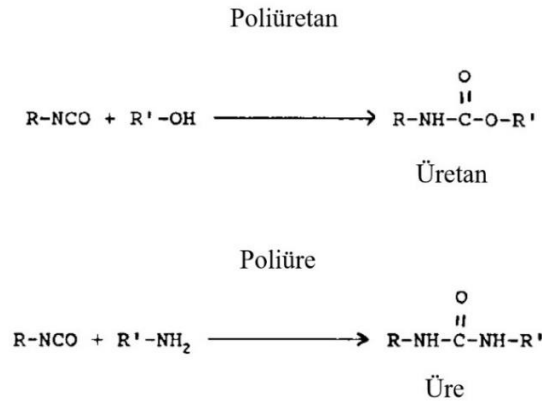
Üre kimyası 100 yıldan daha eskidir [40]. Poliüre (PUr) ile ilgili çalışmalar ilk olarak 1948’de bildirilmiş olsa da [41-43] PUr elastomer teknolojisinin kavramları 1989 yılında Austin Texas’taki şimdiki adı “Huntsman Corporation” olan Texaco Chemical Company tarafından tanıtılmıştır [43,44].

PUr elastomer sınıfında bir polimerdir ve Şekil 2.5’te gösterildiği gibi bir izosiyanat ( $\text{N}=\text{C}=\text{O}$ ) ile aminin ( $\text{NH}_2$ ) reaksiyona girdiği kademeli büyüme polimerizasyonu prosesiyle oluşur [45,46].



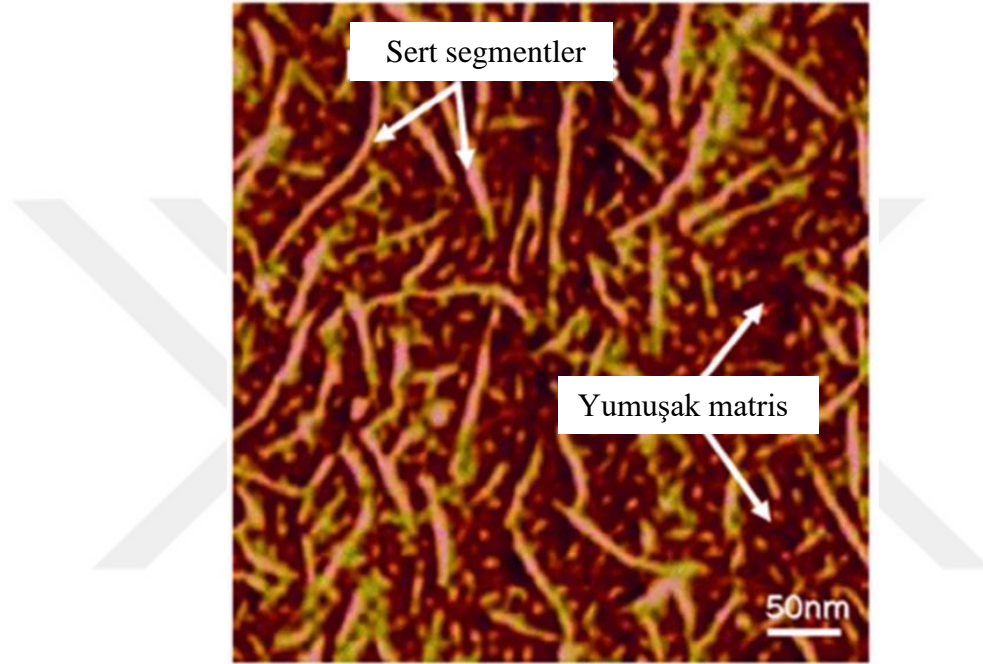
Şekil 2.5: PUr oluşum reaksiyonu şeması [47].

PUr’ler yüksek derecede reaktif sistemlerdir ve poliüretanlarda 1-2 hafta süren elastomerlerin fiziksel özelliklerinin tamamen gelişmesi olayı, poliürelerde 24 saat içinde gerçekleşir [40]. PUr ile poliüretan (PU) elastomerlerinin arasındaki fark Şekil 2.6’da gösterildiği gibi PU’larda izosiyanat grupları ( $-\text{NCO}$ ), hidroksil ( $-\text{OH}$ ) grupları ile reaksiyona girerken PUr’larda ise amin ( $-\text{NH}_2$ ) gruplarıyla reaksiyona girerler [48].



Şekil 2.6: PUr ve PU teknolojileri [49].

Kimyasal olarak PUr, Şekil 2.7’de verilen atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntüsünde görüldüğü gibi sert ve yumuşak segmentlerden oluşan çapraz bağlı elastomer bir blok kopolimerdir [50,51]. Sert bileşenler diizosiyanat ve zincir genişleticilerdir ve oda sıcaklığında camsı halde bulunurlar. Yumuşak bileşen ise diamindir ve oda sıcaklığında kauçuksu halde bulunur [43,51]. Zincir genişleticiler, tüm sistemlerin kuruma süresini kontrol eden düşük moleküler ağırlıklı aminlerdir [43]. PUr’nin özellikleri, uygun reaktan seçimi ve özellikle zincir genişleticiler ile ayarlanabilir [46].



Şekil 2.7: PUr’nin AFM görüntüsü [50].

PUr aromatik ve alifatik olarak 2 gruba ayrılır. Aromatikliği ve alifatikliği izosiyanat bileşeni belirler.

Genellikle izosiyanat prepolimerleri metilen difenil diizosiyanat (MDI) esaslı (aromatik sistemler) veya heksametilen diizosiyanat (HDI) veya izoforon diizosiyanat (IPDI) esaslı (alifatik sistemler) olabilir. Alifatik PUr’lerin UV dayanımı yüksektir ve kürlenme süreleri daha uzundur [43]. Alifatik PUr’ler, erime noktaları ile ayrışmalarının başlangıcı arasında 50-100 C°'lik bir fark sergileyerek döküm için kullanılabilirlerken, aromatik PUr’lerde ayrışma sıcaklıkları ile erime sıcaklıkları yakındır [40]. Poliaspartik PUr de alifatiktir. Poliaspartik PUr, parlama noktasının altında kalan 245 C°'ye kadar sıcaklığa toleranslıdır. Ayrıca -30 C° civarında bir sıcaklığa kadar soğuk ortamlarda ve belli bir limite kadar nemli ortamlarda dahi uygulanabilir. Ayrıca izosiyanat, reaksiyona kadar sağlığa çok zararlı olsa da bu aşamadan sonra PUr uçucu organik bileşik içermediği için bu yönüyle çevre dostudur.

İzosiyanatsız PUr üretmeye yönelik de çalışmaların olması [52], mevcut zararları da azaltılabileceği açısından iyi bir gelişmedir.

PUr'ler nano dolgu yapılması açısından cazip adaylar değildirler. Çünkü morfolojik olarak zaten nano dolgulu bir kompozit görünümü sergilerler. Sert segmentler yumuşak segment içerisinde nano boyutlu halde bulunurlar. Bununla birlikte, PUr'lere farklı nano dolgular uygulayarak incelemek de ilgi çekicidir [53].

Zor hava koşullarına dayanıklı ve korozyon önleyici koruyucu kaplamaların hazırlanmasında aromatik ve alifatik poliüreler kullanılmaktadır [54]. PUr, reaksiyona ve aşınmaya karşı dirençli olduğu iyi bilinen bir polimerdir ve kaplama endüstrisinde katı formda (örneğin çatılar, depolama tankları, tüneller, köprüler, yük gemileri, park yerleri, kamyon kasaları) yaygın olarak kullanılmaktadır. PUr, kaplama uygulamalarına ek olarak, son yıllarda olağanüstü mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleriyle araştırmacıları şaşırtarak zırh ve otomotiv endüstrilerinde uygulanmaya da başlamıştır [44]. PUr'lerin patlama azaltıcı ve balistik koruma özelliklerinin bulunması üzerlerindeki ilgiyi artırmıştır. PUr yüksek gerilme oranlarında kauçuktan cama dinamik geçiş kabiliyetiyle balistik koruma sağlarken, şok dalgası yakalama, nötralizasyon kabiliyetiyle de patlama hafifletme sağlamaktadır. PUr'nin istisnai özelliklerini belirleyen temel mekanizmalar henüz aydınlatılabilmemiş değildir [45]. PUr, bileşenlerinin hacim oranına ve karıştırma prosedürüne bağlı olarak çok çeşitli genel özellikler sergileyebilir ve mekanik özellikleri büyük ölçüde sıcaklığa, basınca ve deformasyon hızına bağlıdır [44].

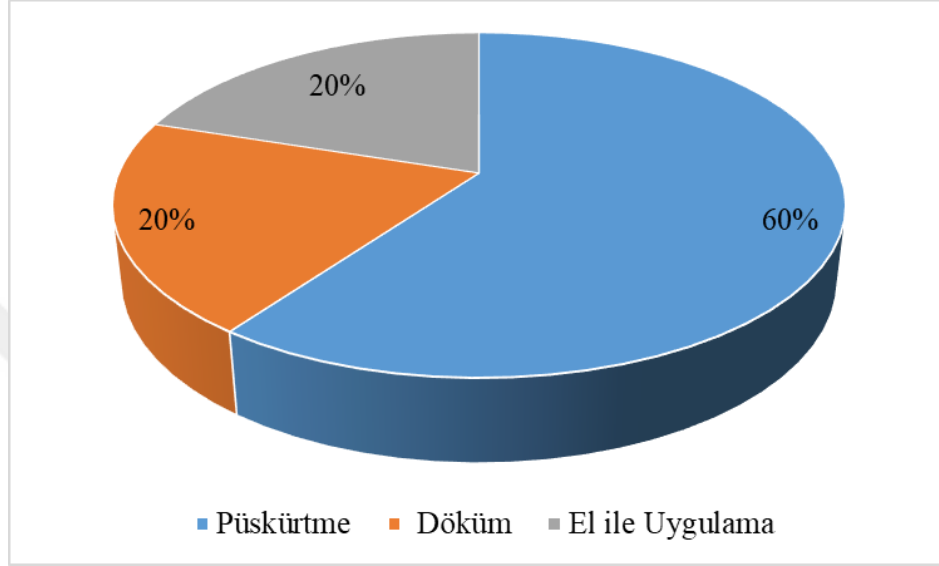
PUr'lerin bazı önemli özelliklerinin kullanılan diğer yaygın matris malzemeleriyle kıyaslanması Çizelge 2.4'te sunulmuştur.

**Çizelge 2.4:** Bazı PUr özelliklerinin diğer matris malzemeleriyle kıyaslanması [55].

Özellik	PUr	PU	Polyester	Epoksi
<b>Fiziksel dayanım</b>	düşük / yüksek	düşük / orta	yüksek	yüksek
<b>Uzama</b>	yüksek	düşük / yüksek	düşük	düşük
<b>Abrazyon direnci</b>	yüksek	orta / yüksek	orta/ yüksek	yüksek
<b>Beton adhezyonu</b>	yüksek	düşük / orta	orta	yüksek
<b>Kürlenme büzülmesi</b>	düşük	düşük	yüksek	yüksek
<b>Geçirgenlik</b>	düşük	orta / yüksek	düşük	düşük /yüksek
<b>UV-direnci</b>	yüksek	düşük / yüksek	orta / yüksek	düşük
<b>Sıcaklık limiti</b>	yüksek	orta	düşük / orta	düşük

Çizelge 2.4'e bakıldığında, PUr'nin diğer özellikleri zayıflatılmadan dayanımının genel olarak artırılması sağlandığı takdirde, yapısal anlamda diğer matrislerden oldukça avantajlı olacağı anlaşılmaktadır.

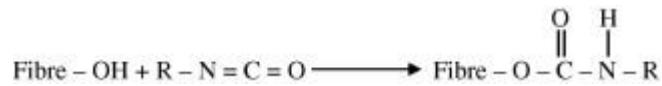
PUr malzemeler püskürtme, döküm ve elle uygulama olarak 3 farklı uygulama yöntemiyle kullanılırlar. Bu yöntemlerin tercih oranları Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8: PÜr uygulamalarının kullanım oranları [55].

Şekil 2.8'de de görüldüğü gibi PÜr için en yaygın kullanılan uygulama biçimi püskürtmedir. Genellikle aromatik PÜr yüksek sıcaklık ve basınç altında sprey tabancasıyla püskürtülerek uygulanmaktadır. Döküm ve el ile uygulamalar daha çok alifatik PÜr kullanımında tercih edilmektedir.

PUr'nin doğal elyaflarla uyumu da önemli bir husustur. PÜr bileşenlerinden izosiyanat, elyaf yüzey modifikasyonu için bir bağlama maddesi olarak çalışır. İzosiyanatın fonksiyonel grubu (-N = C = O), elyafların selüloz ve lignin bileşenlerinin hidroksil (-OH) grupları ile reaksiyona girer ve bir üretan bağı oluşur. Bu kimyasal bağlantı, elyaf ve matris arasında güçlü bir kovalent bağ sağlar. Ayrıca, izosiyanat elyaf yüzeyinde bulunan nem ile reaksiyona girer ve selülozların hidroksil grupları ile daha fazla reaksiyona girebilen üre oluşturur. Bu ikincil reaksiyon, elyafa daha yüksek nem direnci sağlayarak matris elyaf bağlantısını güçlendirir [29]. İzosiyanat-elyaf reaksiyonu Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9: İzosiyanat ile elyafların reaksiyonu [29].

Literatürde PUR'nin mekanik özellikleriyle ilgili yapılan çalışmalardan bazıları şunlardır:

Qian ve diğ., çalışmalarında grafit oksit ve grafen takviyeli PUR nanokompozitler üretmiş ve dinamik mekanik analiz, yüzey sertliği ve çekme testleri yaparak farklı oranlardaki takviyenin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0.2 grafen takviyesinin çekme dayanımını %80 artırdığını, grafen oranı arttıkça shore sertliğinin de arttığını bildirmişlerdir. Grafenin bu etkisinde iyi dağılımının ve arayüz bağlarını güçlendirmesinin payı olduğunu söylemişlerdir [56].

Qiao ve Wu, farklı oranlarda ve farklı partikül boyutlarında uçucu kül kullanarak uçucu kül-PUR kompozitleri üretmiş ve çekme deneyine tabi tutmuşlardır. Uçucu kül takviyesinin PUR matrisli kompozitlerde çekme dayanımını ve kırılma uzamasını düşürdüğü sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca partikül boyutu büyüdükçe ve partikül oranı arttıkça çekme dayanımının azaldığını bildirmişlerdir [57].

Liu ve diğ., farklı oranlarda (ağırlıkça %0.7,1.5 ve 2.5) nano SiC takviyesi içeren PUR kompozitler üreterek yarı-statik ve dinamik basma testleri uygulamışlardır. Basmadaki özellikler açısından statik yüklemde %1.5 SiC takviyesi yapılan numunelerin üstünlük gösterdiğini, dinamik yüklemde ise %0.7 SiC takviyesi yapılan numunelerin üstünlük gösterdiğini bildirmişlerdir [58].

Raman ve diğ., çalışmalarında PUR plakalardan keserek hazırladıkları numunelerin yüksek hızlı çekme yükleri altındaki dinamik davranışlarını gözlemlemişlerdir. Gerinim oranının artmasıyla elastisite modülünün de arttığına ve gerilme-gerinim eğrisinin lineer olmadığına dair bulgulara ulaşmışlardır [59].

Literatürde PUR'nin tribolojik özelliklerine dair az sayıda çalışma olduğu görülmüştür.

Hu ve diğ., PUR'nin parçacıklar halinde epoksi içinde dağılımını sağlayarak hazırladıkları epoksi-poliüre kompozitlere block-on wheel yöntemiyle kuru sürtünme şartlarında 65 HRC sertliğinde çelik karşı yüzey kullanarak 98 N yük altında, oda sıcaklığında, 0.42 m/s kayma hızında ve 1890 m'ye kadar kayma mesafesinde aşınma testleri gerçekleştirmişlerdir. PUR parçacıklarının yüksek deformasyon kapasitesi sağlayarak kompozitin sürtünme katsayısını düşürdüğünü ve aşınma direncini artırdığını göstermişlerdir [60].

Wang ve diğ., çalışmalarında, bir tanesinin sertliği daha yüksek olmak üzere iki çeşit saf PUR ve bir çeşit de alifatik PUR kullanarak beton üzerine kaplama yapıp, su altı bilyalama ve su altında bazalt taşlarını akışla yüzeye göndermek suretiyle özel bir aşınma testi

gerçekleştirerek su altı yapıların abrazif aşınma direncini artırmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çelik bilyalama testinde elastik kaplamalı yüzeylerde aşınma görülmediğinden bazalt taşlarını abrazif olarak kullanmayı seçmişler ve farklı akış sürelerinde yaptıkları testlerde her üç kaplamanın da betonun abrazyon direncini 40 ile 100 kata kadar artırdığını, saf poliürenin sertleştirilmiş ve alifatik olan poliürelerden 2 kat daha fazla abrazyon direnci olduğunu gözlemlemişlerdir [61].

### **2.1.3 Dolgu malzemeleri**

Dolgular aktif, yarı aktif ve inaktif olarak sınıflandırılır. Dolguların aktiflik derecesi dolgu ile polimer arasındaki etkileşim kuvvetlerine bağlıdır [34].

Kristalleşme ve viskozite gibi matris özellikleri, dolgu ilaveli veya dolgusuz kompozit özellikleriyle ilgilidir. Dolgular, sertliği, kimyasal direnci artırırken, plastiklerin elektriksel özelliklerini de etkiler. Dolgular, nanopartiküller veya mikropartiküller olarak bulunur. Mikropartikül dolgu malzemeleri, planet veya döner bilyalı değirmenlerle nanodolgu malzemelerine dönüştürülebilir. Bu düşük maliyetli ve basit teknik, mikropartikülleri, partikül boyutu 100 nm'den bile küçük olan nanopartiküllere dönüştürür [34].

Dolgu maddeleri, en başından beri, termoplastiklere, elastomerlere ve termosetlere dahil edilmiştir ve birçok polimerin geliştirilmesinin onlarsız mümkün olamayacağı söylenebilir. Başlangıçta maliyeti düşürmek için kullanılsalar da günümüzde polimerler çok daha ucuz hale geldiği için, artık bu amaçla kullanılmamaktadırlar. Dolgu maddeleri, polimerlere göre belirgin şekilde farklı özelliklere sahiptir ve doğru şekilde seçilmeleriyle, belirli bir kullanım için gelişmiş özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilebilir. Bunu yaparken dolgu maddesinin diğer malzemelerle çalışma uyumunun bilinmesi ve malzemelerin buna göre seçilmesi önemlidir [62].

Geleneksel elyaf takviyeli polimerlerin nihai performansının, delaminasyon direnci ve geçiş kalınlığı özellikleri gibi büyük ölçüde matris baskın özellikleriyle sınırlı olduğu düşünülmektedir. Kompozitlerde 3 boyutlu bir takviye ağı oluşturmak amacıyla elyaf düzenlemesini ayarlayarak bu sorunu çözmek için dikiş, z-pinleme ve örgü vb. gibi çeşitli yöntemler denense de, bu yöntemler, elyaf düzenlemesini bozarak veya takviye edici elyaflara zarar vererek elyaf takviyeli polimerlerin düzlem içi performansını azaltma ve üretim karmaşıklığı ile işçilik maliyetini ise artırma eğilimindedir. Buna karşılık, polimer

matrisin nano dolgular ile modifikasyonu, düzlem içi performanstan ödün vermeden bu sorunu çözmedeki üstünlüğünü göstermiştir [63].

TiO<sub>2</sub> nano tozu kimya endüstrisinde geniş uygulama alanlarına sahiptir. Kozmetik sanayisinde, plastik kaplama, gıda ambalaj malzemeleri ve baskı mürekkepleri gibi kaplamalarda kullanım alanı vardır. Ayrıca fotokatalistler, UV ışınlarına dayanıklı malzemeler, antibakteriyel malzemeler, kanalizasyon arıtma ve kendi kendini temizleyen cam ve seramik uygulamalarında da kullanılmaktadır [64].

Grafen nanoplatelet (GNP), termoplastik ve kauçuklu kompozitler için yüksek performanslı bir katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Kompozitlerin çekme dayanımı, sertlik, korozyon direnci, aşınma direnci, ısıl iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve yağlayıcı özelliklerini duruma göre artırabilir [65].

## **2.2 DETPK'lerin Mekanik ve Tribolojik Özellikleri**

Malzemelerin yük altındaki davranışları mekanik özelliklerini belirlerken, birbiriyle temas halinde olan yüzeylerin birbirlerine göre bağıl hareket altındaki davranışları tribolojik özelliklerini belirler.

### **2.2.1 Mekanik özellikler**

Doğal elyaf takviyeli termoplastiklerin ve termosetlerin gerilme özellikleri, esas olarak matris ve elyaflar arasındaki ara yüzey yapışmasından etkilenir. Genel olarak, DETPK'lerin gerilme mukavemetleri, maksimum veya optimum bir değere kadar artan elyaf içeriği ile artar, daha sonra ise azalır. Bununla birlikte, DETPK'lerin Young modülleri artan elyaf yüklemesi ile artar [66]. Diğer yandan, üretilen kompozitin içinde oluşan hava boşlukları da mekanik özellikleri etkileyen diğer bir unsurdur.

Literatürde DETPK'lerin mekanik özelliklerini tespit etmeye ve geliştirmeye yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur.

Pandita ve diğ., yaptıkları çalışmada dokunmuş jüt ve cam elyafı takviyeler kullanarak vakum torbalama yöntemi ile epoksi matrisli kompozitler üretmiş ve jüt-epoksi kompozitlerinin ince tabaka halinde cam elyafı takviye ile hibritlenmesinin çekme, eğilme ve darbe dayanımını artırdığı sonucuna ulaşmışlardır [33].

Ramana ve Ramprasad, yürüttükleri çalışmada elle yatırma tekniği kullanarak jüt ve karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlere çekme, 3 nokta eğilme ve darbe testleri uygulamışlardır. Çalışma sonunda karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımlarının en yüksek, karbon elyaf-jüt takviyeli epoksi matrisli kompozitlerinin daha düşük ve jüt takviyeli epoksi matrisli kompozitlerinin (çok daha yüksek oranda) en düşük olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Darbe dayanımı sıralamasının ise bunun tam tersi yönde olduğu ve jüt elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin daha yüksek darbe dayanımına sahip olduğunu bildirmişlerdir. Dolayısıyla jüt veya karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin yerine hibrit jüt+karbon elyaf takviyeli olanları önermişlerdir [67].

Deepak ve diğ., çalışmalarında basınç ile kalıplama yöntemiyle doğal elyaf (jüt) takviyeli dolgunsuz ve ağırlıkça %3 nanokil parçacık dolgulu polyester matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini analiz etmişlerdir. Yapılan çekme ve darbe testleri sonunda matrise nanokil dolgu yapılmasının kompozitin çekme dayanımını ve darbe enerjisini artırdığını gözlemlemişlerdir [68].

Gopinath ve diğ., çalışmalarında jüt elyafı takviyeli epoksi ve polyester matrisli kompozitlere çekme, 3 nokta eğilme, charpy darbe ve sertlik testleri uygulayarak mekanik özelliklerini kıyaslamışlardır. Epoksi matrisli kompozitlerin çekme dayanımları daha yüksekken, polyester matrisli kompozitlerin eğilme ve darbe dayanımları ile sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır [37].

Jawaid ve diğ., çalışmalarında elle yatırma yöntemi kullanarak yağ palmyesi elyafı ve jüt takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hibrit kompozitlerde jüt elyaf takviye oranının artmasının çekme gerilmesini artırdığı sonucuna ulaşmışlardır [23].

Raghavendra ve diğ., elle yatırma yöntemi ile farklı dizilimlerde jüt ve cam elyafı takviyeli uçucu kül dolgulu epoksi matrisli üreterek mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Uçucu kül dolgunun ürettikleri hibrit kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımlarını %5 oranında artırdığını, ayrıca erozif aşınma direncini de geliştirdiğini söylemişlerdir [69].

Seshanandan ve diğ., elle yatırma yöntemiyle ürettikleri nano TiO<sub>2</sub> dolgulu polyester matrisli jüt ve cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır.

Ürettikleri hibrit kompozitlerin maksimum çekme, eğilme ve kayma gerilmelerinin artan nano TiO<sub>2</sub> dolgu oranıyla birlikte arttığını göstermişlerdir [70].

Prasad ve diğ., elle yatırma yöntemi kullanarak doğal elyaf takviyeli TiO<sub>2</sub> nano dolgulu epoksi matrisli polimer kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerde üç nokta eğilme ve izod darbe testleri uygulamışlardır. Ağırlıkça %6 TiO<sub>2</sub> nano dolgu oranına kadar artan TiO<sub>2</sub> ile eğilme ve darbe dayanımının arttığını ve bu oranda optimum sonuçlar alındığını bildirmişlerdir. Ağırlıkça %8 TiO<sub>2</sub> nano dolgu oranında ise bu özellikler açısından bir düşüş yaşandığını belirtmişlerdir [71].

Prasad ve diğ., basınçla kalıplama yöntemiyle ürettikleri keten takviyeli nano TiO<sub>2</sub> dolgulu epoksi matrisli kompozitlerin mekanik, termal ve nem alma özelliklerini incelemişlerdir. Nem alma özelliğinin artan nano dolgu miktarı ile azaldığını, çekme, eğilme ve darbe dayanımının ise ağırlıkça %0.7 TiO<sub>2</sub> dolgu oranında maksimum olduğunu söylemişlerdir [72].

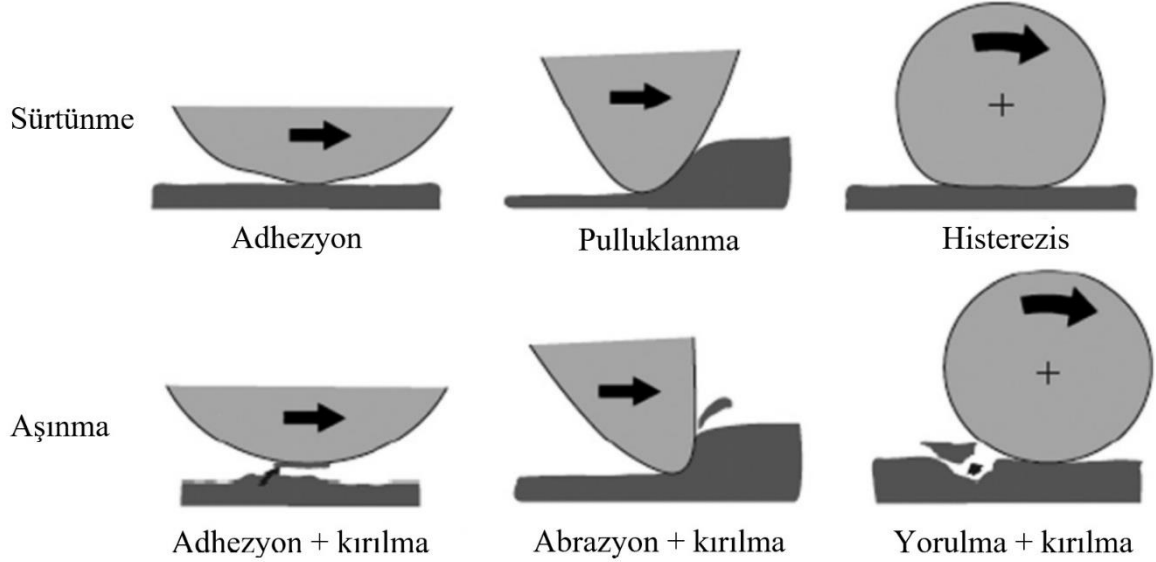
### **2.2.2 Tribolojik özellikler**

Triboloji, sürtünme, aşınma ve yağlamayı inceleyen bilim dalıdır [30,73-75]. Sürtünme, temas halinde harekete zorlanan iki yüzey arasındaki göreceli harekete direnç olarak tanımlanırken [76,77], aşınma ise sürtünme veya darbe etkisiyle katı yüzeyde meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanır [75].

Sürtünme ile aşınma arasında bir ilişki vardır. Her şeyden önce sürtünme, aşınmanın ön koşuludur. Ancak artan sürtünme kuvveti her zaman artan aşınma kaybına neden olmaz [73]. Aşınma mekanizmaları, sürtünmeden kaynaklanan kesme yükünden ve sürtünmeden dolayı açığa çıkan ısıdan kaynaklı sıcaklık artışından etkilenir. Yani, sürtünme aşınma davranışını etkileyebilir. Diğer yandan, sürtünme davranışı da, aşınmanın neden olduğu yüzey değişikliklerinden etkilenebilir [76].

Sürtünmeyi açıklamak için deformasyon, adhezyon ve histerezis olarak üç mekanizma öne sürülmektedir. Deformasyonda temaslı olarak hareket eden yüzeyler arasında malzeme geçişi olurken, adhezyonda temas noktalarında oluşan bağlantıların kesilmesi söz konusudur. Histerezis ise katının üzerindeki kuvvet değişimlerine tepki verme süresini ifade eder [76]. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi adhezyon mekanizmasında yüzeyler arasında temas noktalarındaki adhezif bağlar kopar. Pulluklanma (deformasyon) mekanizmasında sert yüzey daha yumuşak veya daha elastik bir yüzey üzerinden geçerken ortaya çıkan elastik ve

plastik deformasyonlar bir dirence neden olur. Histereziste ise hareketli yüzeylerden birinde sürekli bir elastik deformasyon ve bundan kaynaklı bir direnç söz konusudur [78]. Bu sürtünme mekanizmaları, aşınma olayında şekil 2.10'da görüldüğü gibi kırılmalara neden olarak aşınma artışı çıkarabilmektedirler.



**Şekil 2.10:** Temel sürtünme mekanizmaları ve aşınma mekanizmaları ile ilişkileri [78].

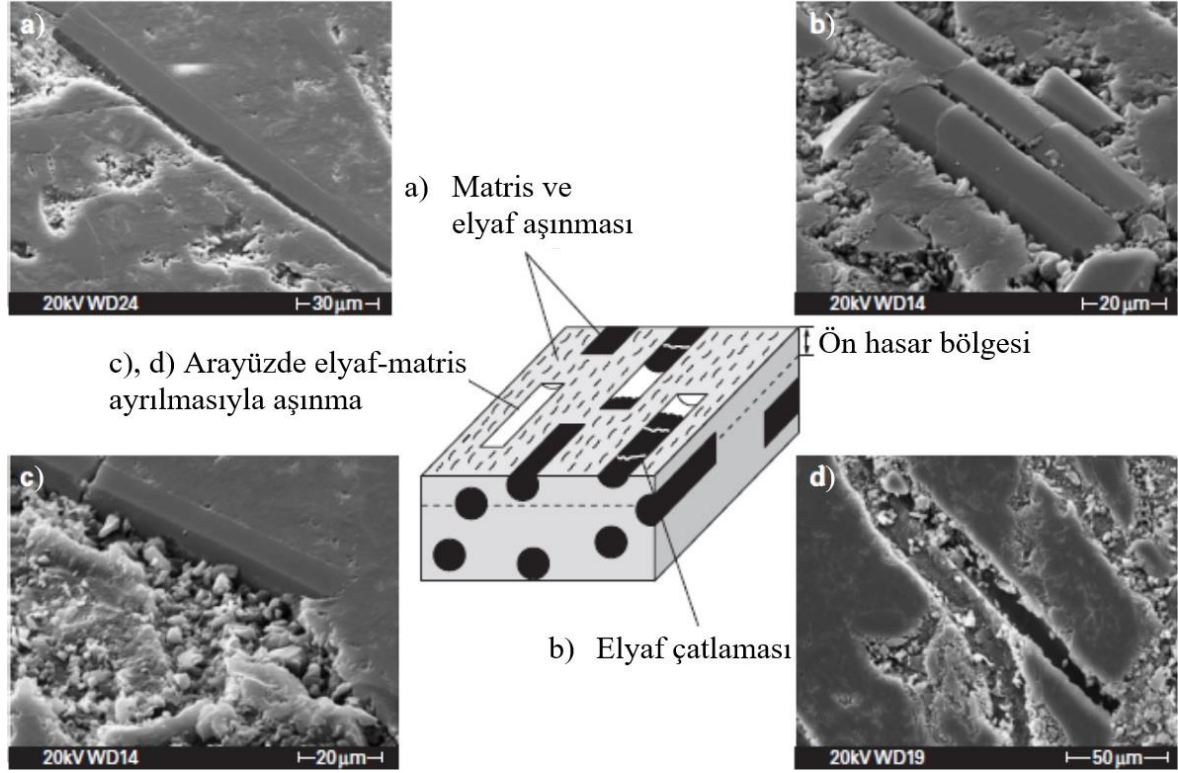
Kayan yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı ( $\mu$ ); pürüz temas noktalarındaki pürüz deformasyonunun, aşınan parçacıkların ve sert yüzeyin pürüzlerinin oluşturduğu pulluklanmanın ve yüzeyler arasındaki adhezyonun birleşimidir. Bu üç mekanizma ise, temas yüzeyi topoğrafyasına, çalışma koşullarına ve malzeme türlerine bağlıdır [73].

Sürtünme katsayısı ile normalleştirilmiş aşınma oranları arasında genel bir ilişki bulunmamaktadır. Ancak, sürtünme katsayısındaki zamana veya kayma mesafesine bağlı değişiklikler, genellikle aşınma davranışındaki değişikliklerle ilişkilendirilir. Örneğin bazı durumlarda, sürekli kayma koşullarında sürtünme katsayısında ortaya çıkan azalma, kararlı bir transfer filminin oluşumu ile ilişkilendirilebilir [76].

Yaygın olarak karşılaşılan aşınma mekanizmaları adhezif (kayma), abrazif, yorulma, erozif, korozif, kavitasyon ve düşük genlikli salınım aşınması olarak sınıflandırılabilir [73]. Polimerlerin aşınmasında en sık görülen aşınma mekanizmaları bunlardan ilk üçüdür [79].

Kimyasal içerik, sertlik ve tokluk gibi malzeme özellikleri ve yüzey özellikleri aşınma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [30].

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerde aşınma durumunda genel olarak meydana gelen hasar mekanizmaları Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Burada kırılmış karbon elyaf takviyesi bulunsa da dokunmuş kumaş elyaflarda da benzer bir işleyiş söz konusudur.



**Şekil 2.11:** Kısa elyaf takviyeli polimer kompozitlerde aşınma durumunda genel olarak meydana gelen hasar mekanizmaları, a) matris aşınması ve elyafların incelmesi, b) elyafların kırılması, c) matris-elyaf arasında arayüz ayrılması, d) elyaf soyulması [80].

Şekil 2.11’deki yaygın hasar mekanizmaları sıralanacak olursa; öncelikle ön hasar bölgesinde, matriste aşınma meydana gelir ve devam eden aşınmada elyaflar aşınarak incelmeye başlar. Daha sonra inceliyor dayanımı düşen elyaflarda kırılmalar meydana gelir. Bu aşamadan sonra elyaf-matris arayüzünde ayrılmalar meydana gelir. Son olarak elyaflarda soyulma ve ardından elyaf ayrılması meydana gelir ve bunu matris ayrılması izler [80].

Polimer nanokompozitlerde nano dolgular, kompozitin aşınma özelliklerine fayda da sağlayabilir, zarar da sağlayabilir. Örneğin bazı nano dolgular, aşındırıcı bir üçüncü gövde olarak hareket edebilir (3 gövdeli abrazyon aşınma mekanizması) veya matristeki süreksizlikleri artırarak daha şiddetli bir aşınmaya neden olabilir. Ya da elyaf-matris arayüz yapışmasını güçlendirip elyafa gelen gerilmeyi azaltarak veya kompozit yüzeyi ile metal karşı yüzeyi arasında bariyer görevi görerek aşınma miktarını azaltabilir [63]. Nano dolgular polimerlerin ısıyla bozunma sıcaklıklarını önemli derecede artırabilir ve bu durum tribolojik

özellikler açısından olumlu bir gelişme sağlar. Sürtünmeli temasta nanoparçacıkların varlığı, kütle aktarımını, statik elektrik birikimini, temas yüzeylerinin farklı bölgelerindeki ısı transferini, gerçek temas alanı oluşumu gibi olayları etkileyebilir [79].

Polimer tribolojisi üzerine önemli araştırmalar kauçuk ve elastomerler üzerine yapılan çalışmalarla başlamıştır. Bunun nedeni, bu malzemelerin olumsuz dış koşullara ve şiddetli kayma ve yükleme koşullarına maruz kalan lastik ve fren balataları gibi önemli parçaların üretiminde kullanılmaları dolayısıyla modern otomotiv endüstrisinin gelişiminde elastomerlerin üstlendiği büyük roldür. Elastomer dışı polimerlerde ise önemli çalışmalar daha sonra (1945'ten itibaren) başlamıştır [79]. Tıpkı doğal elyaf takviye kullanımında geçmişe yönelme ve tekrar gündeme getirme olduğu gibi, bu çalışmada elastomer matris kullanılması da benzer bir nitelik teşkil etmektedir.

Literatürde, görüldüğü kadarıyla, doğal elyaf takviyeli PUr matrisli kompozitlerin tribolojik davranışlarına dair çalışmalara rastlanmamıştır. Farklı polimer matrise sahip doğal elyafli kompozitlerin tribolojik davranışlarıyla ilgili yapılan çalışmalardan bazıları şunlardır:

Ahmed ve diğ., çalışmalarında elle yatırma tekniğiyle doğal elyaf olan jüt kumaşı takviye olarak kullanarak farklı oranlarda (ağırlıkça %5,10,15)  $Al_2O_3$  ve SiC dolgulu epoksi matrisli kompozitler üretmişlerdir. 3, 4.5 ve 6 m/s kayma hızlarında ve 30,40 ve 50 N yükler altında 1800 m kayma mesafesinde pim-disk tirbotest cihazı kullanarak kuru sürtünmeli ortamda gerçekleştirdikleri aşınma testleri sonucunda yük ve kayma hızının artmasıyla birlikte aşınan kütlelerin ve sürtünme katsayısının arttığını bildirmişlerdir.  $Al_2O_3$  dolgusu yapılmasının sürtünme katsayısını düşürdüğü, aşınma direnci sağladığı ve en düşük sürtünme katsayısının %15 oranında  $Al_2O_3$  dolgusuyla elde edildiği sonucuna varmışlardır [81].

Deepak ve diğ., yürüttükleri çalışmada jüt ve muz elyaf takviyeli,  $MoS_2$  dolgulu, vinilester matrisli kompozitler üreterek mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. 0.2 m/s kayma hızında 10 N yük altında 10 km kayma mesafesinde abrazif aşınma testleri uygulamış ve bu testlerin sonunda, artan  $MoS_2$  dolgu oranıyla birlikte sürtünme katsayısının yükseldiğini ve spesifik aşınma oranının düştüğünü göstermişlerdir [82].

Yallem ve diğ., jüt takviyeli polipropilen kompozitler üreterek farklı kayma hızlarında (1, 2, 3 m/s), farklı yükler altında (10, 20, 30 N) ve 3000 m kayma mesafesinde pim-disk tribotest cihazında aşınma testleri gerçekleştirmişlerdir. Artan yük ve kayma hızının spesifik aşınma oranını artırdığını ve jüt takviye kullanmanın spesifik aşınma oranını %65'e kadar düşürdüğünü söylemişlerdir [83].

Sailesh ve diğ., farklı dizilimlerde jüt, kenaf ve aloe vera elyaf takviyeli epoksi matrisli hibrit kompozitler hazırlayıp mekanik ve aşınma davranışlarını gözlemlemişlerdir. Abrazif aşınmada doğal elyafların diziliminin aşınma oranını etkilediğini göstermişlerdir [84].

Jha ve diğ., elle yatırma yöntemiyle jüt ve E-camı elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitler üreterek mekanik ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. 1 m/s kayma hızında 3430 m kayma mesafesi boyunca farklı yükler altında pim-disk tribotest cihazı kullanılarak yapılan testler sonucunda aşınma oranlarının artan yük ile arttığı ve jüt elyaf takviyesi kullanma miktarı arttıkça E-cam takviyesine göre aşınma oranını düşürdüğü sonucuna ulaşmışlardır [85].

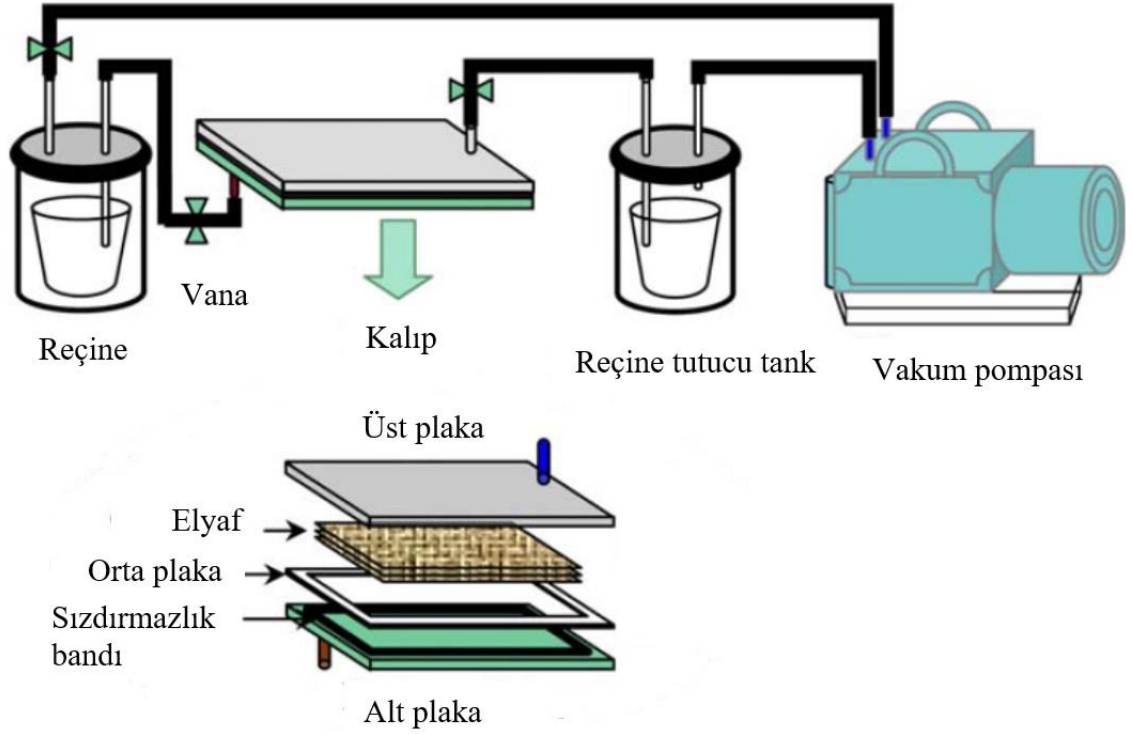
### **2.3 Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri**

Bu bölümde, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlere yer verilmiştir. Üretim yöntemlerinin seçiminde, kullanılacak malzemelerin özellikleri, üretilecek son ürünün özellikleri, üretim kapasitesi, maliyet gibi özellikler belirleyicidir. Polimer kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemler şöyle sıralanabilir:

- Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VDRTK) yöntemi
- Elle yatırma yöntemi
- Vakum torbalama yöntemi
- Spreyleme yöntemi
- Reçine transfer kalıplama yöntemi
- Basınçla kalıplama yöntemi
- Filament sarma yöntemi
- Pultrüzyon yöntemi

#### **2.3.1 VDRTK yöntemi**

Bu yöntemde reçine elyaflara vakum marifetiyle emdirilir. Şekil 2.12’de gösterildiği gibi kalıbın içerisindeki hava, vakum pompasıyla boşaltılarak reçinenin elyafların bir ucundan diğer ucuna akması sağlanır. Elyafların emmediği fazla reçine, nem ve hava ile birlikte reçine tutucu tanka gelerek sıvıların dibine çökmesi ve gazların vakuma alınması sağlanır. Kürleme işlemi kalıba ısı verilerek veya oda sıcaklığında sağlanır.



**Şekil 2.12:** VDRTK yöntemi [86].

VDRTK yönteminde, düşük maliyetli araçlar kullanılır ve düşük viskoziteli reçine, vakum basıncı altında kuru elyafa enjekte edilir. Bu teknik, tekne gövdesi, rüzgar türbini kanadı ve düşük veya yüksek üretim hacimli uçak yapıları gibi büyük kompozit yapıların ekonomik olarak üretilmesi için uygundur. Yüksek kaliteli ve düşük maliyetli doğal elyaf takviyeli polimer kompozitler için gelecek vaadeden etkin bir üretim tekniğidir [27].

Bu yöntemle üretilen bir kompozitteki elyafın reçine emme kalitesi, elle yatırma yöntemi gibi yöntemlere göre daha yüksektir ve bu yöntemle kompozit içerisindeki boşluk içeriğinin daha az olması sağlanabilir [29].

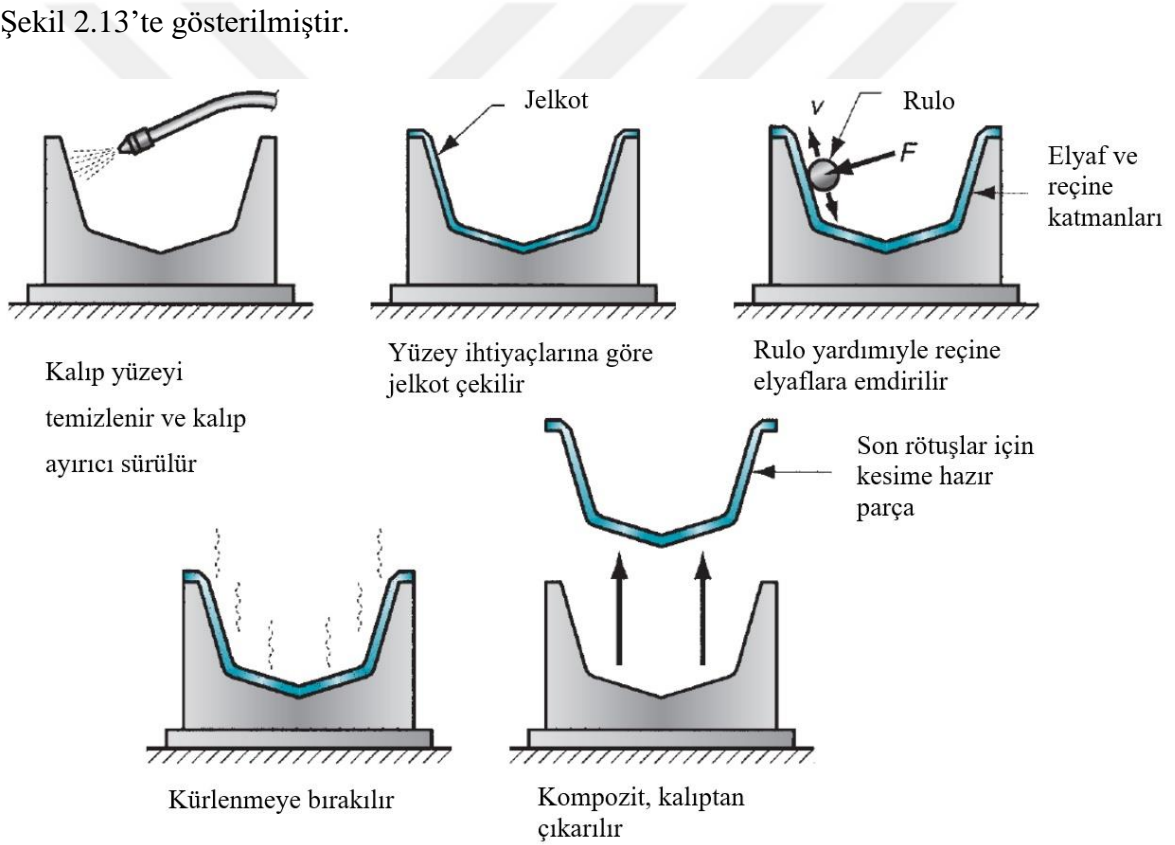
Viskozite, VDRTK yönteminde önemli bir role sahiptir, reçinenin kumaş boyunca akabilmesi için viskozitenin 100-1000 cP arasında olması önerilir. Kumaşın reçine ile başarılı şekilde ıslanmasının püf noktası, kumaşın tamamen ıslanmasına izin veren ve boşluklar ile kuru noktaları ortadan kaldıran reçine dağıtım ortamının uygun tasarımı ve yerleştirilmesidir [87].

### 2.3.2 Elle yatırma yöntemi

Açık kalıplama yöntemlerinden olan elle yatırma yöntemi, elyaf takviyeli polimer kompozit üretiminde kullanılan en eski ve en emekyoğun yöntemdir. Genellikle seri üretim gerektirmeyen büyük boyutlu kompozitlerin üretiminde kullanılır [3].

Üretilen kompozitlerin kalitesi, operatörün tecrübesine ve el becerisine de bağlıdır. Bu nedenle aynı kalitede ürün elde etmede sorunlar yaşanabilmektedir.

Prototip üretiminde genellikle alçı kalıplar kullanılırken orta seviyeli üretimde cam elyaf takviyeli plastik kalıplar ve yüksek seviyeli üretimde ise metal kalıplar tercih edilir. Metal kalıpların bir diğer tercih nedeni de dayanıklılığın yanında ısıyla kurluşma gerektiren durumlarda termal iletkenliğinden faydalanılmasıdır [3]. Elle yatırma yöntemi aşamaları Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

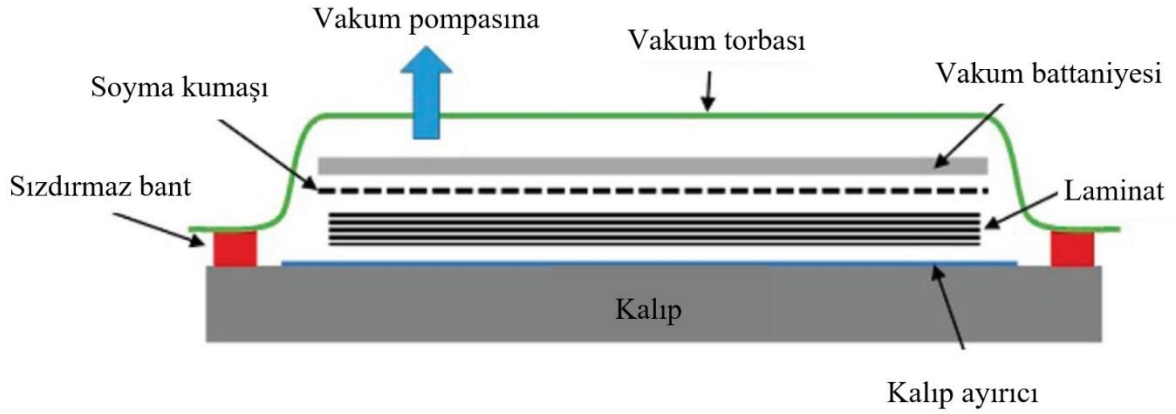


Şekil 2.13: Elle yatırma yönteminin aşamaları [3].

### 2.3.3 Vakum torbalama yöntemi

Vakum torbalama yöntemi aslında elle yatırma yönteminin devamı niteliğindedir ve bir kürlenme prosesi olduğu söylenebilir. Reçine ile iyi ıslanmış takviye laminatların Şekil 2.14'te görüldüğü gibi vakum torbası içine alınması ve içerisindeki havanın boşaltılmasıyla birlikte, fazla reçinenin uzaklaştırılmasının sağlandığı yöntemdir. Bu sayede elle yatırma

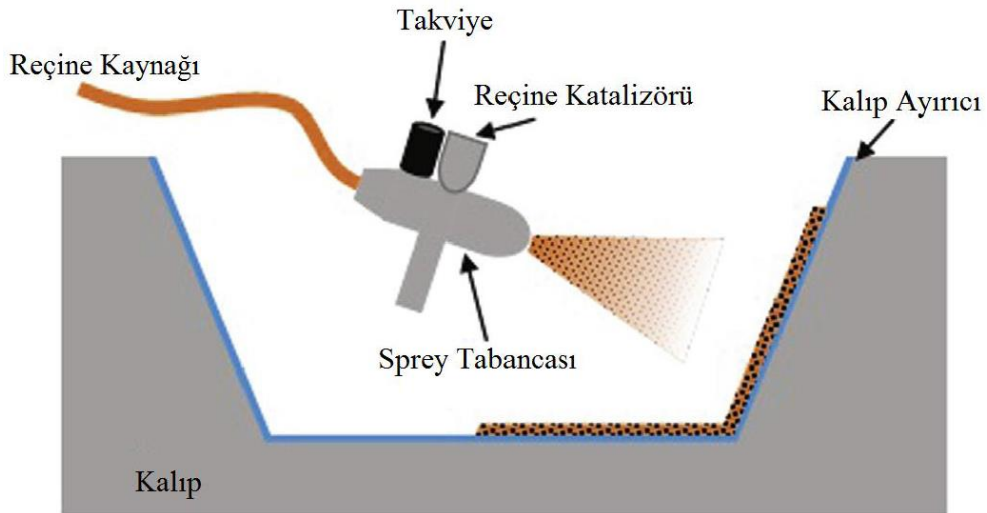
yöntemindeki operatörün el becerisine ve tecrübesine dayanan kalite özellikleri uniformlaştırılır. Reçine, elyaflara daha homojen dağılır ve hava kabarcıklarının miktarı azalır. Ayrıca vakum basıncı altında kürlenme sağlandığından daha mukavemetli parçaların üretilmesine olanak sağlanır. Vakum torbalama yöntemi, prepreg uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 2.14: Vakum torbalama yöntemi [88].

### 2.3.4 Spreyleme yöntemi

Spreyleme yöntemi elle yatırma yöntemiyle benzerlik gösteren bir yöntemdir. Farklı yönleri Şekil 2.15’te gösterildiği gibi elyafı kırpıntılı hale getirip reçine ile karıştırarak püskürtün bir tabancaya sahip olması ve daha karmaşık yapıların üretimine de izin vermesidir.

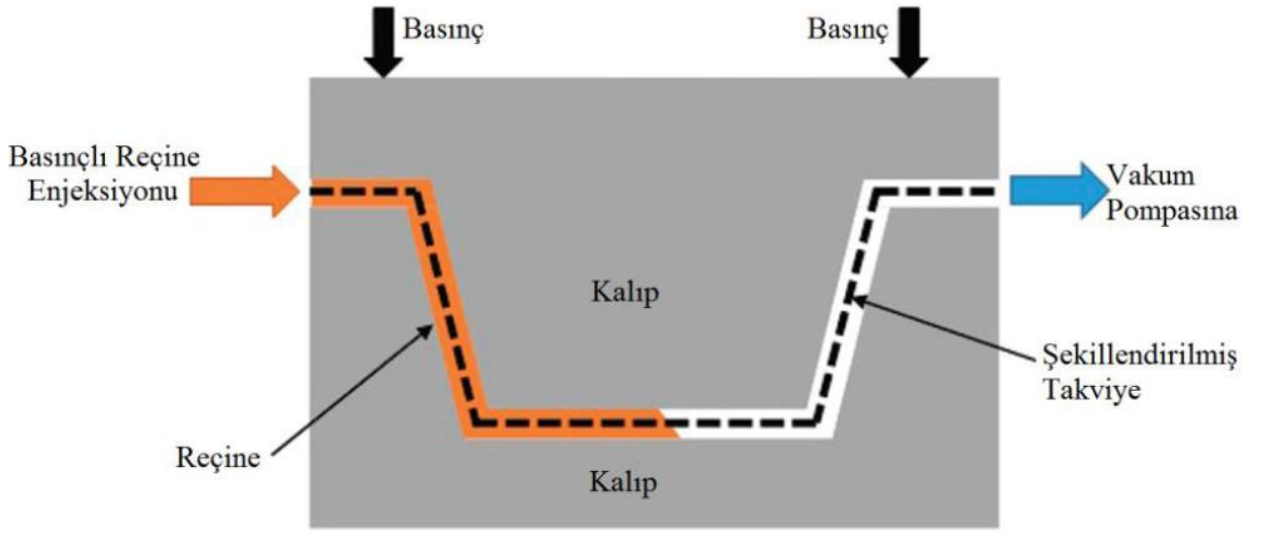


Şekil 2.15: Spreyleme yöntemi [88,89].

İstenen yerlerde mukavemeti artırmak için laminata dokuma fitil veya kumaş eklenebilir. Otomasyona çok uygun olması bu yöntemin büyük bir avantajı olup, işçilik maliyetlerini ve çalışanların tehlikeli gazlara maruz kalmasını azaltabilmektedir [2].

### 2.3.5 Reçine transfer kalıplama yöntemi

Reçine transfer kalıplama yöntemi bir kapalı kalıplama yöntemidir. Şekil 2.16'da gösterildiği gibi reçine 2 parçalı kalıp içerisinde yüksek basınç altında şekillendirilmiş takviyeye emdirilir. Oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda kürlenme işlemi yapılabilir. Çok büyük boyutlu parçalar üretilemez, kalıp maliyeti yüksektir.

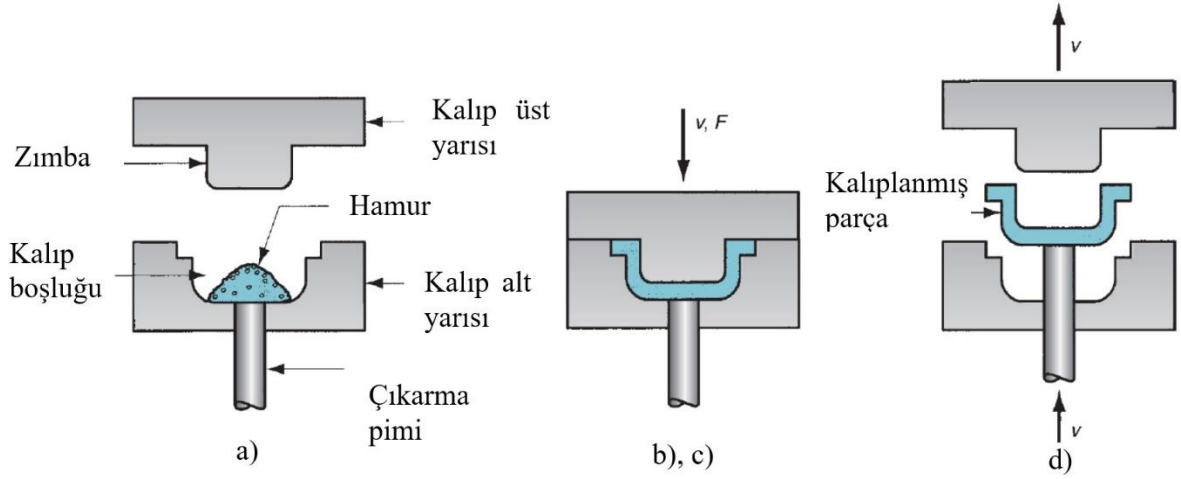


Şekil 2.16: Reçine transfer kalıplama yöntemi [88,89].

Reçine transfer kalıplama yöntemi, basınçlı enjeksiyon kalıplama yöntemi olarak da bilinir. Enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı ve enjeksiyon sıcaklığı önemli parametreleridir. Bu parametrelerin optimal seçimi önemlidir ve kompozit kalitesini etkiler [6].

### 2.3.6 Basınçla kalıplama yöntemi

Bu yöntemde reçine ve kırılmış elyaftan oluşan hamur, Şekil 2.17'de gösterildiği gibi belli bir sıcaklık ve basınç değerinde kalıplanır.

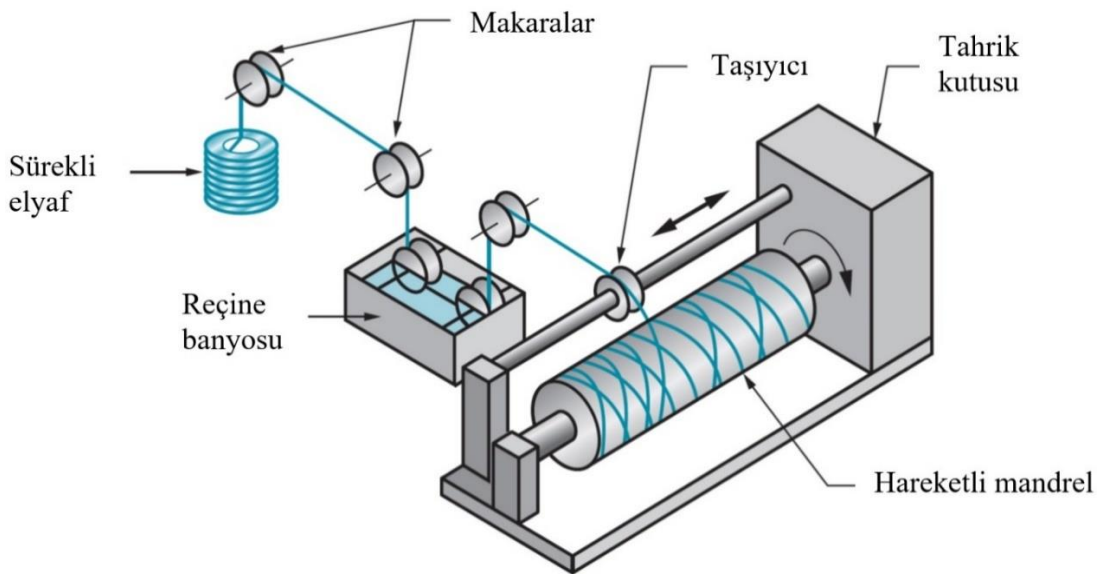


**Şekil 2.17:** Basınçla kalıplama yöntemi, a) hamur yükleme, b) ve c) hamur sıkıştırma ve küreleme, d) parça çıkarma [3].

Basınçla kalıplama yöntemi, yüksek hacimli, yüksek dayanımlı kompleks termoset ve termoplastik matrisli parçaların üretiminde kullanılır. Otomotiv sektöründeki kompozit uygulamalarda en çok kullanılan yöntemdir. Üretilen parçaların yüzey kaliteleri ve boyut toleransları oldukça iyi seviyededir [2].

### 2.3.7 Filament sarma yöntemi

Genellikle tüp ve boru gibi dairesel kesitli parçaların üretiminde kullanılan filament sarma yönteminde Şekil 2.18’de görüldüğü gibi sürekli elyaf reçineye batırıldıktan sonra istenen parametrelerle, ayarlanarak sarılır. Benzer şekilde bazı karmaşık şekilli parçalar da üretilir. Farklı sarım tipleri uygulanabilir.

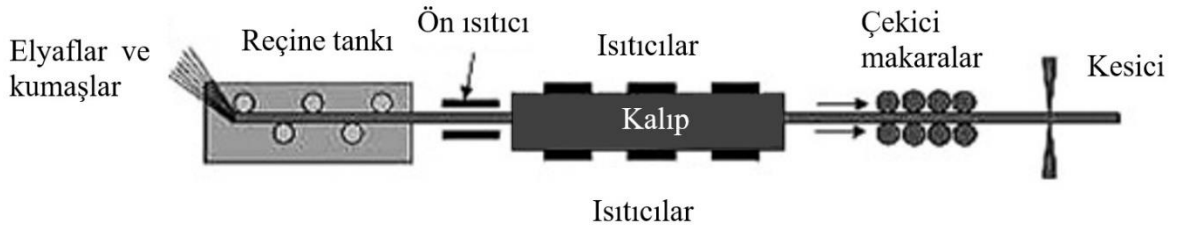


**Şekil 2.18:** Filament sarma yöntemi [3].

Uygulamaya bağı olarak mandreller ahşap, alüminyum, çelik, alçı veya tuzlardan yapılır. Büyük miktarlarda, açık uçlu silindir üretmek için çelik merdaneler kullanılırken, kapalı uçlu silindirler için, merdanenin kolayca çıkarılabilmesi için düşük erime noktalı alaşımlar veya suda çözünebilen tuzlar tercih edilir [4].

### 2.3.8 Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon yöntemi, sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretildiği seri üretim yöntemidir. Şekil 2.19’da görüldüğü gibi elyaflar reçine tankında reçine ile birleştikten sonra ön ısıtıcıda ısıtılarak kalıba aktarılır. Kalıpta kürtleme işlemiyle şekil alan reçine ile ıslanmış elyaf, profil kesici ile istenen boylarda kesilerek son ürün alınır.



Şekil 2.19: Pultrüzyon yöntemi [90].

Bu yöntemde doymamış polyester, vinilester, epoksi, silikon gibi reçineler kullanılabilir [3,6]. Epoksinin yapışma kabiliyetinin yüksekliğinden dolayı kalıp içine yapışma sorunu karşılaşılan önemli bir problemdir [3].

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1 Malzemeler

##### 3.1.1 Takviye malzemesi

Çalışmada takviye malzemesi olarak doğal elyaflar sınıfında olan ve Ganges Jute Private Limited firmasından tedarik edilen bezayağı örgü tipinde 11x12 dokuma jüt kumaş kullanılmıştır. Jüt kumaşın alansal yoğunluğu 313 g/m<sup>2</sup> olmakla birlikte yaklaşık %1.53 yağ içeriğine sahiptir.

##### 3.1.2 Matris malzemesi

Kompozit üretiminde matris malzemesi olarak AKDE Kimya End. San. ve Tic. 'den temin edilen White Chem PA 1005 poliaspartik poliüre kullanılmıştır. Poliaspartik poliüreyi oluşturan amin reçine (A) ve izosiyanat (HDI Prepolimer) (B) bileşenlerine ait özellikler Çizelge 3.1 'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1:** Bileşen özellikleri\*.

	<b>Birim</b>	<b>Metot</b>	<b>Amin reçine (A)</b>	<b>HDI prepolimer (B)</b>
<b>Yoğunluk (25 °C)</b>	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 1217	1.07-1.1	1.15-1.17
<b>Viskozite (25 °C)</b>	mPas	ASTM D 4878	1000-1100	720-750

\*: AKDE Kimya End. San. ve Tic. 'den sağlanmıştır.

Elastomer sınıfında bulunan poliaspartik poliüreye ait mekanik ve fiziksel özellikler Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.2:** Poliaspartik PUr'ye ait mekanik ve fiziksel özellikler\*.

	<b>Metot</b>	<b>Değer</b>
<b>Kimyasal yapı</b>		A: Amin reçine
		B: HDI prepolimer
<b>Karışım oranı (ağırlıkça)</b>		60:40 A:B
<b>Uçucu bileşen içeriği (%)</b>	ASTM D1259	0
<b>Katı içeriği (%)</b>	ASTM D2697	95
<b>Jel zamanı (dk)</b>		30-35
<b>Tam kürleşme zamanı (saat)</b>		24
<b>Çekme mukavemeti (MPa)</b>	ASTM D638	>30
<b>Kopma uzaması (%)</b>	ASTM D638	4-6
<b>Sertlik (Shore D)</b>	ASTM D2240	
<b>Aşınma direnci (mg)</b>	EN ISO 5470-1	<15 (H22,1000 devir)

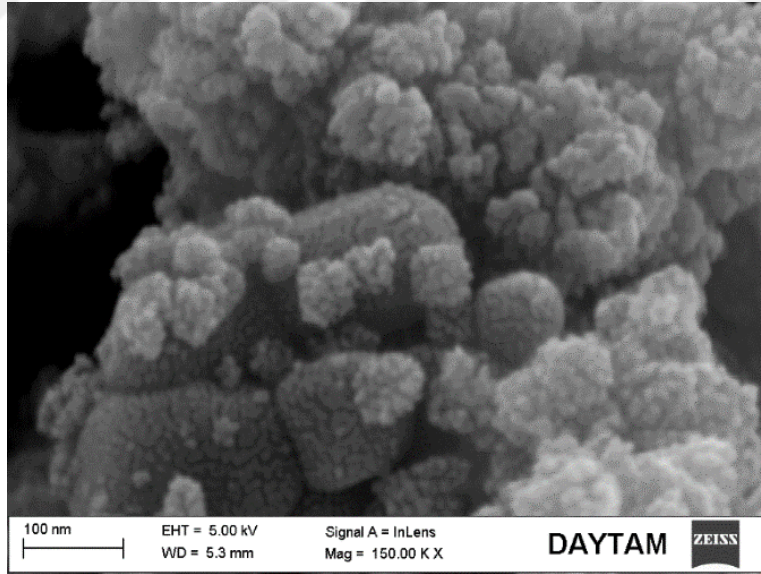
\*: AKDE Kimya End. San. ve Tic. 'den sağlanmıştır.

### 3.1.3 Dolgu Malzemesi

Matrisin modifiye edilmesinde nano dolgu malzemesi olarak Nanografi Türkiye'den tedarik edilen anataz TiO<sub>2</sub> ve GNP kullanılmıştır. TiO<sub>2</sub>'ye ait teknik özellikler Çizelge 3.3'te ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüsü Şekil 3.1'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.3:** TiO<sub>2</sub> teknik özellikler [91].

<b>Safılık (%)</b>	<b>99.55</b>			
<b>Renk</b>	beyaz			
<b>Ortalama Parçacık Boyutu (nm)</b>	13.0			
<b>Özgül Yüzey Alanı (m<sup>2</sup>/g)</b>	60			
<b>Yığın Yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.19			
<b>Gerçek Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	4.1			
<b>Kurutmada Ağırlık Kaybı (%)</b>	1.0			
<b>Ateşlemede Ağırlık Kaybı (%)</b>	3.0			
<b>PH</b>	5.5-6.5			
<b>Element Analizi (%)</b>	K	Na	Fe	Al
	0.0085	0.0076	0.005	0.005



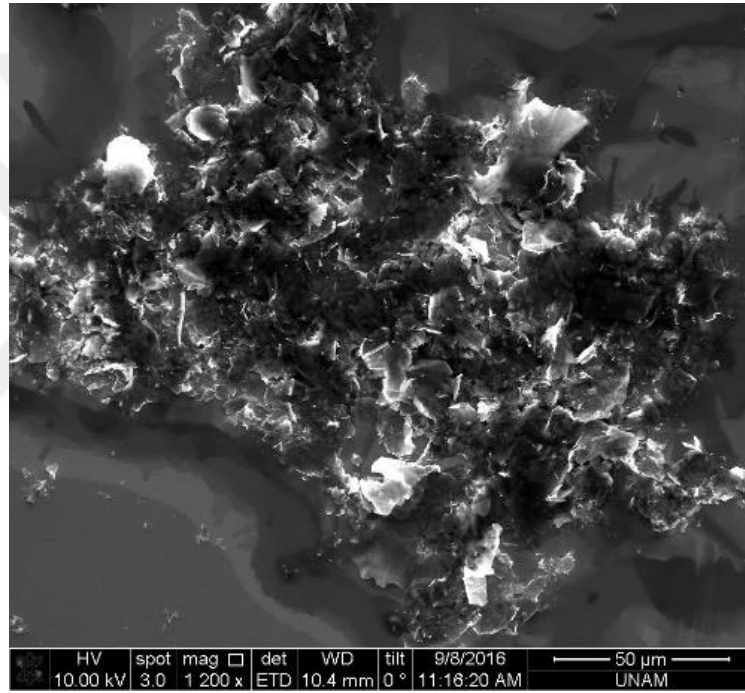
**Şekil 3.1:** TiO<sub>2</sub> SEM görüntüsü\*.

\*: Nanografi Türkiye'den sağlanmıştır.

Şekil 3.1'e bakıldığında TiO<sub>2</sub> partiküllerinin topaklanan bölgeler içinde küçük küreler halinde olduğu görülmektedir. Çizelge 3.4'te GNP'ye ait özellikler ve Şekil 3.2'de SEM görüntüsü verilmiştir.

**Çizelge 3.4:** GNP teknik özellikler [92].

<b>Safılık (%)</b>	<b>99.9+</b>
<b>Kalınlık (nm)</b>	3
<b>Çap (µm)</b>	1.5
<b>Özgül Yüzey Alanı (m<sup>2</sup>/g)</b>	320
<b>İletkenlik (S/m)</b>	1400-1900
<b>Renk</b>	Siyah



**Şekil 3.2:** GNP'lere ait SEM görüntüsü [93].

Şekil 3.2'ye bakıldığında GNP'lerin iki boyutlu pullar şeklinde olduğu görülmektedir.

## 3.2 Kompozit Üretimi

### 3.2.1 Takviye malzemesinin hazırlanması

Öncelikle, rulo halinde bulunan jüt kumaştan Şekil 3.3'deki gibi 230x330 mm boyutlarında parçalar kesilmiştir. Çözgü ve atkı doğrultularının üretilen kompozitin mekanik özelliklerini etkilediği bilindiğinden [94] kumaş tabakalarının hep aynı doğrultuda kesilmesine dikkat edilmiştir. Ardından, kesilen kumaştan elyaf-matris arayüz yapışmasını

engelleyici toz, yağ, mum gibi maddeleri uzaklaştırmak ve kumaşın sert kıvrımlarını gidererek kolay şekil alabilirlik kazanmasını sağlamak için şebeke suyu ile yıkama işlemi yapılmıştır. Yıkanan kumaş tabakaları oda sıcaklığında 1 hafta kurutulmak üzere Şekil 3.3'te görüldüğü gibi serilmiştir.



**Şekil 3.3:** Takviye malzemesinin hazırlanması.

### 3.2.2 Matris malzemesinin hazırlanması

Dolgunuz matris malzemesi hazırlanırken amin reçineden ağırlıkça %60 ve HDI prepolimer bileşeninden ağırlıkça %40 alınarak IKA RW 20 dijital karıştırıcı ile 240 d/dk karıştırma hızında 1 dk süreyle karışmaları sağlanmıştır (Şekil 3.4). Poliaspartik poliüre malzemenin viskozitesinin çok hızlı yükseldiği bilindiğinden dolayı matris malzemesi hazırlanırken karıştırma süreleri özellikle düşük tutulmuştur.



**Şekil 3.4:** Karıştırma işlemi.

Nano dolgulu matris malzemesi hazırlanırken (amin reçine+HDI prepolimer+nano dolgu) toplam ağırlığı üzerinden nano dolgu ağırlığı çıkarıldığında kalan miktarın ağırlıkça %60'ı kadar amin reçineye, toplam ağırlığın ağırlıkça %0.5, 1 ve 1.5'i kadar nano dolgu malzemesi eklendikten sonra dijital karıştırıcı ile 2000 d/dk karıştırma hızında 5 dakika boyunca nano dolgu malzemesinin amin reçine içinde dağılması sağlanmıştır. Daha sonra amin reçinenin 2/3'ü oranında HDI prepolimer bileşeni eklenip dijital karıştırıcı ile 240 d/dk karıştırma hızında 1 dakika süreyle karışmaları sağlanmıştır.

### 3.2.3 VDRTK ile kompozit üretimi

#### 3.2.3.1 VDRTK işlemleri elemanları

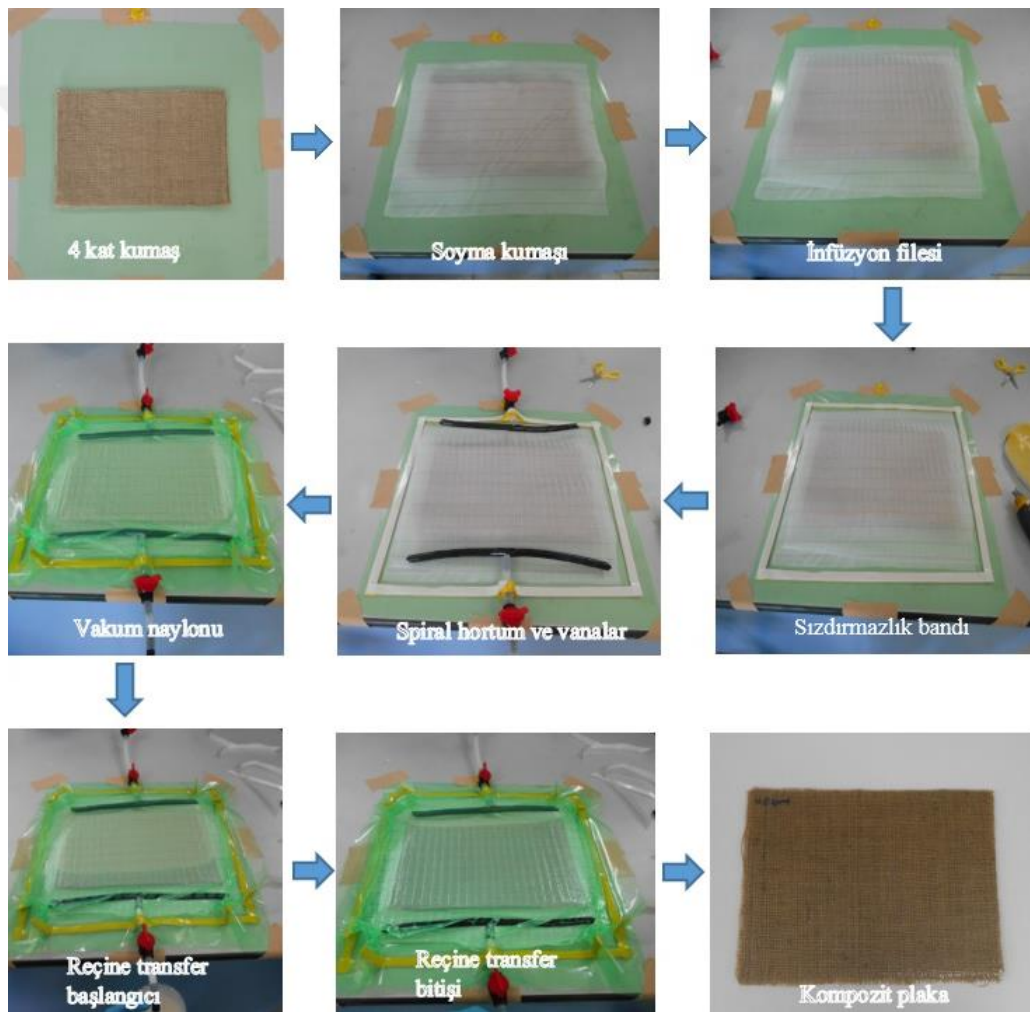
Çalışmada kullanılan VDRTK işlemleri elemanları ve görevleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

**Çizelge 3.5: VDRTK işlemleri elemanları.**

<b>Kullanılan Eleman</b>	<b>Görevi</b>
Vakum naylonu	Kalıp üzerine kurulan sistemin dış kabuğunu oluşturur ve vakum ortamında tutulmasını sağlar.
Sızdırmazlık bandı	Sıkıştırıkça sızdırmazlığı arttığından, vakum altında sınırlandırılmış kapalı alanın sızdırmaz şekilde vakum ortamında kalmasını sağlar.
Soyma kumaşı	Soyma kumaşı, sık dokunmuş ve kaygan yüzeyli olduğundan işlem sonunda plakanın diğer bileşenlerden kolay ayrılmasını sağlar.
İnfüzyon filesi	Reçinenin tüm kalıp yüzeyine dağılmasını sağlar.
İnfüzyon hortumu	Reçinenin sistem içerisinde dolaşımını sağlar.
Spiral hortum	Reçinenin homojen dağılımı için akışını sağlar.
T bağlantı	Spiral hortuma verilen ve spiral hortumdan alınan reçineyi toplar.
Vana	Akış kontrolünü sağlar.
Reçine akış tankı	Sistemden gelen havanın alınması sırasında köpüklü gelen reçineyi içine hapsederek vakum pompasına sıvı geçmesine engel olur.
Vakum göstergesi	Vakum ortamının basıncının ölçümünde görevlidir.
Vakum pompası	Yöntemin temel unsurudur ve vakum ortamını oluşturur.

### 3.2.3.2 VDRTK ile üretim

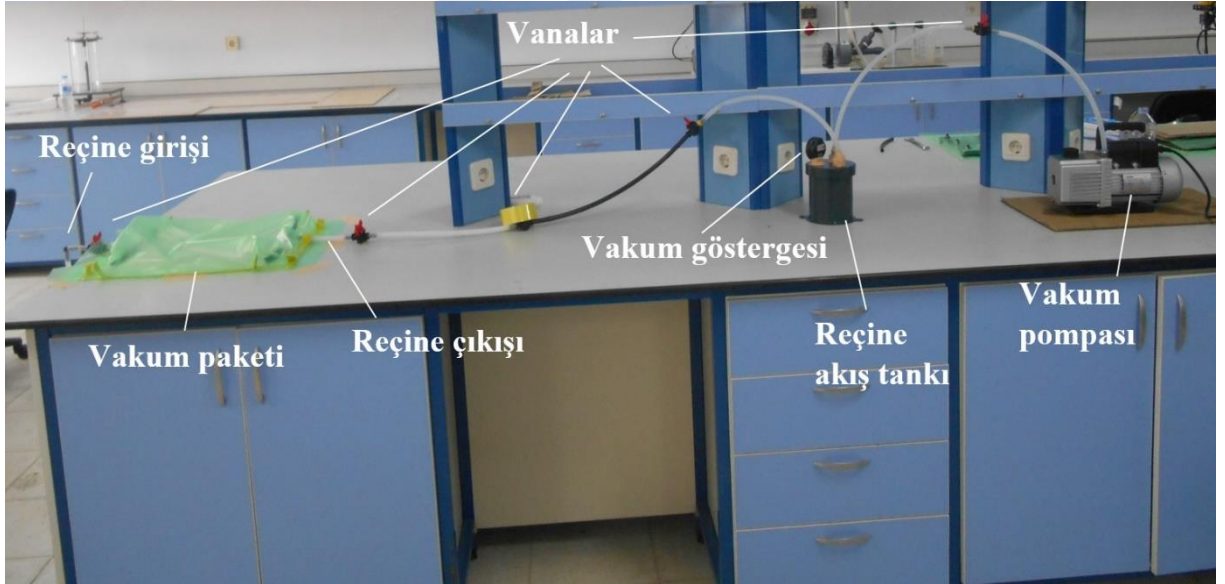
VDRTK işleminde, normalde, önce kalıp (taban) olarak kullanılacak yüzey üzerine kalıp ayırıcı kimyasallar sürülmesine rağmen, çalışmada bunun yerine taban yüzeye de vakum naylonu kaplanması tercih edilmiştir. Tabana vakum naylonu çekildikten sonra önceden hazırlanmış 4 kat jüt kumaş tartılarak bu katmanın üzerine dizilmiştir. Daha sonra jüt kumaş tabakalarının üzerine Şekil 3.5'te görüldüğü gibi sırasıyla soyma kumaşı ve infüzyon filesi serilmiştir. Bu işlemten sonra sınırlara sızdırmazlık bandı çekilmiş ve T bağlantı, dağıtıcı spiral hortum ve vanalar monte edildikten sonra vakum ortamı oluşması için sınırlandırılmış bölgenin üstü vakum naylonu ile kaplanmıştır.



Şekil 3.5: VDRTK işlemi görsel özeti.

Sızdırmazlık testi için Şekil 3.6'da gösterilen düzenekteki reçine giriş vanası kapatıldıktan sonra vakum göstergesi ibresi sabit değere gelene kadar beklenmiş ve daha sonra vakum pompasına yakın vana kapatılarak kapalı sistem oluşturulmuştur. Yaklaşık 15 dakika beklendikten sonra ibre hareketsiz kaldığı durumlarda sonraki aşamaya geçilmiştir. Basınç

değerinin düştüğü durumlarda ise sızıntı olduğu anlaşılmış ve sızıntı bölgeleri bulunarak güçlendirme yapılmış veya vakum paketi tekrar hazırlanmıştır. Kontroller tamamlandıktan sonra reçine hazırlanmış ve bekletmeden vakum pompası çalıştırılarak reçine sisteme verilmiştir. Reçine girişi hortumunda hava kalmaması için, transferden önce vakum pompası çalıştığı sırada, hortumun ucu el yordamıyla kapatılmış ve reçineye daldırıldıktan sonra serbest bırakılmıştır. Jüt kumaşlar ıslandıktan sonra reçine, reçine akış tankına ulaştığında, önce reçine giriş vanası ve ardından reçine çıkış vanası kapatılıp vakum pompasının çalışması durdurularak VDRTK işlemi bitirilmiştir. Vakum paketi 24 saat kürlenmeye bırakılmış ve paket açılır açılmaz soyma kumaşı yardımıyla üretilen kompozit plaka sistemden ayrılarak tartılmıştır. Bu sayede kompozit plaka nem çekmeden son ağırlığı elde edilmiştir. VDRTK işlemi başlamadan önce de kumaşlar tartıldığı için son ağırlıktan bu değerler çıkarılarak takviye ve matrisin ağırlıkça yüzdeleri hesaplanmıştır.



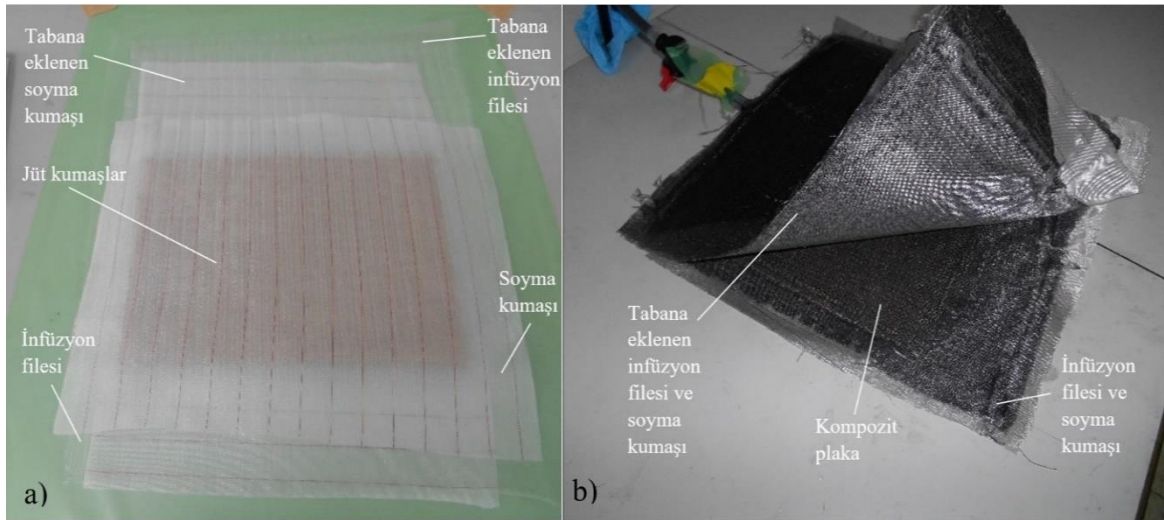
**Şekil 3.6:** VDRTK düzeneği.

Buraya kadar anlatılan işlemler dolgusuz ve  $TiO_2$  dolgulu kompozit plakaların üretiminde aynı şekilde tekrar edilmiştir. GNP dolgulu plakalarda GNP taneciklerinin mikron seviyesinde de ayrıklarının olması ve reçinenin viskozitesini fazla yükseltmesi nedeniyle Şekil 3.7’de görüldüğü gibi jüt kumaş takviyelerinin ıslanmaması sorunuyla karşılaşmıştır.



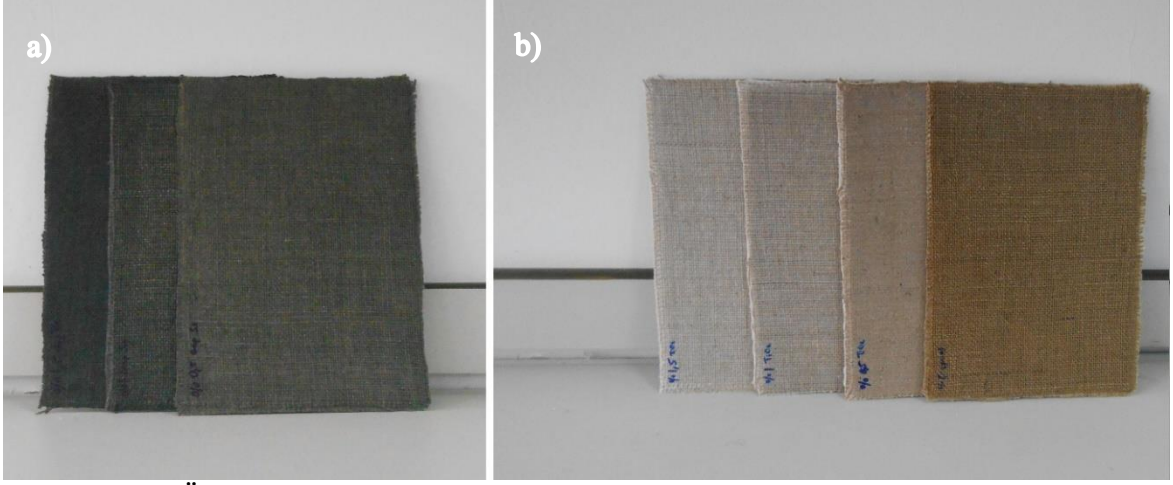
**Şekil 3.7:** GNP dolgusunda elyaf ıslanmaması sorunu.

Sorunu çözmek için Şekil 3.8’de gösterildiği gibi kumaşların üzerine serilen soyma kumaşı ve infüzyon filesi simetrik şekilde alt yüzeye de eklenmiştir. Böylece infüzyon filesi yardımıyla hem alt hem de üst tabakada birlikte reçine akışı oluşturularak jüt kumaşın tamamıyla ıslanması sağlanmıştır. GNP dolgulu kompozitlerin üretimindeki diğer işlemler, dolgunsuz ve TiO<sub>2</sub> dolgulu kompozitlerin üretimindeki işlemlerle aynı şekilde yapılmıştır.



**Şekil 3.8:** Çift taraflı akış uygulaması, a) işlem öncesi, b) işlem sonrası.

VDRTK işlemleri sonrasında Şekil 3.9’da gösterilen kompozit plakalar elde edilmiştir. Şekil 3.9’a bakıldığında nanodolguların kompozit içinde iyi dağıldıkları ve ağırlıkça yüzdelерinin renklerinin koyuluk oranına bakılarak rahatlıkla anlaşılacağı görülmektedir.



**Şekil 3.9:** Üretilen kompozit plakalar, a) GNP dolgulu plakalar, b) dolgusuz ve TiO<sub>2</sub> dolgulu plakalar.

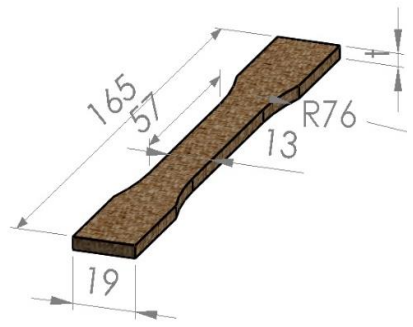
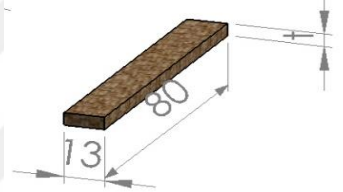
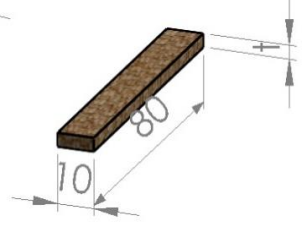
### 3.3 Mekanik Testler

Çalışma kapsamında üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi için, üretilen kompozit plakalardan uygun ebatlarda numuneler hazırlandıktan sonra çekme, eğilme ve darbe testleri uygulanmıştır.

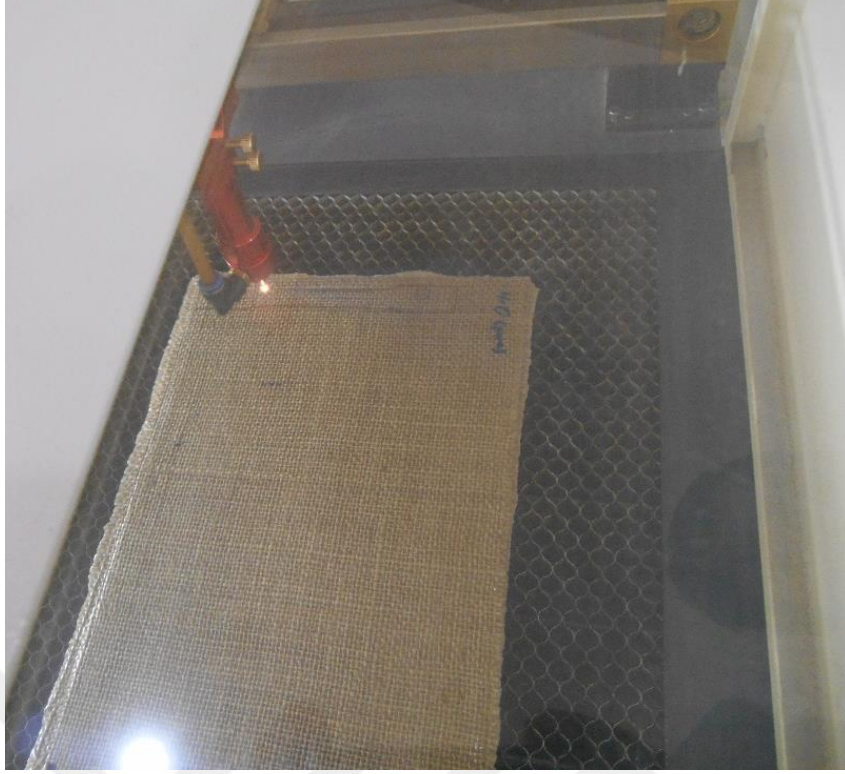
#### 3.3.1 Mekanik testler için numune hazırlanması

Mekanik testler için numune hazırlanırken öncelikle uygun standartlara göre numune boyutları belirlenmiş ve Çizelge 3.6'daki gibi Solid Works 2014 programı kullanılarak 3 boyutlu modelleri hazırlanmıştır. Doğal elyafli kumaş kullanıldığından dolayı numunelerde küçük kalınlık farklılıkları meydana geldiği için Çizelge 3.6'da bu ayrıtların ölçü değerleri "t" ile ifade edilmiştir.

**Çizelge 3.6:** Mekanik test numunelerinin 3 boyutlu modelleri ve standartları.

Mekanik Test	Test Standardı	3 Boyutlu Modeli
Çekme Testi	ASTM D 638-14 [95]	
Eğilme Testi (3 Nokta)	ASTM D 790-03 [96]	
Darbe Testi (Çentiksiz Charpy)	ISO 179-1:2010 [97]	

Hazırlanan tasarımla “dwg” formatında 2 boyutlu taslaklara dönüştürülerek By Laser EBH CNC lazer kesim tezgahına aktarılarak üretilen kompozit levhalardan test numuneleri lazer ile kesilip hazırlanmıştır (Şekil 3.10). CNC lazer kesimde boyut hassasiyetini sağlamak için öncelikle her plakadan küçük boyutlu deneme numuneleri kesilmiş ve lazer güç ve hız ayarı buna göre yapılarak kesim yapılmıştır. Çekme numuneleri için 3'er adet numune hazırlanırken, eğilme testleri için 5'er adet ve darbe testleri için 10'ar adet numune hazırlanmıştır.

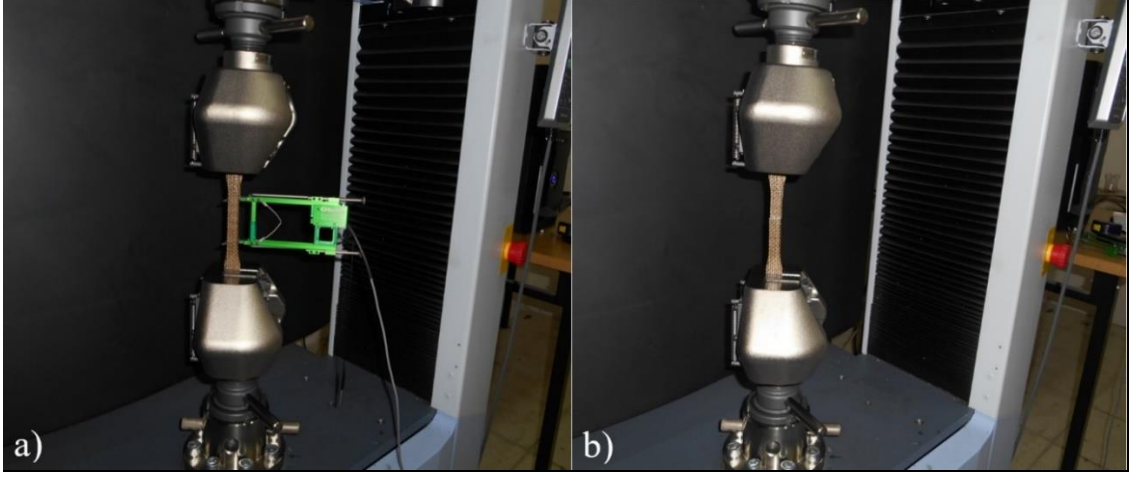


**Şekil 3.10:** CNC lazer tezgahında numune hazırlanışı.

Çözü ve atkı doğrultusu mekanik özellikleri etkilediğinden tüm numunelerin boy doğrultuları plakaların enine paralel şekilde kesim yapılmasına dikkat edilmiştir. Kesim esnasında oluşan ısıl deformasyonların çok ince bir alanda etkili olduğu görüldüğünden ve mekanik özelliklere etkisinin ihmal edilebilir olduğu düşünüldüğünden bu yöntem tercih edilmiştir.

### **3.3.2 Çekme testi**

Kesilen numuneler 1'den 3'e kadar numaralandırıldıktan sonra çeneler arası mesafe olan 115 mm'lik kısımları ortalanarak işaretlenmiştir. Testlere başlamadan önce her numunenin genişlik ve kalınlık değerleri ölçülerek Trapezium X (1.5.1) programına değerleri girilmiştir. Daha sonra ASTM D 638-14 [95] standardına göre 100 kN yük kapasiteli Shimadzu AGS-X çekme cihazı kullanılarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11). Testler 4 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Boyuna uzamayı hassas ölçebilmek için maksimum ölçüm limiti 50 mm olan Epsilon 3542-050M-050-ST eksenel ekstensometre kullanılmıştır.



**Şekil 3.11:** Çekme testi genel görünümü, a) test öncesi, b) test sonrası.

Testler sonunda maksimum kuvvet, maksimum gerilme, maksimum uzama ve anlık kuvvet-uzama verileri Trapezium X (1.5.1) programından alınmıştır. Bu veriler ve aşağıdaki (3.1), (3.2) ve (3.3) denklemleri kullanılarak kompozit numunelerin gerinim ( $\varepsilon$ ), çekme gerilmesi ( $\sigma_c$ ), ve elastisite modülü ( $E_c$ ) değerleri hesaplanmıştır.

$\varepsilon$  : gerinim,

$l_0$  : numune ilk boyu (mm),

$l$  : numunenin uzamadan sonraki boyu (mm),

$\Delta l$ : numunedeki uzama miktarı (mm), olmak üzere;

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.1)$$

$\sigma_c$  : çekme gerilmesi (MPa),

$P$  : çekme kuvveti (N),

$A_0$  : numune orta bölgesi ilk kesit alanı ( $\text{mm}^2$ ) olmak üzere;

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0} \quad (3.2)$$

$E_c$  : elastisite modülü (MPa, daha sonra GPa olarak dönüşüm yapılmıştır) olmak üzere,

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

### 3.3.3 Eğilme testi

Kompozit plakalardan kesilen numuneler numaralandırıldıktan ve orta noktaları işaretlendikten sonra kıyaslanacak tüm numunelerin genişlikleri ve kalınlıkları ölçülmüştür. Genişlikler 13 mm olarak ölçülmüştür ve kalınlıkların ise ortalaması alınmış ve 3.2 mm olarak bulunmuştur. Destek mesafesinin kalınlığa oranı 16:1 olarak alınmıştır. Destek mesafesi (L) 51.2 mm olarak, hareketli kafa hızı (R) ise 1.36 mm/dk olarak ASTM D 790-03 [96]'e göre hesaplanmıştır ve hesaplamalarda kullanılan denklem aşağıda Denklem (3.4)'te verilmiştir.

$$R = ZL^2 / 6h \quad (3.4)$$

Burada,

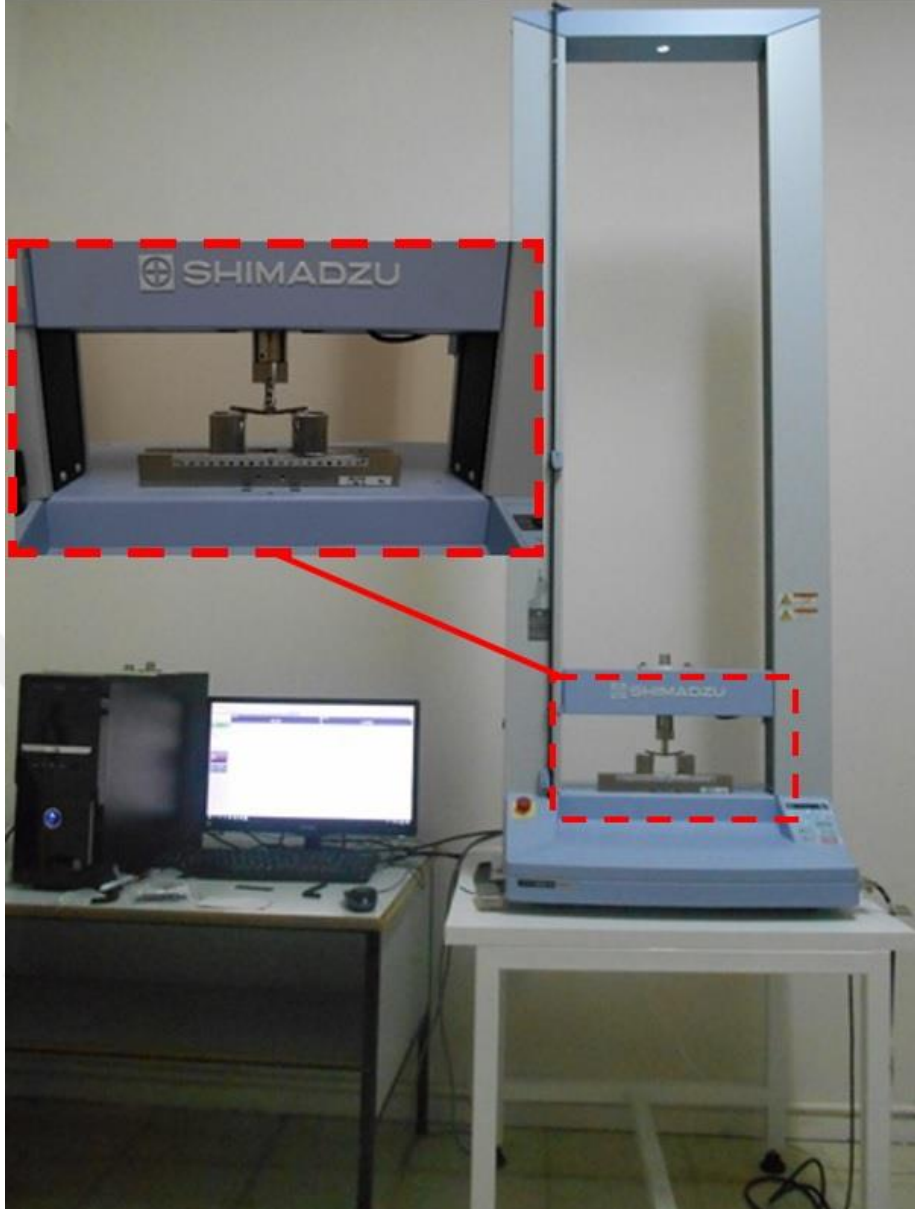
R : hareketli kafa hızı (eğme hızı) (mm/dk),

L : destek mesafesi (mm),

h : numune kalınlığı (mm),

Z : dış elyaf gerilme hızı (mm/mm/dk), (Z=1) olarak alınmıştır.

Orta noktaları işaretlenmiş olan 5'er adet numunenin destek noktalarına karşılık gelecek bölümleri de işaretlendikten sonra numunelere ASTM D 790-03 [96] standardına göre 10 kN yük kapasiteli Shimadzu AGS-X test cihazı ile üç nokta eğilme testi uygulanmıştır (Şekil 3.12). ASTM D 790-03 [96] standardındaki A ve B prosedürlerinde deneme yapıldıktan sonra geriminin %5 değerinden daha küçük olduğu süreçte herhangi bir hasar gözlenmediğinden, deneyler A prosedürüne göre ve cihaz otomatik olarak işlemi durdurana kadar sürdürülmüştür.



**Şekil 3.12:** 3 nokta eğilme testi genel görünümü.

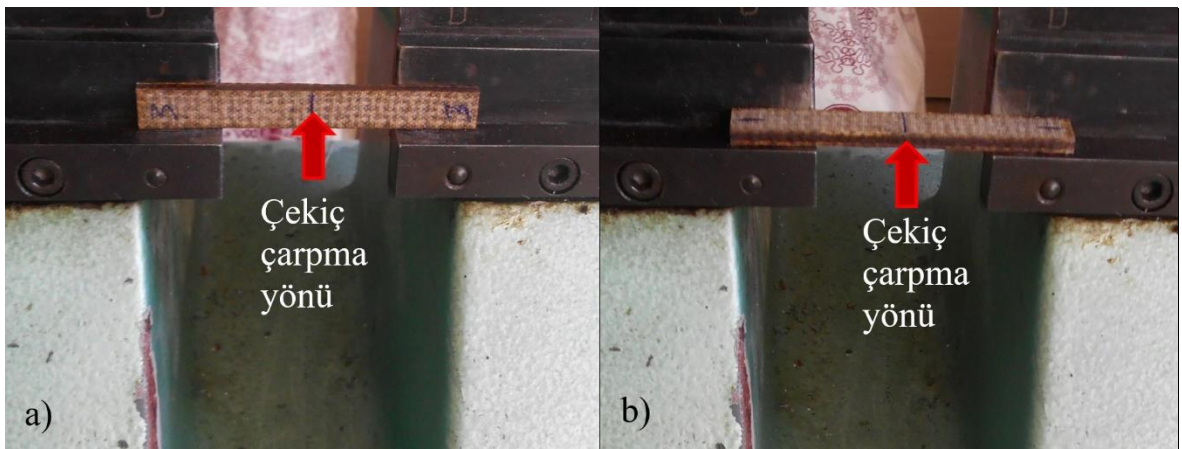
### 3.3.4 Darbe testi

Darbe testlerine başlamadan önce tüm numunelerin genişlik ve kalınlıkları ölçülmüştür. Çentiksiz Charpy darbe testleri, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan yaklaşık 49.03 J kapasiteli Veb Werkstoffprüfmaschinen Leipzig Charpy test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.13). Bu cihazın çekiç kütlesi 6.784 kg, sarkaç uzunluğu ise 380 mm'dir. Destekler arası mesafe ise 40 mm'dir.



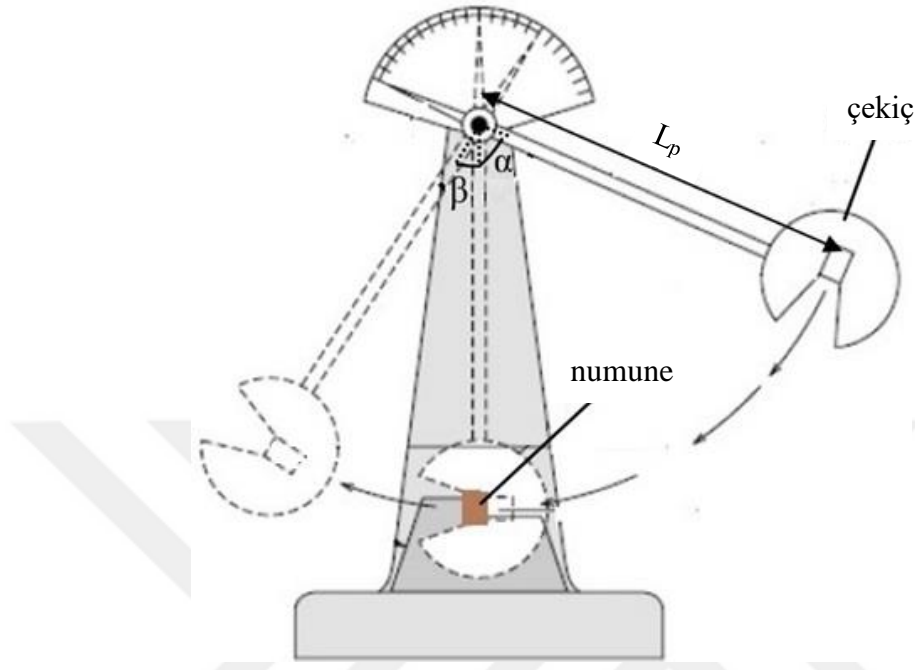
**Şekil 3.13:** Charpy darbe test cihazı.

Numunelerin yarısına Şekil 3.14 a'da görüldüğü gibi çekicinin çarpma doğrultusuna göre yüzeye dik (flat wise) ve diğer yarısına da Şekil 3.14 b'de görüldüğü gibi kenara dik (edge wise) çentiksiz charpy darbe testleri uygulanmıştır.



**Şekil 3.14:** Numunelerin darbe cihazındaki konumları, a) yüzeye dik, b) kenara dik.

Testler sonunda ibredeki derece değerleri okunmuş ve kaydedilmiştir. Öncelikle Şekil 3.15'te gösterilen açılara göre Denklem (3.5) kullanılarak numunelerin kırılırken absorbe ettiği enerji değerleri kgm cinsinden hesaplanmıştır.



Şekil 3.15: Charpy test cihazındaki parametrelerin gösterimi.

$$E=M.L_p (\cos \beta-\cos\alpha) \quad (3.5)$$

Burada,

E: numune kırılırken absorbe ettiği enerji (kgm),

M: çekiç ağırlığı (kg),

$L_p$ : sarkaç uzunluğu (m),

$\alpha$ : düşme açısı ( $^{\circ}$ ),

$\beta$ : yükselme açısı ( $^{\circ}$ ) olarak verilmiştir.

Hesaplanan absorbe edilen enerji değerleri Denklem (3.6) kullanılarak Joule (J) cinsinden değerlere dönüştürülmüştür.

$$E_c=E.g \quad (3.6)$$

$E_c$ : numune kırılırken absorbe ettiği enerji (J),

E: absorbe edilen enerji (kgm),

g: yer çekimi ivmesi (m/s<sup>2</sup>),

g= 9.8067 m/ s<sup>2</sup> olarak alınmıştır.

Dönüşüm yapıldıktan sonra ISO 179-1:2010 [67] standardına göre Denklem (3.7) kullanılarak darbe dayanımları hesaplanmıştır.

$$a_{cU} = \frac{E_C}{h.b} .10^3 \quad (3.7)$$

Burada,

a<sub>cU</sub>: charpy darbe dayanımı (kJ/m<sup>2</sup>),

E<sub>c</sub>: numune kırılırken absorbe ettiği enerji (J),

h: numune kalınlığı (mm),

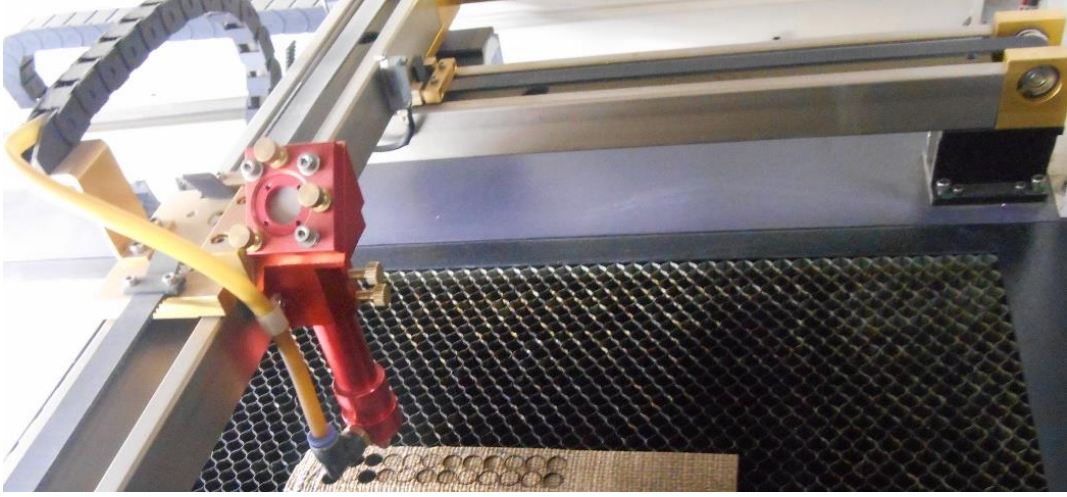
b: numune genişliği (mm) olarak tanımlanmıştır.

### 3.4 Tribolojik Testler

Tribolojik testler uygulanması için öncelikle numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra aşınma oranı hesaplarında kullanılması için dolgusuz ve farklı oranlarda nano dolgu yapılmış numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu işlemden sonra yüksek sıcaklıklarda kuru sürtünme ortamında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

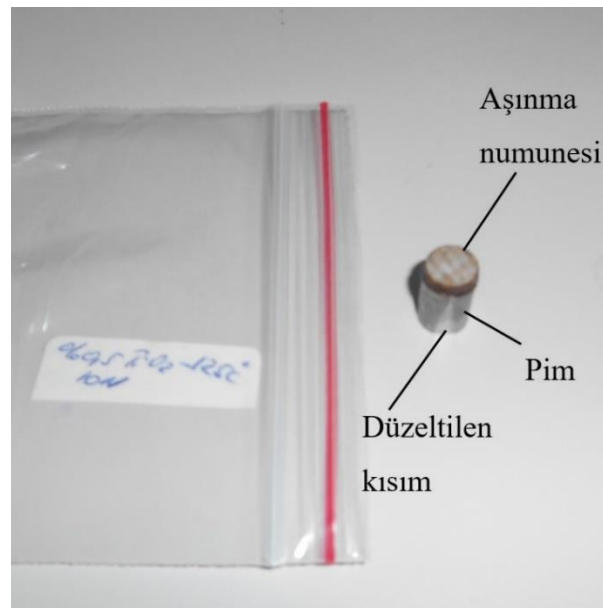
#### 3.4.1 Tribolojik testler için numune hazırlanması

Üretilen doğal elyaf takviyeli dolgusuz ve ağırlıkça % 0.5, %1, %1.5 GNP ve TiO<sub>2</sub> dolgulu kompozit plakalardan Bölüm 3.1.1'de anlatılan yöntemle Ø10 mm boyutlarında aşınma numuneleri kesilmiştir (Şekil 3.16).



**Şekil 3.16:** CNC lazer kesim tezgahında aşınma numunelerinin kesimi.

Kesilen kompozit numuneleri aşınma test cihazına bağlayabilmek için  $\varnothing 10$  mm düşük karbonlu çelik çubuklardan torna tezgahında 12 mm boylarında pimler kesilmiş ve kompozit numuneler bu pimlere BETA Kimya Mitre apel yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır (Şekil 3.17). Bu pimlerin aşınma cihazında numune tutucu üzerinde bulunan setskura gelecek kısımları Şekil 3.17’de görüldüğü gibi eğe ile düzeltilerek aşınma yönünün işaretlenmesinde kullanılmıştır. Son olarak, kompozit numunelerin sürtünmeye maruz kalacak yüzeyleri, soyma kumaşının doku izleri silinene kadar Hermes WS Flex 18 C P 1200 grit SiC zımpara kağıdı ile zımparalanarak rodaj evresi kısaltılmış ve disk yüzeyine daha iyi temas edebilecek hale getirilmiştir.



**Şekil 3.17:** Teste hazır hale getirilmiş numune.

### 3.4.2 Numune yoğunluklarının hesaplanması

Aşınma oranı hesabında kullanılmak üzere, yoğunluklar ölçülürken, her numune tipi için ayrı ayrı olacak şekilde rastgele seçilen numuneler 0.1 mg hassasiyetine sahip Necklife FA 2004 hassas terazi yardımıyla tartılmış ve bu numuneler içinde saf su bulunan 0.2 ml hassasiyetinde dereceli mezura atılarak saf suyun yükseldiği miktar gözlemlenerek hacimleri ölçülmüştür. Yoğunlukların belirlenmesinde kullanılan düzenek Şekil 3.18’de verilmiştir.



**Şekil 3.18:** Aşınma numunelerinin yoğunluklarının belirlenmesi.

Saf su, başlangıçta tam sayı (5ml) hizasına kadar doldurulmuş ve yine tam sayı hizasına yükselene kadar içine numune atılmaya devam edilmiştir. Daha sonra denklem (3.8) kullanılarak numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır.

$\rho$ : yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

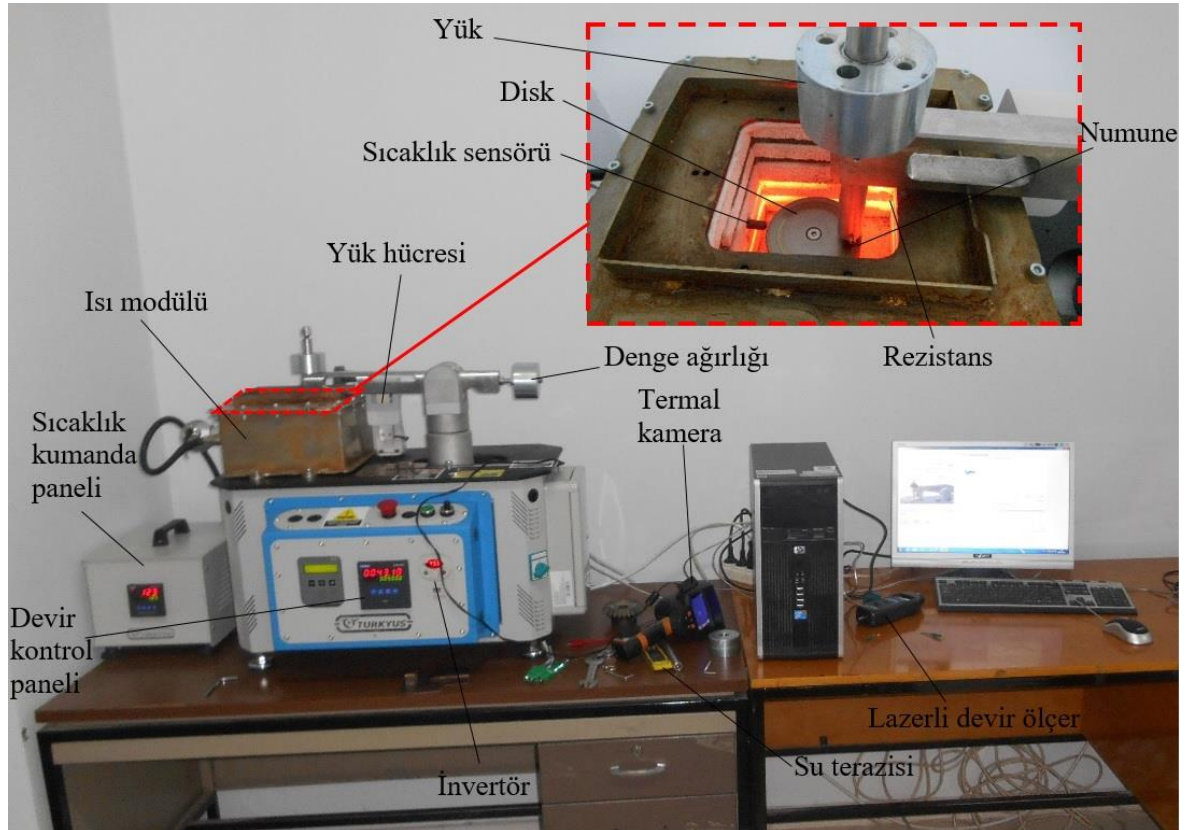
m: kütle (g),

v: hacim ( $\text{cm}^3$ ) olmak üzere;

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.8)$$

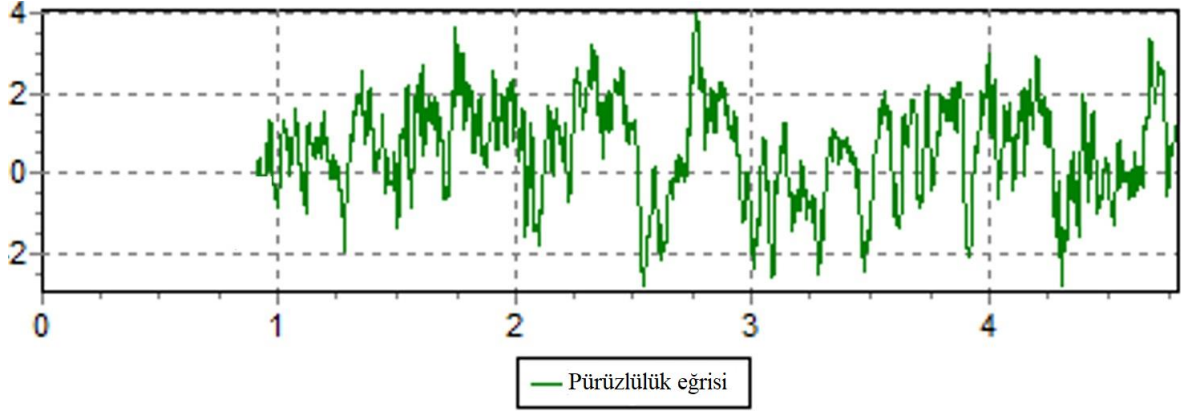
### 3.4.3 Yüksek sıcaklıkta aşınma testleri

Aşınma testleri Şekil 3.19'daki düzenekte gösterilen pim-disk tipi ısı modüllü Turkey POD&HT&WT tribotest cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşı yüzey olarak 20xØ80 mm boyutlarında ve 58 HRC yüzey sertliğine sahip AISI 4140 ıslah çeliği disk kullanılmıştır. Deneyler, ortam sıcaklığı 20-23 °C ve nem oranı yaklaşık %60 olan laboratuvar koşullarında yürütülmüştür.



Şekil 3.19: Aşınma testi düzenegi.

Karşı yüzey olarak kullanılan diskin yüzey pürüzlülüğü Time TR 3200 pürüzlülük ölçer ile numune uzunluğu 0.8 mm, pürüzlülük değerlendirme uzunluğu 4 mm olacak şekilde ölçülmüş ve Time 3200-EN (1.0) programı yardımıyla pürüzlülük eğrileri alınmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri  $R_a=1.033 \mu\text{m}$  olarak bulunmuş ve ortalama değere en yakın pürüzlülük eğrisi Şekil 3.20'de sunulmuştur.



**Şekil 3.20:** Metal karşı yüzeye ait yüzey pürüzlülüğü eğrisi.

Aşınma testlerine başlamadan önce parametreler belirlenmiş ve Turkyus programına girilecek değerler hesaplanmıştır. İlk olarak kayma hızının 2 m/s olmasına karar verilmiştir. Daha sonra iz çapının 60 mm olması düşünülerek cihazın kolu bu mesafeye ayarlanmış ve kalibrasyonu yapılmıştır. 60 mm iz çapında 2 m/s kayma hızına ulaşılması için diskin kaç d/dk hızla dönmesi gerektiği denklem (3.9) ile hesaplanmıştır.

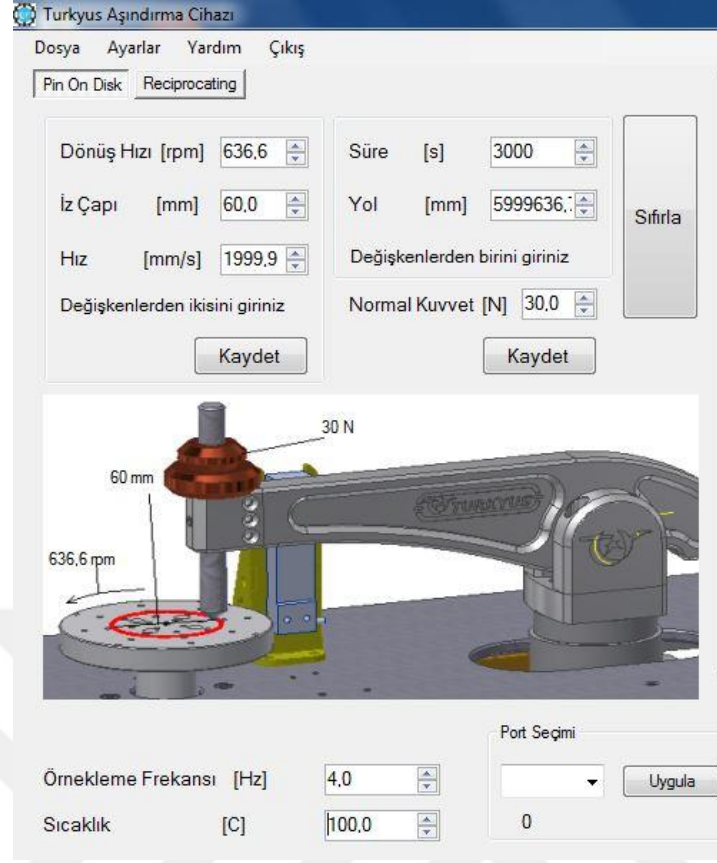
$V_c$ : Dönme hızı (m/s),

$d$ : İz çapı (mm),

$n$ : 1 dk'daki devir sayısı (d/dk) olmak üzere;

$$n = \frac{60000.V_c}{d.\pi} \quad (3.9)$$

$n=636.2$  d/dk olarak hesaplandıktan sonra disk kenarına reflektör bant yapıştırılarak bu değeri invertörün hangi frekansta verdiğinin bulunması için DT-2236C lazer takometre kullanılarak disk devir hızı ölçülmüş ve invertörün uygun frekansı 45.5 Hz olarak bulunmuştur. Yapılan ön çalışmaların da etkisiyle testlerin 6 km kayma mesafesi yani 50 dk boyunca sürdürülmesine karar verilmiştir. Daha sonra numune tribotest cihazına yerleştirilmiş ve su terazisi yardımıyla kuvvet kolu yatay hale getirilmiştir. Hesaplanan değerler Turkyus programına girildikten sonra (Şekil 3.21) testlere başlanmıştır. Örnekleme frekansı 4 Hz olarak ayarlanmış ve saniyede 4 veri alınması sağlanmıştır. Bu koşullarda kompozit numuneler ile disk yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı kaydedilmiştir.



**Şekil 3.21:** Test parametrelerinin Turkeyus programına girilmesi.

4 farklı dolgu oranı (%0, %0.5, %1, %1.5) ve 2 farklı dolgu malzemesi (GNP ve  $TiO_2$ ) toplam 7 farklı tip numune için tek kayma hızı değerinde (2m/s), tek kayma mesafesi değerinde (6 km), 3 yük değeri (10, 20 ve 30 N) altında ve 3 farklı sıcaklıkta (100,125 ve 150 °C ) ASTM G 99-95a [98] standardına göre aşınma testleri yürütülmüştür. Her test başlangıcında ve test bitiminde numuneler 0.1 mg hassasiyetine sahip Necklife FA 2004 hassas terazi yardımıyla tartılmış ve farkları alınarak aşınan kütle hesaplanmıştır. Aşınma dirençlerini kıyaslamak için güvenilir bir parametre olan spesifik aşınma oranları Denklem (3.10) ile hesaplanmıştır.

W: Spesifik aşınma oranı ( $cm^3/Nm$ ),

$\Delta m$ : Aşınan kütle (g),

$\rho$ : yoğunluk ( $g/cm^3$ ),

$F_N$ : yük (N),

S: kayma mesafesi (m) olarak verilmiştir.

$$W = \frac{\Delta m}{\rho F_N S} \quad (3.10)$$

Ayrıca her test bitiminde, metal disk karşı yüzey asetonla temizlenerek sonraki teste hazırlanmıştır. Her 10 dk'da bir Şekil 3.22'de gösterildiği gibi Testo 875-1i termal kamera ile sürtünmeli yüzeylerden termal görüntü alınmış ve temas yüzeyi (ara yüzey) bölgesindeki en yüksek sıcaklık noktasının anlık sıcaklığı Testo IR Soft programı yardımıyla alınarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.22: Termal görüntü alınması.

### 3.5 Morfolojik Analiz

İlk olarak SEM'de görüntü alabilmek için polimer kompozit numunelerin yüzeyleri altın-paladyum tozlarıyla kaplanmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23: Altın-paladyum kaplanan kompozit numuneler.

Daha sonra SEM analizi için çekme deneyi numunelerinin çekme hasarına uğrayan kesitlerinin, aşınma numunelerinin ve metal disk karşı yüzeyin birbirleriyle sürtünen yüzeylerinin Şekil 3.24'te gösterilen 20 kV kapasiteli Leo Evo 40 taramalı elektron

mikroskobunda görüntüleri alınmıştır. Ayrıca bazı numunelere enerji yayımlı X-ışını (EDX) analizi yapılmıştır.



**Şekil 3.24:** Taramalı elektron mikroskobu.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1 Üretilen Kompozit Plakalarda Takviye - Matris Oranları ve Elyafların Islanma Durumları

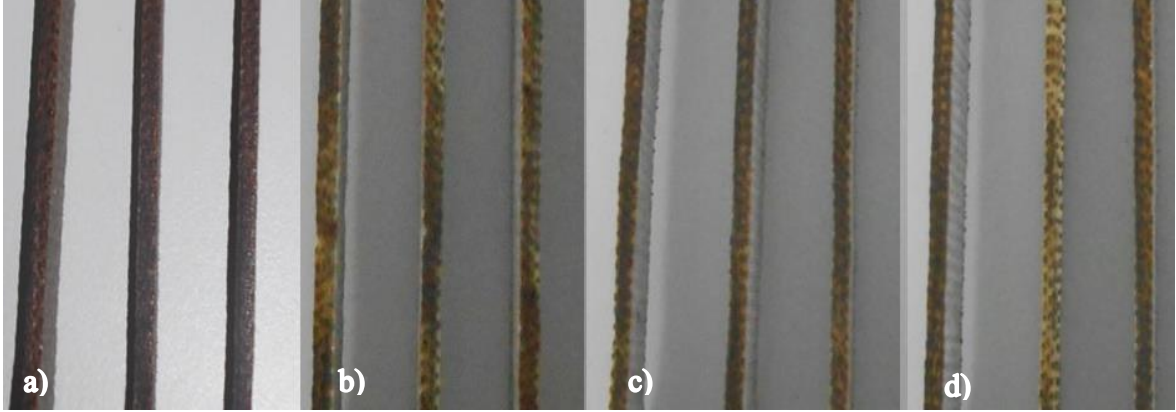
Kompozitlerin mekanik özellikleride elyaf takviye oranının önemli etkisi bulunduğundan, kompozitlerin takviye ve matris oranları hesaplanmıştır. Takviye ve matris oranları hesaplanırken bölüm 3.2.3.2’de anlatıldığı gibi VDRTK işleminden önce elyaf kumaşlar ve işlemin sonunda vakum paketi açılır açılmaz üretilen plakalar tartılmıştır. Bunların farkları alınarak ağırlıkça elyaf ve matris oranları Çizelge 4.1’teki gibi hesaplanmıştır. Bu yöntemde, başlangıçta tartılan kumaşların absorbe ettiği nemin ağırlığı da doğal elyafın ağırlığına dahil olduğu için yapılan hesabın küçük bir hata payı vardır. Jüt içindeki nem miktarının ağırlıkça %12.6 olduğu verilmiştir [28]. Ancak bu durum, çalışmada bulunan tüm numunelerdeki kumaşlar için geçerli olduğundan, kompozitlerin aynı koşullar altında birbirleriyle kıyaslanmasında bilimsel yöntem açısından bir sakınca bulunmamaktadır.

**Çizelge 4.1:** Kompozit plakaların takviye-matris oranları.

<b>Kompozit plaka</b>	<b>Elyaf ağırlığı (g)</b>	<b>Plaka ağırlığı (g)</b>	<b>% Takviye</b>	<b>% Matris</b>
<b>Dolgunsuz</b>	70.18	244.33	28.72	71.28
<b>% 0.5 TiO<sub>2</sub></b>	70.85	243.05	29.15	70.85
<b>% 1 TiO<sub>2</sub></b>	68.00	228.89	29.71	70.29
<b>% 1.5 TiO<sub>2</sub></b>	70.25	236.55	29.70	70.30
<b>% 0.5 GNP</b>	72.33	222.84	32.46	67.54
<b>% 1 GNP</b>	68.23	220.03	31.00	69.00
<b>% 1.5 GNP</b>	78.32	246.61	31.76	68.24

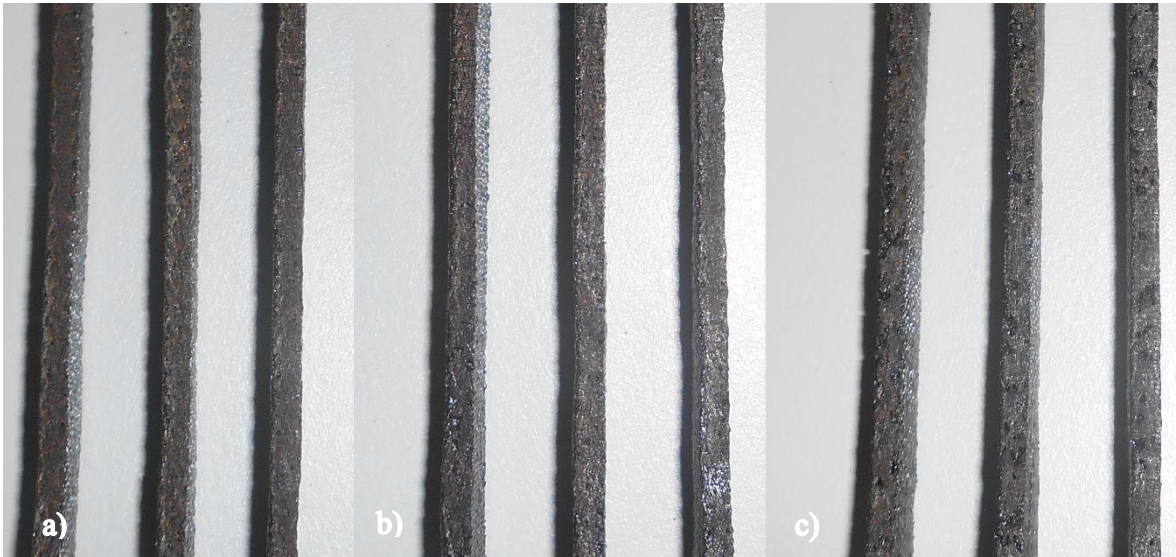
Çizelge 4.1’e bakıldığında, dolgunsuz kompozit plakada ağırlıkça matris oranının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da, elyafın en fazla reçine çektiği kompozitlerin dolgunsuz kompozitler olduğunu göstermektedir. TiO<sub>2</sub> dolgu yapmanın matris oranını dolgunsuz kompozitlere kıyasla çok az miktarda azalttığı görülmektedir. GNP dolgu yapmanın ise matris oranını TiO<sub>2</sub> dolgu yapmaya göre daha fazla azalttığı görülmektedir. Şekil 4.1’e bakıldığında, dolgunsuz ve TiO<sub>2</sub> dolgulu çekme numunelerinin kesit görüntülerinden de

anlaşılacağı gibi numune kesitlerinde gözle görülür belirgin boşluklar bulunmamaktadır ve takviye malzemesi, matris malzemesiyle iyi ıslanmış durumdadır.



**Şekil 4.1:** Dolgusuz ve TiO<sub>2</sub> dolgulu çekme numunelerinin kesit görüntüleri, a) dolgusuz, b) %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu, c) %1 TiO<sub>2</sub> dolgulu, d) %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu numuneler.

Şekil 4.2'deki numunelere bakıldığında ise gözle görülür belirgin boşluklar bulunduğu ve takviye malzemesinin matris malzemesiyle ıslanmasında problemler olduğu görülmektedir. Bu problemler GNP dolgu oranı arttıkça artmaktadır. Kompozit üretiminde yaşanan zorluklar ve çift taraflı infüzyon filesi ile soyma kumaşı kullanılarak bu zorlukların çözümü de bu durumu doğrulamaktadır.



**Şekil 4.2:** GNP dolgulu çekme numunelerinin kesit görüntüleri, a) %0.5 GNP dolgulu, b) %1 GNP dolgulu, c) %1.5 GNP dolgulu numuneler.

## 4.2 Mekanik Testlere Ait Bulgular

### 4.2.1 Çekme testi sonuçları

Yapılan çekme testleri sonrasında dolgu çeşidine ve ağırlıkça dolgu oranına göre test sonuçları Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2: Çekme testi sonuçları.

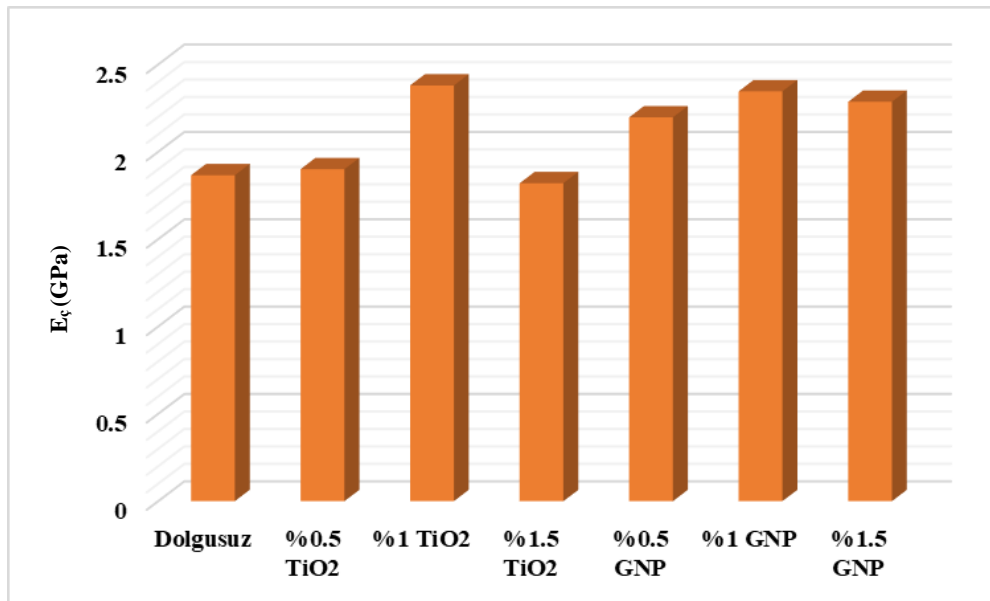
No	Parametreler (Maksimum)	Dolgunsuz	%0.5 TiO <sub>2</sub>	%1 TiO <sub>2</sub>	%1.5 TiO <sub>2</sub>	%0.5 GNP	%1 GNP	%1.5 GNP
1	Çekme Gerilmesi (MPa)	23.1693	25.5969	31.1579	25.9195	25.6476	26.1437	23.605
	Kuvvet (N)	1016.2	1164.66	1302.27	1116.77	1066.94	1112.94	1096.22
	Uzama (mm)	3.1926	4.3593	3.6986	3.6413	3.2606	3.6306	3.3053
2	Çekme Gerilmesi (MPa)	23.8078	25.9534	30.5048	26.9041	28.668	28.959	27.5242
	Kuvvet (N)	1044.21	1113.4	1235.63	1159.19	1229.86	1232.78	1278.23
	Uzama (mm)	3.8139	4.3733	3.5126	4.5219	3.8879	4.4046	3.5379
3	Çekme Gerilmesi (MPa)	24.3159	28.5517	31.9317	26.3362	29.4879	25.1065	27.872
	Kuvvet (N)	1066.49	1224.87	1235.76	1087.16	1226.7	1068.78	1308.76
	Uzama (mm)	3.7073	3.8693	3.2793	4.4992	4.4879	3.4606	3.79923
Ort.	Çekme Gerilmesi (MPa)	23.7643	26.7007	31.1981	26.3866	27.9345	26.7364	26.3337
	Kuvvet (N)	1042.3	1167.643	1257.887	1121.04	1174.5	1138.167	1227.7367
	Uzama (mm)	3.5713	4.2006	3.4968	4.22078	3.8788	3.8319	3.5475

Çekme testleri sonrasında gerilme dayanımları kıyaslanmıştır ve elde edilen verilere göre, poliaspartik PU<sub>r</sub> matrise nano TiO<sub>2</sub> ve GNP dolgusu yapılarak üretilen kompozitlerin dolgunsuz reçine matrisli kompozitlere göre daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. En yüksek çekme dayanımı değerine %1 TiO<sub>2</sub> dolgusunda ulaşılırken GNP dolgusunda dolgu oranı arttıkça çekme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu azalmanın miktarının az olduğu ve ciddi farklar yaratmadığı görülmüştür. 3’er adet numunenin tamamı çeneler arası bölgeden sünek kırılmıştır ve testler geçerli şekilde sonuçlanmıştır (Şekil 4.3).



**Şekil 4.3:** Çekme testleri sonrası kopma hasarları, a) Dolgusuz, b) %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu, c) %1 TiO<sub>2</sub> dolgulu, d) %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu, e) %0.5 GNP dolgulu, f) %1 GNP dolgulu, g) %1.5 GNP dolgulu numuneler.

Çekme testleri sonrasında numunelere ait ortalama elastisite modülü ( $E_c$ ) değerleri Şekil 4.4'te sunulmuştur.



**Şekil 4.4:** Kompozit numunelerin çekme testleri sonrası ortalama  $E_c$  değerleri.

Şekil 4.4'ten görüldüğü gibi, en yüksek ortalama  $E_c$  değeri (2.3798 GPa) %1  $TiO_2$  dolgulu numunelerde ve onların hemen ardından %1 GNP dolgusu yapılan numunelerde (2.3461 GPa) görülmüştür. En düşük ortalama  $E_c$  değeri (1.8201 GPa) ise %1.5  $TiO_2$  dolgulu numunelere ve onların hemen ardından dolgusuz numunelerde (1.8660 GPa) görülmüştür. En büyük ortalama  $E_c$  değeri %1  $TiO_2$  dolgusunda görülmüş olsa da genel olarak GNP dolgusu yapılması  $TiO_2$  dolgusu yapılmasına göre ortalama  $E_c$  değerini daha çok artırmıştır.

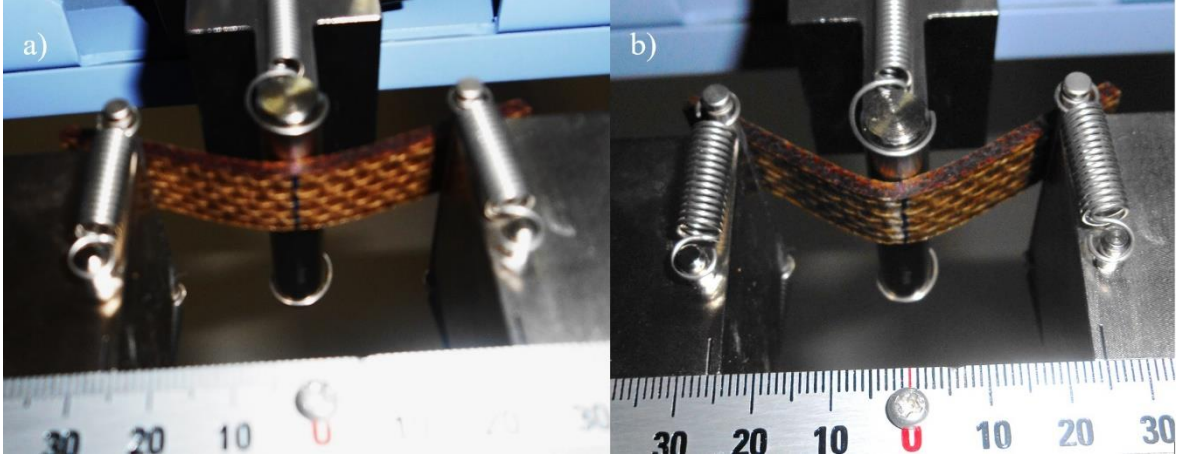
#### 4.2.2 Eğilme testi sonuçları

Eğilme testi sonuçları Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

**Çizelge 4.3:** Üç nokta eğilme testi sonuçları.

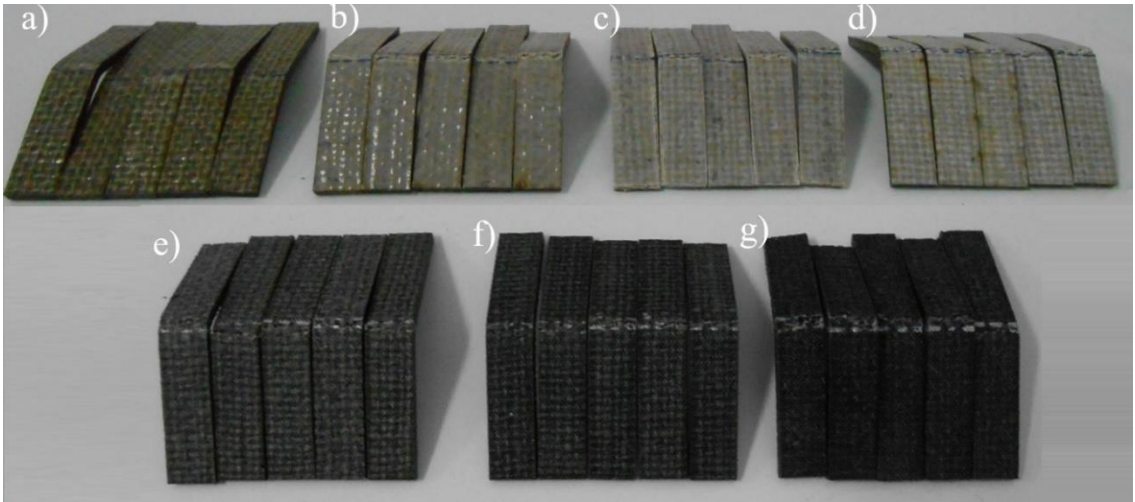
No	Parametreler (Maksimum)	Dolgusuz	%0.5 $TiO_2$	%1 $TiO_2$	%1.5 $TiO_2$	%0.5 GNP	%1 GNP	%1.5 GNP
1	Kuvvet (N)	52.9734	57.3794	50.6147	63.8771	54.1083	46.8699	75.8950
	Eğilme Dayanımı (MPa)	<b>31.7407</b>	<b>31.1276</b>	<b>31.1151</b>	<b>39.2681</b>	<b>33.4784</b>	<b>29.7654</b>	<b>38.7858</b>
	Deplasman (mm)	7.8109	7.2014	7.0442	8.4883	5.6235	4.9857	4.5475
2	Kuvvet (N)	51.6717	58.2838	50.7132	63.8771	51.1265	56.9852	87.2167
	Eğilme Dayanımı (MPa)	<b>30.9607</b>	<b>30.6815</b>	<b>31.7879</b>	<b>41.3761</b>	<b>31.8392</b>	<b>33.5013</b>	<b>41.5846</b>
	Deplasman (mm)	6.8675	5.4195	5.0728	8.4888	5.3550	5.5693	5.5848
3	Kuvvet (N)	44.6415	64.6178	52.1453	60.7650	52.3837	66.7254	68.4786
	Eğilme Dayanımı (MPa)	<b>26.7484</b>	<b>33,0227</b>	<b>32.056</b>	<b>39.8867</b>	<b>33.0500</b>	<b>41.0191</b>	<b>34.1866</b>
	Deplasman (mm)	8.0770	6.2072	7.0649	8.1443	6.4842	6.8843	5.1740
4	Kuvvet (N)	54.4771	58.8592	55.4593	55.8933	64.5669	67.7904	78.4334
	Eğilme Dayanımı (MPa)	<b>32.6417</b>	<b>30.9844</b>	<b>34.0933</b>	<b>36.2046</b>	<b>35.4552</b>	<b>39.1098</b>	<b>38.4822</b>
	Deplasman (mm)	7.5952	7.7563	6.8688	7.0662	6.6936	5.9275	5.2811
5	Kuvvet (N)	65.4952	68.5199	61.0892	64.3428	58.4364	55.7343	63.8437
	Eğilme Dayanımı (MPa)	<b>38.2625</b>	<b>36.0699</b>	<b>32.7421</b>	<b>36.6612</b>	<b>35.0140</b>	<b>34.7088</b>	<b>32.2466</b>
	Deplasman (mm)	6.0263	6.5223	6.3246	6.1090	5.4560	8.0512	5.1339
Ort.	Kuvvet (N)	53.8518	61.5320	54.0043	61.7511	56.1244	58.8210	74.7735
	Eğilme Dayanımı (MPa)	<b>32.0708</b>	<b>32.3772</b>	<b>32.3589</b>	<b>38.6793</b>	<b>33.7674</b>	<b>35.6209</b>	<b>37.0572</b>
	Deplasman (mm)	7.2754	6.6213	6.4751	7.6594	5.9225	6.2836	5.1443

Üç nokta eğilme deneyleri için kullanılan ASTM D790-03 [93] standardına göre %5 gerinim değerine ulaşmadan numunelerin hasar görmesi ve testin sonlandırılması beklenmekte olduğu halde, numunelerin elastik davranışlarından dolayı cihaz testi durduruncaya kadar test devam ettirilmiştir. Hasar ise, genellikle %5-%10 gerinim değerleri arasında oluşmuştur. Dolgusuz numunelerden 2 numaralı numunenin %5 gerinim esnasında dış elyaflarında hasar görülmezken, yaklaşık %9 gerinimde dış elyaf hasarı gözlenmiştir (Şekil 4.5).



**Şekil 4.5:** Dolgusuz 2 numaralı numunenin üç nokta eğilme testi görünümü, a) %5 gerinim anı, b) %9 gerinim anı.

Üç nokta eğilme testleri sonunda dolgusuz numunelerle kıyaslandığında tüm nano dolguların eğilme dayanımlarını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır (Çizelge 4.3).  $\text{TiO}_2$  dolgusunda, %0.5 ve %1 dolgu oranlarında eğilme dayanımları arasında ciddi bir fark oluşmadığı, %1.5  $\text{TiO}_2$  dolgusunda maksimum dayanıma ulaşıldığı, bunun dışında GNP dolgulu numunelerde dolgu oranı arttıkça eğilme dayanımının da arttığı gözlenmiştir. Şekil 4.6'da numunelerin eğilme testi sonrası görüntüleri sunulmuştur. Şekil 4.6'da a'dan d'ye doğru  $\text{TiO}_2$  dolgu oranı arttıkça numunelerin ilk hallerine dönme eğiliminin azaldığı görülmektedir.



**Şekil 4.6:** Eğilme testi sonrası numuneler, a) Dolgusuz, b) %0.5  $\text{TiO}_2$  dolgulu, c) %1  $\text{TiO}_2$  dolgulu, d) %1.5  $\text{TiO}_2$  dolgulu, e) %0.5 GNP dolgulu, f) %1 GNP dolgulu, g) %1.5 GNP dolgulu numuneler.

### 4.2.3 Darbe testi sonuçları

Numunelerin yarısına (5'er adedine) kenara dik, diğer yarısına ise yüzeye dik çentiksiz charpy darbe testi uygulanmıştır. Kenara dik (edge-wise) çentiksiz charpy testlerine ait darbe dayanımı sonuçları Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

**Çizelge 4.4:** Kenara dik çentiksiz charpy darbe testi sonuçları.

No	Kenara dik darbe dayanımı	Dolgunsuz	%0.5 TiO <sub>2</sub>	%1 TiO <sub>2</sub>	%1.5TiO <sub>2</sub>	%0.5 GNP	%1 GNP	%1.5 GNP
1	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	9.5458	9.7602	9.6212	11.1284	11.6477	10.5888	7.8699
2	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	9.3009	12.3385	10.6475	12.4927	11.6477	12.4927	9.9838
3	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	10.1579	10.5888	16.3327	12.3385	10.9197	10.9197	9.0352
4	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	11.8274	10.5888	11.0300	9.8822	9.8822	12.4927	9.0352
5	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	10.3997	9.5828	9.6796	11.1998	9.8822	11.1284	8.0948
ort.	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	10.2464	10.5718	11.4622	11.4083	10.7959	11.5245	8.8038

Kenara dik çentiksiz charpy darbe testlerinin sonuçlarına bakıldığında; TiO<sub>2</sub> dolgu yapmanın genel olarak darbe dayanımını artırdığı, GNP dolgu yapmanın ise %1 dolgu oranına kadar dolgunsuz matrise göre darbe dayanımını artırdığı ancak bu orandan sonra daha da azalttığı görülmektedir. En yüksek darbe dayanımına ise %1 GNP dolgulu numunelerin sahip olduğu görülmektedir.

Yüzeye dik çentiksiz charpy testlerine ait darbe dayanımı sonuçları Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

**Çizelge 4.5:** Yüzeye dik çentiksiz charpy darbe testi sonuçları.

No	Yüzeye dik darbe dayanımı	Dolgunsuz	%0.5 TiO <sub>2</sub>	%1 TiO <sub>2</sub>	%1.5TiO <sub>2</sub>	%0.5 GNP	%1 GNP	%1.5GNP
1	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	8.7606	10.4620	13.0260	14.6109	9.8822	10.0711	8.6877
2	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	11.9691	11.9691	12.6189	12.3385	9.8822	10.0711	8.4554
3	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	9.5828	11.9691	12.8600	11.9691	8.8536	10.0711	7.5753
4	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	9.7602	13.4953	12.9425	14.6994	9.8822	10.0711	8.4554
5	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	10.7849	10.4620	13.0260	14.6109	10.9197	10.0711	9.3431
ort.	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	<b>10.1715</b>	<b>11.6715</b>	<b>12.8947</b>	<b>13.6458</b>	<b>9.8840</b>	<b>10.0711</b>	<b>8.5034</b>

Çizelge 4.5'e bakıldığında; yüzeye dik çentiksiz charpy darbe testlerinde TiO<sub>2</sub> dolgulu numunelerde dolgu oranı arttıkça darbe dayanımının da arttığı görülmektedir. GNP dolgusu yapmanın da dolgunsuz numunelere kıyasla darbe dayanımını düşürdüğü görülmektedir. %1 GNP dolgusunda tüm numunelerin darbe dayanımları tutarlı bir şekilde aynıdır. Darbe dayanımı %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu numunelerde en yüksek değere ulaşmıştır. En düşük değer ise %1.5 GNP dolgulu numunelerde görülmektedir.

Kenara dik darbe testlerinden yüzeye dik darbe testlerine geçildiğinde TiO<sub>2</sub> dolgulu numunelerin darbe dayanımları artarken GNP dolgulu numunelerinki ise azalmıştır. Bu durum kumaş katmanları arasındaki matris ile elyaflar arasındaki arayüz yapışmasının GNP dolgu yapılması durumunda azaldığına işaret etmektedir. Üretimde oluşan boşluklu yapı da bu yorumu doğrulamaktadır. Diğer yandan TiO<sub>2</sub> dolgusu ise bahsedilen bölgedeki arayüz yapışmasını güçlendirmiştir.

Çentiksiz kenara dik ve yüzeye dik charpy darbe test numunelerinin test sonrasına ait hasarlı görüntüleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Yüzeye dik charpy darbe testi uygulanan numunelere "f" işareti konulmuştur.



**Şekil 4.7:** Çentiksiz Charpy darbe testi sonrası hasarlı numuneler, a) Dolgusuz, b) %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu, c) %1 TiO<sub>2</sub> dolgulu, d) %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu, e) %0.5 GNP dolgulu, f) %1 GNP dolgulu, g) %1.5 GNP dolgulu numuneler.

Şekil 4.7'ye bakıldığında;

- Dolgusuz, %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu, %1 TiO<sub>2</sub> dolgulu ve %1 GNP dolgulu numunelerde yüzeye dik darbe testi uygulanan numunelerin %20'sinin tam olarak kırılmadığı, menteşe kırılması yaptığı görülmektedir. %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu numunelerin ise %100'ünün tam kırılmadığı görülmektedir.
- %0.5 GNP dolgulu ve %1.5 GNP dolgulu numunelerde yüzeye dik darbe testi numunelerinin tamamının tam kırıldığı görülmektedir.
- Tüm numune çeşitleri için kenara dik darbe test numunelerinin tamamının tam kırıldığı görülmektedir.

### 4.3 Tribolojik Testlere Ait Bulgular

#### 4.3.1 Numune yoğunlukları

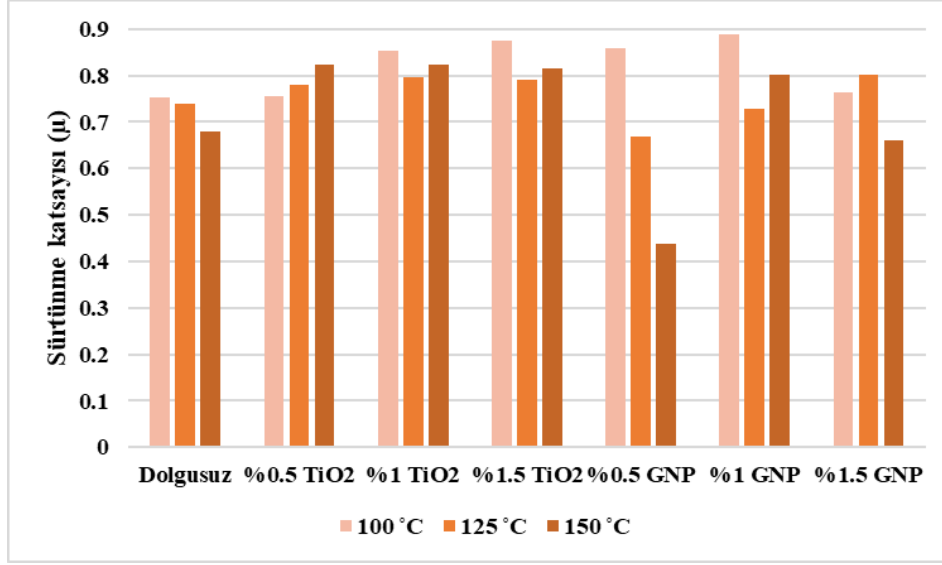
Aşınma testleri için hazırlanan dolgusuz ve farklı oranlarda TiO<sub>2</sub> ve GNP nano dolguları içeren kompozit numunelerin yoğunlukları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6: Aşınma numunelerinin yoğunlukları.

	Dolgusuz	%0.5 TiO <sub>2</sub>	%1 TiO <sub>2</sub>	%1.5 TiO <sub>2</sub>	%0.5 GNP	%1 GNP	%1.5 GNP
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.2060	1.1510	1.1570	1.1560	1.1430	1.2000	1.1620

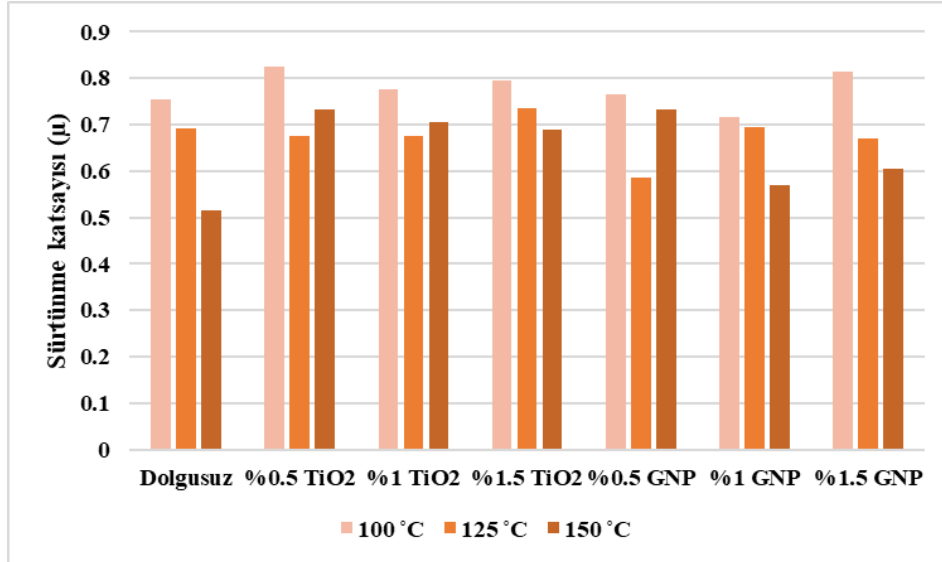
#### 4.3.2 Aşınma testleri

Farklı yükler ve farklı sıcaklıklarda yürütülen aşınma testleri boyunca sürtünme katsayısı, aşınmadan kaynaklı ağırlık kaybı ve arayüz sıcaklığı olmak üzere üç parametre takip edilmiştir. Dolgusuz ve farklı oranlarda nanodolgu içeren kompozitlerin aşınma testlerine ait 10 N yük altındaki ortalama sürtünme katsayısı değerleri Şekil 4.8'de sunulmuştur.



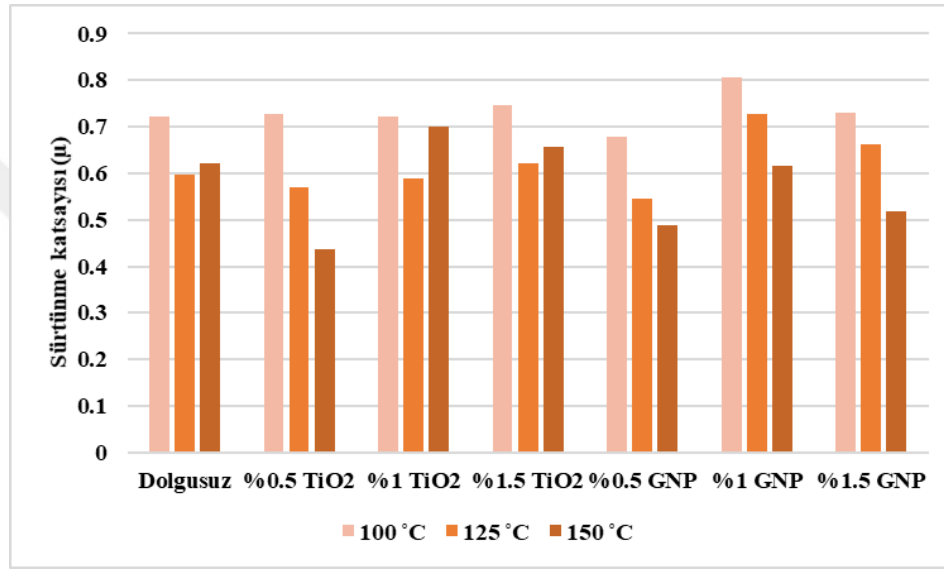
**Şekil 4.8:** 10 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait ortalama sürtünme katsayıları grafiği.

Şekil 4.8 incelendiğinde dolgusuz numunelerin ve %0.5 GNP dolgusu içeren numunelerin  $\mu$  değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte azaldığı ve % 0.5 TiO<sub>2</sub> dolgusu içeren numunelerin tam tersine  $\mu$  değerlerinin arttığı görülmektedir. Diğer numunelerde ise düzenli bir ilişki gözlenememiştir. 10 N yük altında en düşük  $\mu$  değeri 150 °C’de %0.5 GNP dolgusunda görülürken en yüksek  $\mu$  ise 100 °C’de %1 GNP dolgusunda görülmüştür. Şekil 4.9’da 20 N yük altındaki aşınma testlerine ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri grafiği sunulmuştur.



**Şekil 4.9:** 20 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait ortalama sürtünme katsayıları grafiği.

Şekil 4.9'dan tüm numunelerin  $\mu$  değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte azalma eğiliminde olduğu, dolgunsuz, % 0.5 TiO<sub>2</sub> dolgusu içeren, %1 GNP ve %1.5 GNP dolgusu içeren numunelerin  $\mu$  değerlerinin artan sıcaklıkla düzenli azaldığı görülmektedir. Diğer numunelerin  $\mu$  değerleri ise 100 °C'den 125 °C'ye doğru azalmış ve 125 °C'den 150 °C'ye doğru ise tekrar artmıştır. 20 N yük altında en düşük  $\mu$  değeri 150 °C'de dolgunsuz numunelerde görülürken en yüksek  $\mu$  ise 100 °C'de %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgusunda görülmüştür. Şekil 4.10'da 30 N yük altındaki aşınma testlerine ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri grafiği sunulmuştur.



**Şekil 4.10:** 30 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait ortalama sürtünme katsayıları grafiği.

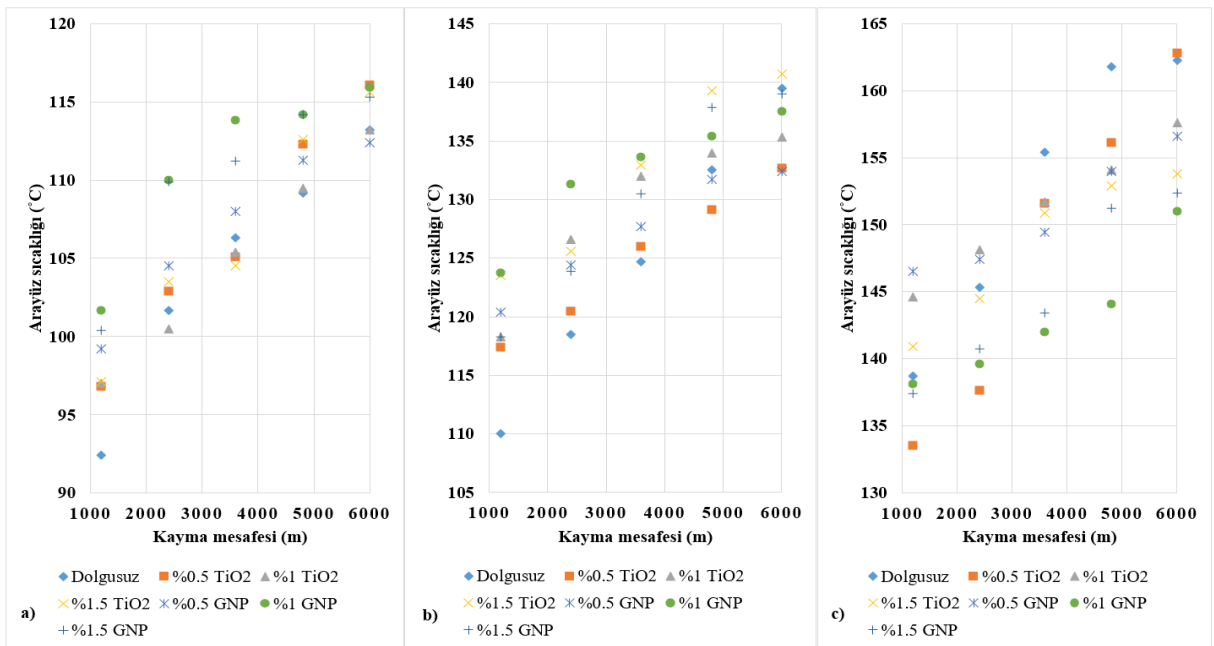
Şekil 4.10'da tüm numunelerin  $\mu$  değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte azalma eğiliminde olduğu, % 0.5 TiO<sub>2</sub> dolgusu içeren, %0.5 GNP, %1 GNP ve %1.5 GNP dolgusu içeren numunelerin  $\mu$  değerlerinin artan sıcaklıkla düzenli azaldığı görülmektedir. Diğer numunelerin  $\mu$  değerleri ise 100 °C'den 125 °C'ye doğru azalmış ve 125 °C'den 150 °C'ye doğru ise tekrar artmıştır. 30 N yük altında en düşük  $\mu$  değeri 150 °C'de, % 0.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu numunelerde görülürken en yüksek  $\mu$  ise 100 °C'de %1 GNP dolgusunda görülmüştür.

Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10 birlikte değerlendirildiğinde, aynı sıcaklık şartlarında dolgunsuz ve TiO<sub>2</sub> dolgulu numunelerde genel olarak yük arttıkça  $\mu$  değerlerinin azaldığı görülmektedir.

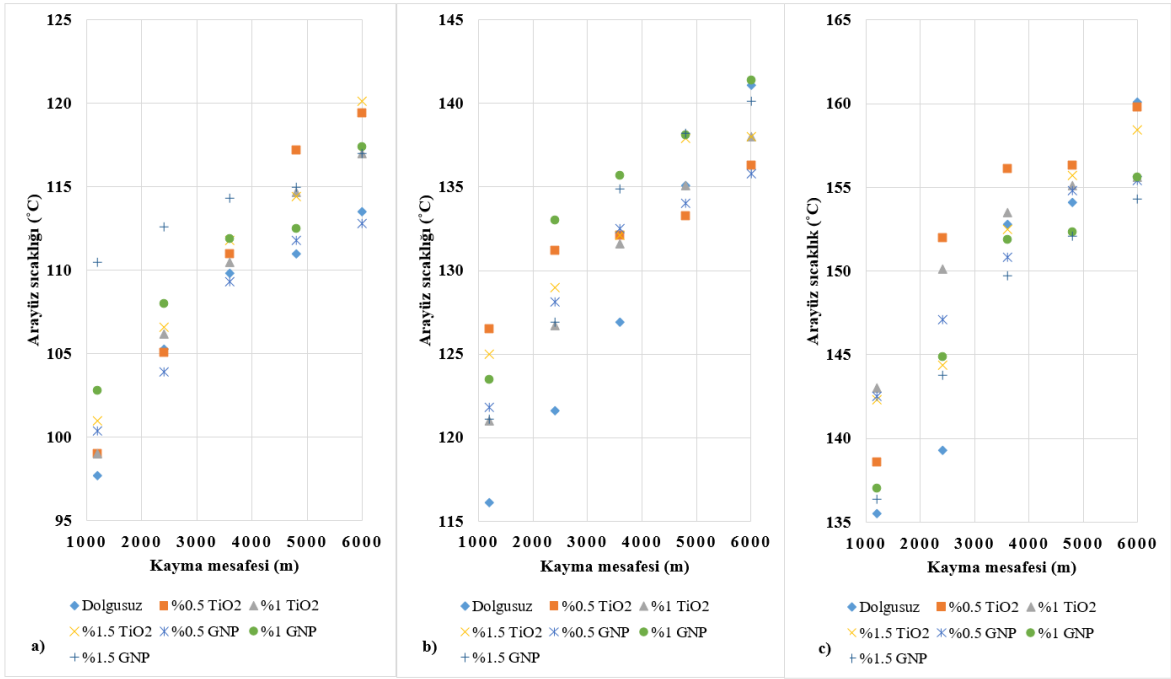
Polimerlerin sürtünme katsayılarının artan yükte azaldığını, aynı şekilde artan sıcaklığın çelik karşı yüzeye polimer transferini yoğunlaştırmasıyla sürtünme katsayısını azalttığını bildiren çalışmalar bulunmaktadır [99]. Çelik karşı yüzeye hareketli temas halinde olan polimerlerin sürtünme kuvvetlerinin artan yükte birlikte azalması pürüzlerin elastik

deformasyonu, artan yükte birlikte artması ise pürüzlerin plastik deformasyonu ile açıklanmaktadır [79]. GNP dolgulu numunelerde ise  $\mu$  değerinin uygulanan yükte düzenli bir ilişkisi saptanamamıştır. GNP'nin yağlayıcılığı, yüksek termal iletkenliği ve viskozite artırıcılığı yüksek olduğundan üretimde daha çok hata oluşturması gibi kendine has özelliklerinin bu durumda payı büyüktür. En düşük sürtünme kuvveti 30 N yük altında ve 150 °C'de %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu numunelerde görülürken en yüksek  $\mu$  ise 10 N yük altında ve 100 °C'de %1 GNP dolgusunda görülmüştür.

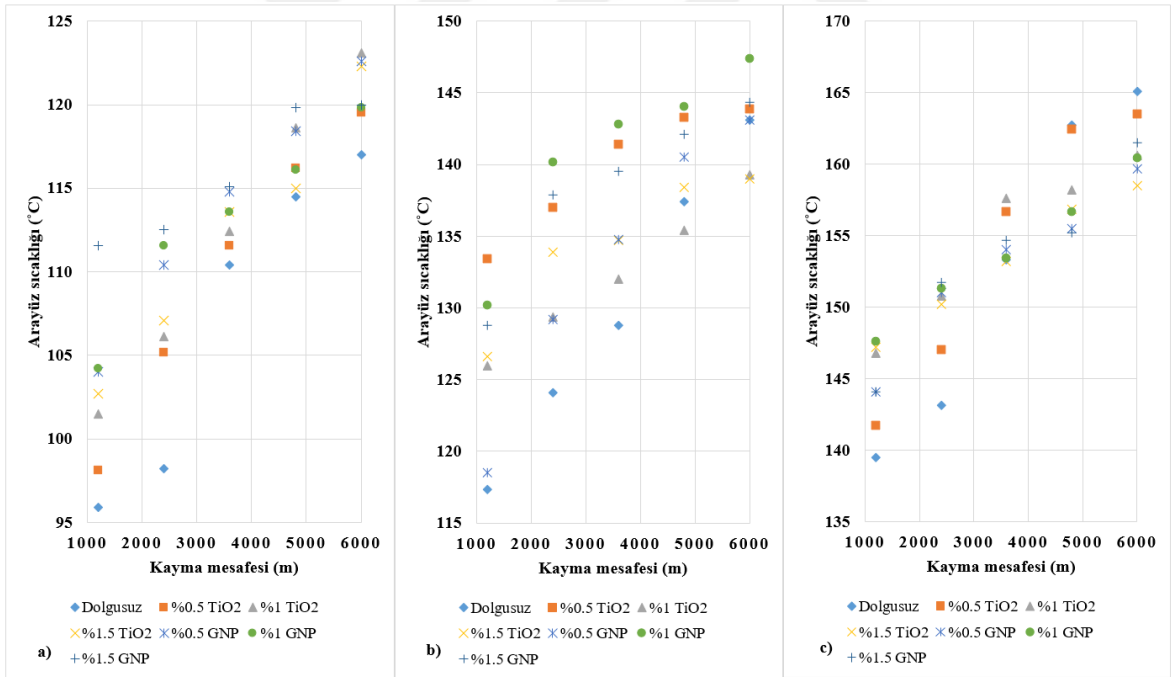
Aşınma testleri boyunca arayüz sıcaklıkları termal kamera ile takip edilmiştir. Gerek ısı modülünün rezistansla verdiği ısı, gerekse de sürtünmeden dolayı ortaya çıkan ısı enerjisi kompozit ve çelik disk arasındaki sürtünmeli yüzeyde sıcaklık artışlarına neden olmuştur. Isı modülündeki sensör sıcaklığının ayarlanan sıcaklığın 2 °C altına düşmesiyle birlikte sistem, rezistansı devreye alarak ayarlanan sıcaklığın yaklaşık 5 °C üzerine çıkana kadar ısı vermesini sağlamıştır. Bu nedenle ölçüm sonrası alınan değerlerin rezistans devredeyken veya dinlenme durumundayken alınması olasılıkları göz önünde bulundurularak yaklaşık  $\pm 7$  °C'lik bir tolerans olduğu göz ardı edilmemelidir. Ayrıca sensör, disk yan yüzeyini yakınından değer aldığından, diskin bu bölgesi ile sürtünmeli bölgesi arasındaki ısı iletim farkının ve süresinin de bu tolerans aralığını bir miktar düşürdüğü tahmin edilmektedir. Şekil 4.11'de, 4.12'de ve 4.13'te sırasıyla 10 N, 20 N ve 30 N yük altındaki aşınma testlerine ait kayma mesafesine bağlı arayüz sıcaklığı grafikleri verilmiştir.



**Şekil 4.11:** 10 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait kayma mesafesi-arayüz sıcaklıkları grafiği.



Şekil 4.12: 20 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait kayma mesafesi-aryüz sıcaklıkları grafiği.



Şekil 4.13: 30 N yük altında yapılan aşınma testlerine ait kayma mesafesi-aryüz sıcaklıkları grafiği.

Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13 birlikte incelendiğinde, tüm kompozit numunelerde artan sıcaklıkla ve artan kayma mesafesiyle birlikte arayüz sıcaklıklarının da arttığı görülmektedir. Yine her dolgu tipi ve dolgu oranında, tüm kompozit numunelerde 1200 m'den 6000 m'ye kadarki kayma mesafesi aralığında, en yüksek arayüz sıcaklığı farklarının en ekstrem koşul olan 30

N yük ve 150 °C sıcaklık şartları altında gerçekleştirilen testlerde olduğu görülmektedir. Tüm aşınma testlerinde, arayüz sıcaklıkları 150 °C'nin altındayken genellikle GNP dolgulu numunelerin arayüz sıcaklıkları daha fazla yükselirken, arayüz sıcaklığının 150 °C'nin üzerine çıkmasıyla birlikte GNP dolgulu numunelerdeki arayüz sıcaklığındaki artış, dolgusuz ve TiO<sub>2</sub> dolgulu numunelerdeki artışa göre genellikle daha az olmuştur. Bunda GNP'nin termal iletkenliğinin yüksek olmasıyla birlikte yağlayıcılık özelliğinin olması ve yorulma aşınması mekanizmasına yol açması ve bunların farklı sıcaklık aralıklarında baskınlıklarının değişmesi gibi etkenlerin neden olduğu düşünülmektedir. Nano dolgu oranının tıpkı sürtünme katsayısındaki gibi arayüz sıcaklığıyla da düzenli bir ilişkisi olduğuna dair bir işaret bulunamamıştır.

Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen aşınma testlerine ait aşınma numunelerinin ağırlık kayıpları Çizelge 4.7'de verilmiştir. Ağırlık kayıpları hesaplanırken, başlangıçta oda sıcaklığında bulunan numunelerin ağırlıklarının içerisinde ortamdan çektikleri nemin ağırlığı da bulunurken, testlerin sonunda yaklaşık 50 dk süre boyunca 100 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda kalan numunelerin bu nemi kaybettikleri düşünüldüğünde, gerçek ağırlık kayıplarının verilenlerden daha az olduğu göz ardı edilmemelidir.

**Çizelge 4.7:** Kompozit aşınma numunelerinin aşınma sonrası ağırlık kayıpları.

Yük (N)	Ağırlık kaybı (g)							
	Sıcaklık (°C)	Dolgusuz	%0.5 TiO <sub>2</sub>	%1 TiO <sub>2</sub>	%1.5 TiO <sub>2</sub>	%0.5 GNP	%1 GNP	%1.5 GNP
10	100	0.0049	0.0036	0.0048	0.0048	0.0052	0.0045	0.0049
	125	0.0052	0.0059	0.0068	0.0055	0.0062	0.0069	0.0075
	150	0.0057	0.0061	0.0095	0.0088	0.0070	0.0072	0.0084
20	100	0.0072	0.0071	0.0069	0.0080	0.0062	0.0063	0.0079
	125	0.0090	0.0073	0.0110	0.0084	0.0069	0.0080	0.0083
	150	0.0100	0.0145	0.0137	0.0094	0.0110	0.0088	0.0122
30	100	0.0110	0.0086	0.0118	0.0123	0.0146	0.0078	0.0105
	125	0.0121	0.0104	0.0143	0.0136	0.0099	0.0133	0.0118
	150	0.0133	0.0135	0.0150	0.0159	0.0108	0.0165	0.0131

Çizelge 4.7'ye bakıldığında;

- Tüm numuneler içerisinde en düşük ağırlık kaybı %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu numunelerde 10 N yük ve 100 °C sıcaklıkta görülürken en yüksek ağırlık kaybı %1 GNP dolgulu numunelerde 30 N yük ve 150 °C sıcaklıkta görülmüştür.
- Dolgusuz numunelerde düzenli şekilde yük ve sıcaklık artışıyla birlikte aşınmaya bağlı ağırlık kaybının da arttığı görülmektedir. Dolgusuz numunelerde en düşük

ağırlık kaybı 10 N yük ve 100 °C sıcaklıktayken, en yüksek ağırlık kaybı 30 N yük ve 150 °C sıcaklıktadır.

- Dolgulu numunelerde kimi zaman yük parametresi baskın gelmişken kimi zaman da sıcaklık parametresi belirleyici olmuştur. Dolgusuz numunelerde sıcaklık ve yük parametrelerinin her ikisiyle orantılı olarak değişen ağırlık kaybı, dolgulu numunelerde daha düzensiz ve bu parametrelerin etkinlik durumuna göre değişmiştir.
- %0.5 GNP dolgulu numunelerde 30 N yük altındakiler (sarı bölge) hariç, tüm numunelerde aynı yükler altında ağırlık kaybı artan sıcaklıkla birlikte artmıştır.
- 150 °C sıcaklıkta ve 20 N yük altındaki %0.5 TiO<sub>2</sub> ve %0.5 GNP dolgulu numuneler istisna olmak üzere, diğer tüm numunelerde, aynı sıcaklıklarda yük arttıkça ağırlık kaybı da artmıştır.

Aşınma, çok sayıda parametreye bağlı kompleks bir olgudur. Bu nedenle aşınma ile ilgili yapılan karşılaştırmalarda genellikle spesifik aşınma oranı (SAO) daha anlamlı sonuçlar verir ve daha fazla tercih edilir. Üretilen kompozitlerden hazırlanan farklı dolgu özelliklerine sahip numunelerin aşınma testleri sonrası hesaplanan SAO değerleri Çizelge 4.8'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.8:** Kompozit aşınma numunelerinin aşınma sonrası hesaplanan SAO değerleri.

Yük (N)	Sıcaklık (°C)	Spesifik aşınma oranı (10 <sup>-8</sup> . cm <sup>3</sup> /Nm)						
		Dolgusuz	%0.5 TiO <sub>2</sub>	%1 TiO <sub>2</sub>	%1.5 TiO <sub>2</sub>	%0.5 GNP	%1 GNP	%1.5 GNP
10	100	6.7717	5.2129	6.9144	6.9204	7.5824	6.2500	7.0281
	125	7.1863	8.5433	9.7955	7.9296	9.0405	9.5833	10.7570
	150	7.8773	8.8329	13.6850	12.6870	10.2070	1.0000	12.0480
20	100	4.9751	5.1405	4.9698	5.7670	4.5203	4.3750	5.6655
	125	6.2189	5.2853	7.9228	6.0554	5.0306	5.5556	5.9524
	150	6.9099	10.4980	9.8675	6.7762	8.0198	6.1111	8.7493
30	100	5.0673	4.1510	5.6660	5.9112	7.0963	3.6111	5.0201
	125	5.5740	5.0198	6.8664	6.5360	4.8119	6.1574	5.6416
	150	6.1268	6.5161	7.2025	7.6413	5.2493	7.6389	6.2632

Çizelge 4.8'e bakıldığında;

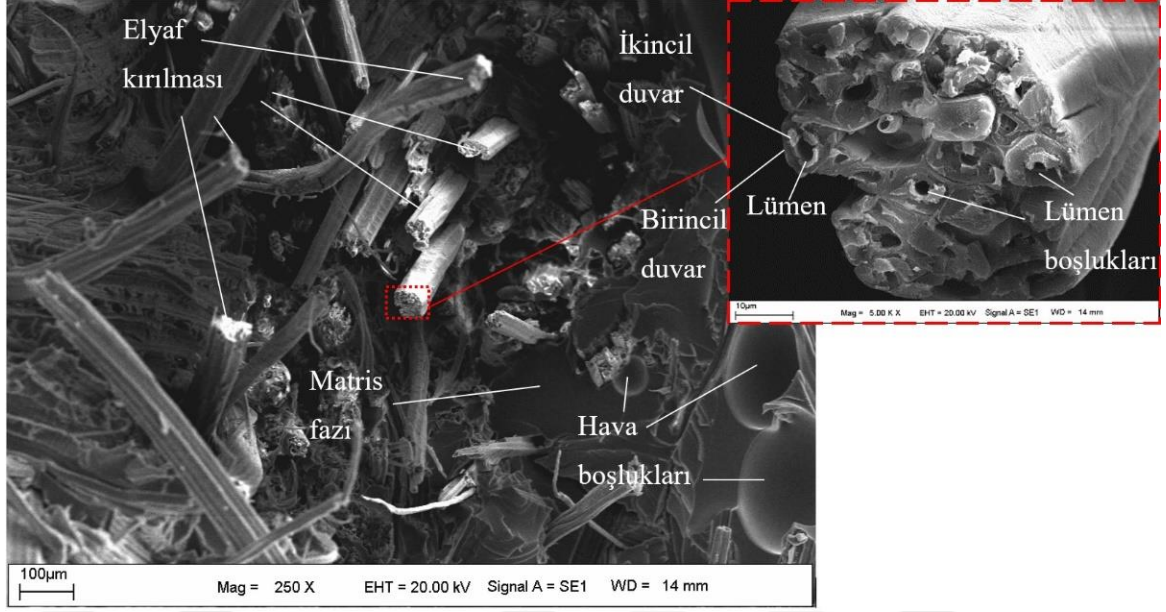
- Tüm numuneler içerisinde en düşük SAO % 1 GNP dolgululu numunelerde 30 N yük ve 100 °C sıcaklıkta görülürken en yüksek SAO %1 TiO<sub>2</sub> dolgululu numunelerde 10 N yük ve 150 °C sıcaklıkta görülmüştür.
- Sıcaklığın maksimum 150 °C, yükün maksimum 30 N olduğu en zor koşullarda %0.5 GNP dolgululu numuneler en yüksek aşınma direncine ve en düşük SAO'ya sahipken; aynı koşullarda %1 GNP dolgululu numuneler ise en yüksek SAO'ya sahiptir.
- %0.5 GNP dolgululu numunelerde 30 N yük altındakiler (sarı bölge) hariç tüm numunelerde, aynı yükler altında, SAO artan sıcaklıkla birlikte artmıştır.
- Aynı sıcaklıklarda numunelerin SAO'larının yüklerle birlikte kimi zaman arttığı, kimi zaman ise azaldığı görülmüştür. Bu durum test sıcaklığının SAO'ya yükten daha baskın şekilde etki ettiğini göstermektedir. Sadece %1.5 GNP dolgululu numunelerde sabit sıcaklıkta yük arttıkça SAO'nun istisnasız azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.8'deki SAO değerleriyle ile Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'daki sürtünme katsayısı değerleri birlikte değerlendirildiğinde literatürle de uyumlu olarak [73,76,79]  $\mu$  ile SAO arasında düzgün bir ilişki olmadığı görülmektedir.  $\mu$  artmasına rağmen SAO değerinin düştüğü durumlar (örneğin %1.5 GNP dolgululu kompozitlerden 100 °C'de 10 N ve 20 N yük altındaki numuneler) polimer kompozit ve metal karşı yüzey arasında transfer filmi oluştuğuna işaret etmektedir.

#### **4.4 Morfolojik Analiz**

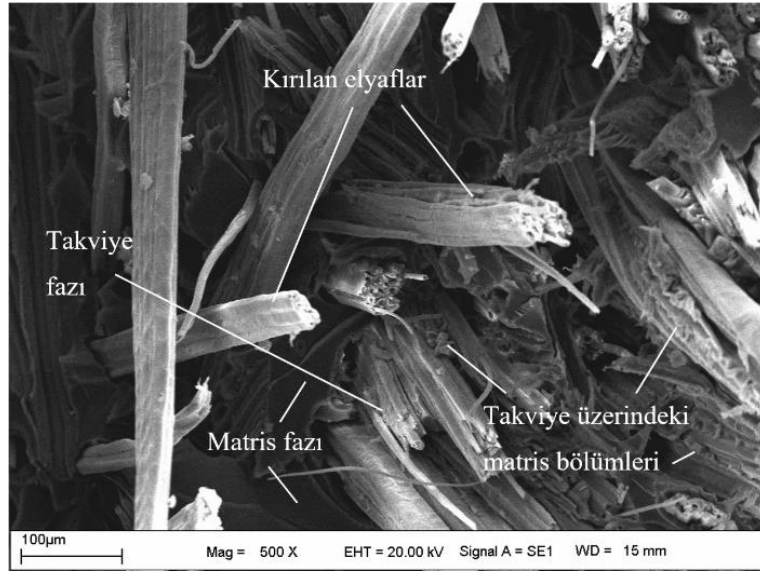
##### **4.4.1 Mekanik test numunelerinin SEM ve EDX analizi**

Çekme testleri sonrası kopma hasarı oluşan bölgelere SEM analizi yapılarak mikroyapı incelenmiştir. Elyaf yapısı, matris yapısı, elyaf-matris etkileşimi ve hasarları incelenmiştir. Şekil 4.14'de dolgusuz numunedeki elyaf ve matris yapılarının SEM görüntüsü sunulmuştur.



**Şekil 4.14:** Dolgusuz numuneye ait elyaf ve matris yapıları SEM görüntüsü.

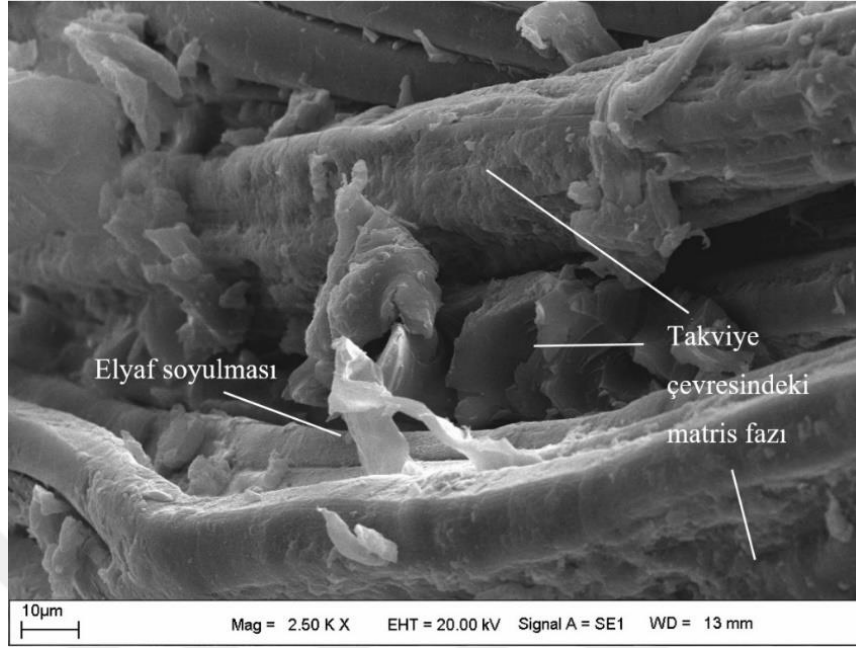
Şekil 4.14'te kırılarak ortaya çıkan elyaflar net olarak görünmektedir. Ayrıca tek bir elyafa yaklaşılarak elyaf yapısı ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Kopan elyafların etrafında matris fazı çok az bulunduğu görünmektedir. Bu durum da elyaf-matris arayüz yapışmasının zayıf olduğu bölgelerde hasar oluştuğuna işaret etmektedir. Şekil 4.15'te ise %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgulunun SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 4.15:** %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgululu numuneye ait SEM görüntüsü.

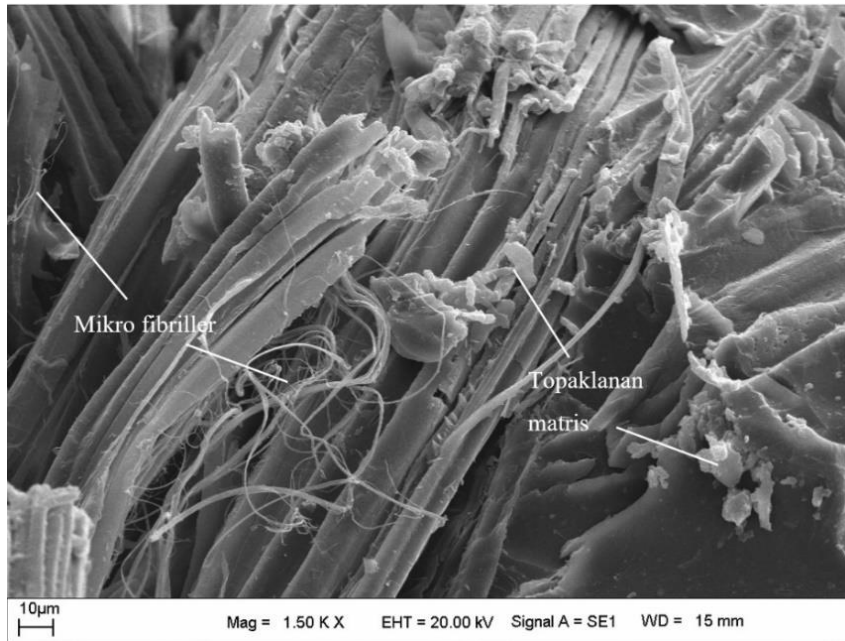
Şekil 4.15'e bakıldığında kırılan elyaf takviyelerin etrafında matris fazının bulunması dikkat çekmektedir. Bu durum %0.5 TiO<sub>2</sub> dolgusu yapılmasının takviye ile matris arasındaki arayüz yapışmasını artırdığını göstermektedir. Matris fazının takviye fazını iyi şekilde sarmaladığı

da göze çarpmaktadır. Şekil 4.16'da %1 TiO<sub>2</sub> dolgusu yapılan numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir.



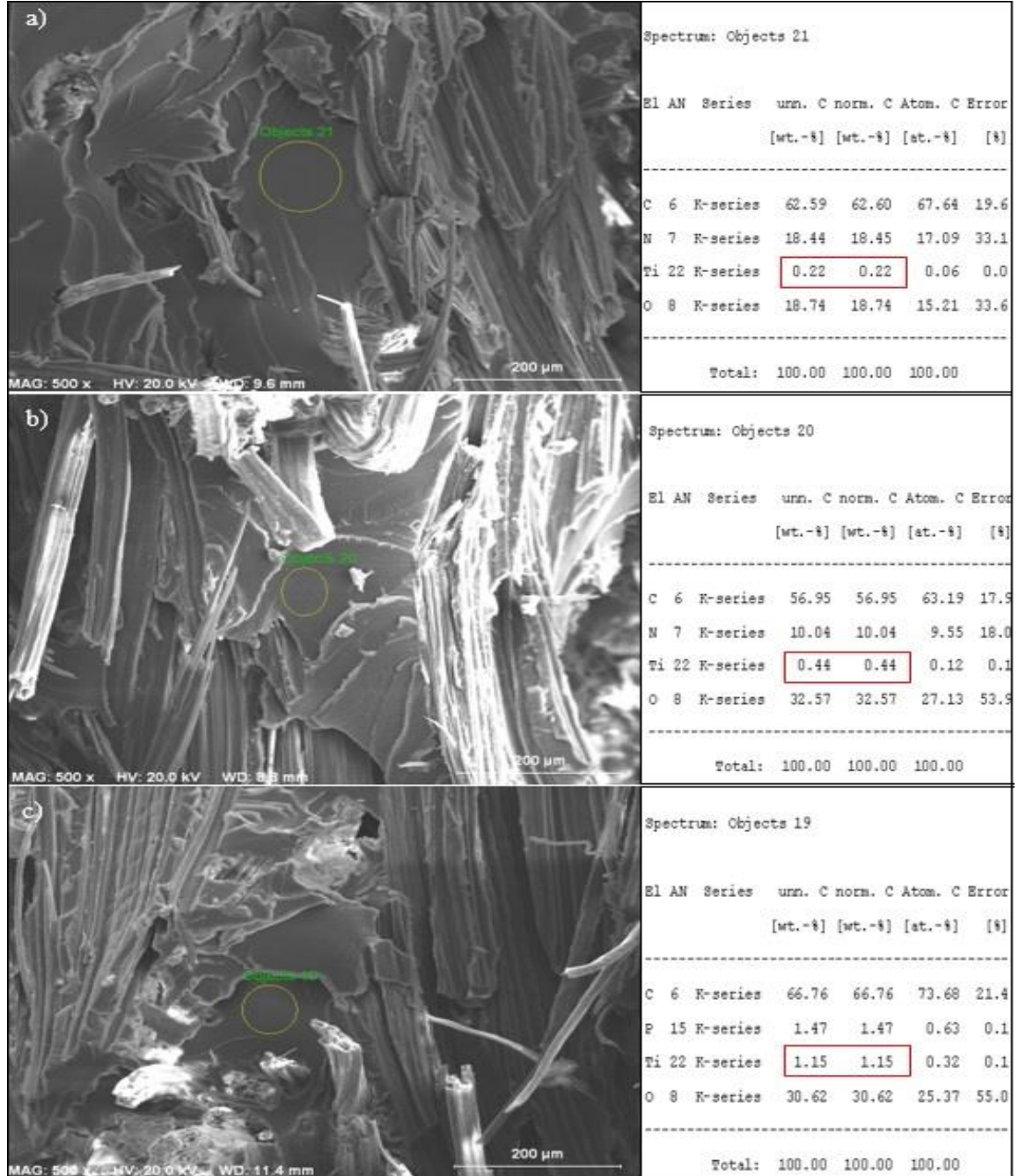
**Şekil 4.16:** %1 TiO<sub>2</sub> dolgulu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 4.14 ve 4.15 ile kıyaslandığında Şekil 4.16'da takviye çevresinde bulunan matris miktarında belirgin bir artış olduğu görülmektedir. %1 TiO<sub>2</sub> dolgusu yapılması yüksek bir takviye-matris arayüz adhezyonu sağlamıştır. TiO<sub>2</sub> dolgusunun ağırlıkça %1.5 oranında yapılması durumunda elde edilen numuneye ait SEM görüntüsü Şekil 4.17'de verilmiştir.



**Şekil 4.17:** %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu numuneye ait SEM görüntüsü.

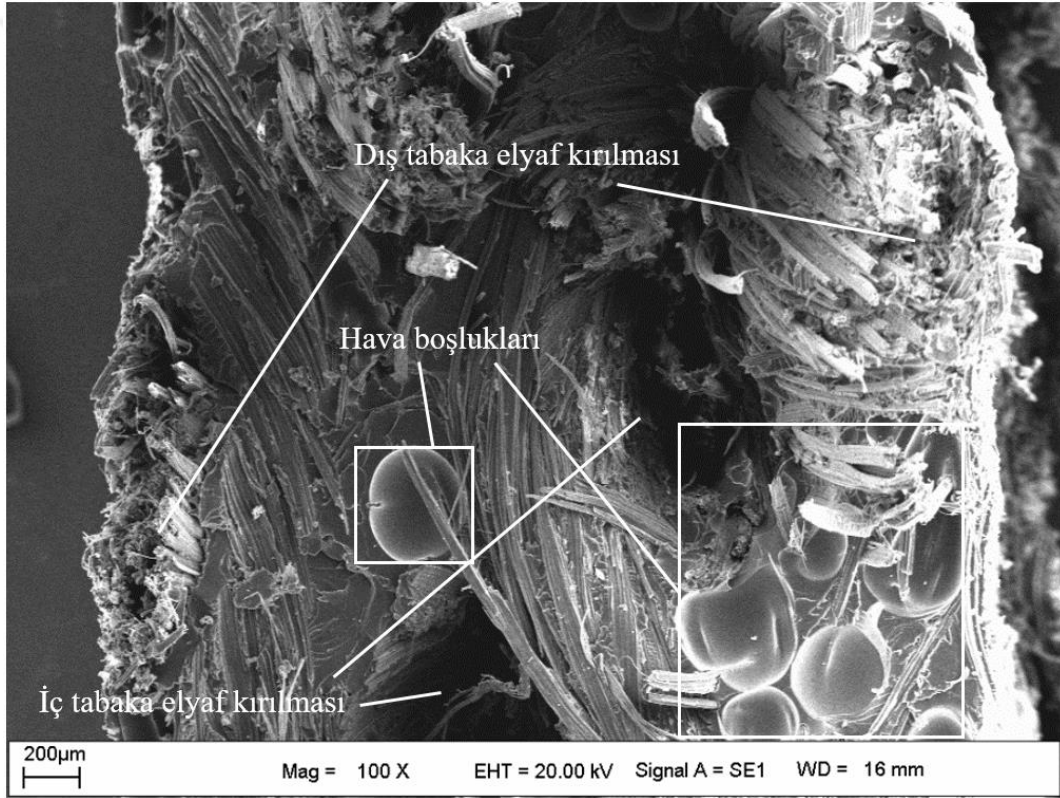
Şekil 4.17’de elyaf takviyenin fibriller çıkartarak kırıldığı görülmektedir. Ayrıca takviye çevresinde matris fazın azaldığı ve matriste topaklanmaların oluştuğu görülmektedir. Bu olay, %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgusu yapılması durumunda, viskozitenin artmasına bağlı olarak nano dolgu ve poliaspartik poliürenin topaklanmaya başlaması ve takviye-matris fazları arasındaki adhezyonun azalması ile mekanik özelliklerde zayıflama görülmesi olarak yorumlanabilir. Şekil 4.18’de TiO<sub>2</sub> dolgusu yapılan numunelerin matris bölgelerine yapılan EDX analizi görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.18: Matris bölgelerinin EDX analiz görüntüsü, a) %0.5 TiO<sub>2</sub>, b) %1 TiO<sub>2</sub>, %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgulu numuneler.

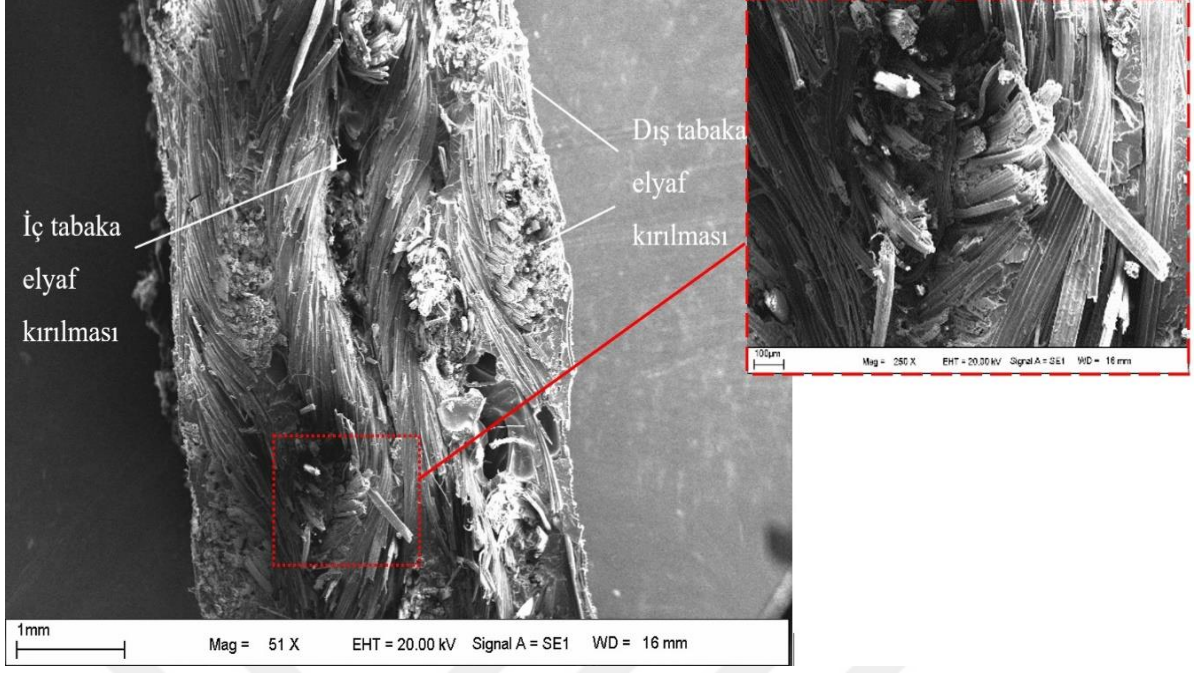
Şekil 4.18'e bakıldığında tüm EDX analiz noktalarının matris bölgesinden alındığı net olarak görünmektedir. Ayrıca Şekil 4.18a'da ağırlıkça % 0.22 olarak görünen Ti elementi Şekil 4.18b'de % 0.44 ve Şekil 4.18c'de ise % 1.15 olarak görünmektedir. Bu sonuçlar da yaklaşık olarak ağırlıkça % TiO<sub>2</sub> dolgu oranlarını karşılamaktadır. TiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin matris içinde iyi dağıldığı anlaşılmaktadır. Ancak burada, EDX analizi yapılan cihazın minimum yaklaşık 6 µm çapındaki bir bölgeden EDX alabildiği ve özellikle C ve O elementlerinin yoğun olduğu metal dışı malzemelerde net sonuçlar vermediği, dolayısıyla sadece elementlerin bulunma miktarlarının azlığı veya çokluğuna dönük yorum yapılabileceği unutulmamalıdır.

Şekil 4.19'da ise % 0.5 GNP dolgulu numunenin SEM görüntüsüne yer verilmiştir.



**Şekil 4.19:** %0.5 GNP dolgulu numuneye ait SEM görüntüsü.

Şekil 4.19'a bakıldığında hava boşluğu miktarının fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca çift taraflı infüzyon filesi ve soyma kumaşı kullanarak ıslanma sağlansa da dış tabakalarda elyaf çevreleri matrisle dolgunken iç tabakalarda ip halinde toplu olarak kopan elyaflara ait büyük elyaf boşluğu bölgeleri olduğu görülmektedir. Bu, iç tabakalarda takviye matris arasındaki adhezyonun zayıf olduğunu göstermektedir. Şekil 4.20'de %1.5 GNP dolgusu yapılan numuneye ait SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 4.20:** %1.5 GNP dolgulı numuneye ait SEM görüntüsü.

%1.5 GNP dolgulı numunenin SEM görüntüsüne bakıldığında (Şekil 4.20), tıpkı %0.5 GNP dolgulı numunenin SEM görüntüsündeki (Şekil 4.19) gibi dış tabakalarda elyaf matris tarafından iyi ıslanmışken iç tabakalarda zayıf adhezyon sonucu büyük kopmalar ve bunlardan doğan büyük boşluklar olduğu görülmektedir. Yakınlaştırılmış görüntüde ise kırılan takviyelerin çevresinde matris kalıntıları olmadığı görülmektedir.

Genel olarak morfolojik analize bakıldığında  $TiO_2$  dolgulı numunelerde ağırlıkça %1 dolgu oranına kadar matris ile takviye arayüz adhezyonunu artırıcı bir etkisi olduğu ve aglomerasyon olmadan iyi dağılımlı bir matris elde edildiği görülmüştür. %1.5 dolgu oranında ise topaklanmanın başladığı ve takviye-matris arayüz adhezyonunun zayıfladığı görülmüştür. GNP dolgusunda ise tüm dolgu oranlarında yaklaşık olarak benzer şekilde orta katmanlarda zayıf takviye-matris arayüz yapışması ve kompozitin genelinde belirgin hava boşlukları olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar da çekme testinden elde edilen verileri doğrular niteliktedir.

#### **4.4.2 Tribolojik test numunelerinin SEM ve EDX analizi**

Tribolojik testler sonrasında, beklentinin aksine, AISI 4140 ıslah çeliği karşı yüzeye transfer olan polimer kalıntıları çok nadir olarak görülmüştür. Görülen kalıntılar da disk yüzeyine zayıf şekilde tutunmuştur. Şekil 4.21’de disk yüzeyinin test sonrası SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları sunulmuştur.



Spectrum: Objects 1

Spectrum: Objects 2

El AN Series	unn. [wt.-%]	C norm. [wt.-%]	C Atom. [at.-%]	C Error [%]	El AN Series	unn. [wt.-%]	C norm. [wt.-%]	C Atom. [at.-%]	C Error [%]				
Ca 20 K-series	49.68	70.76	68.48	1.5	Fe 26 K-series	84.42	88.18	71.03	2.3				
Fe 26 K-series	9.93	14.14	9.82	0.4	Cr 24 K-series	1.48	1.55	1.34	0.1				
Si 14 K-series	4.80	6.83	9.43	0.3	P 15 K-series	1.22	1.27	1.84	0.1				
Mg 12 K-series	2.77	3.94	6.29	0.2	C 6 K-series	1.11	1.16	4.36	0.4				
Al 13 K-series	2.11	3.00	4.32	0.2	Si 14 K-series	0.47	0.50	0.79	0.1				
P 15 K-series	0.93	1.32	1.65	0.1	O 8 K-series	7.03	7.34	20.64	1.6				
Total:				70.21	100.00	100.00	Total:				95.73	100.00	100.00

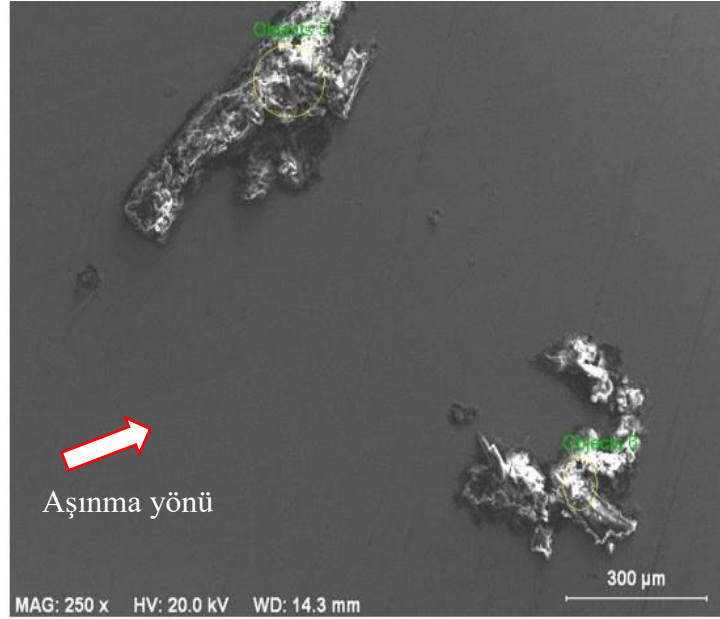
Spectrum: Objects 3

Spectrum: Objects 4

El AN Series	unn. [wt.-%]	C norm. [wt.-%]	C Atom. [at.-%]	C Error [%]	El AN Series	unn. [wt.-%]	C norm. [wt.-%]	C Atom. [at.-%]	C Error [%]				
Fe 26 K-series	79.66	82.05	54.41	2.2	Fe 26 K-series	85.71	88.12	68.62	2.4				
C 6 K-series	9.35	9.63	29.69	1.7	C 6 K-series	3.49	3.58	12.97	0.8				
Cr 24 K-series	1.47	1.51	1.08	0.1	Cr 24 K-series	1.26	1.29	1.08	0.1				
Na 11 K-series	0.84	0.87	1.40	0.1	P 15 K-series	0.83	0.86	1.20	0.1				
Si 14 K-series	0.31	0.32	0.42	0.1	Si 14 K-series	0.47	0.48	0.75	0.1				
O 8 K-series	5.45	5.62	13.00	1.3	O 8 K-series	5.50	5.66	15.37	1.3				
Total:				97.08	100.00	100.00	Total:				97.26	100.00	100.00

**Şekil 4.21:** %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgulı numunenin 30 N yük,150 °C sıcaklık ve 2 m/s kayma hızında 50 dk boyunca süren aşınma testi sonrası disk yüzeyinin SEM ve EDX analizi görüntüsü.

Şekil 4.21'deki SEM görüntüsünde disk yüzeyinde çizgiler halinde bulunan oyuklarda polimer kalıntısı olacağı düşünülerek EDX analizi yapılsa da 1. EDX noktasında ısı modülüne ait refrakterin bir parçasının disk yüzeyinde kaldığı anlaşılmıştır. Diğer EDX sonuçlarında ise Ti elementine rastlanmamıştır. Bu durum genel olarak TiO<sub>2</sub> dolgulu matris kalıntısının test bitiminde disk yüzeyine geçmemiş olduğunu göstermektedir. Disk yüzeyine zayıf şekilde tutunan nadir polimer kalıntılı bölgeye ait SEM ve EDX analizi görüntüsü Şekil 4.22'de sunulmuştur.



Spectrum: Objects 5

Spectrum: Objects 6

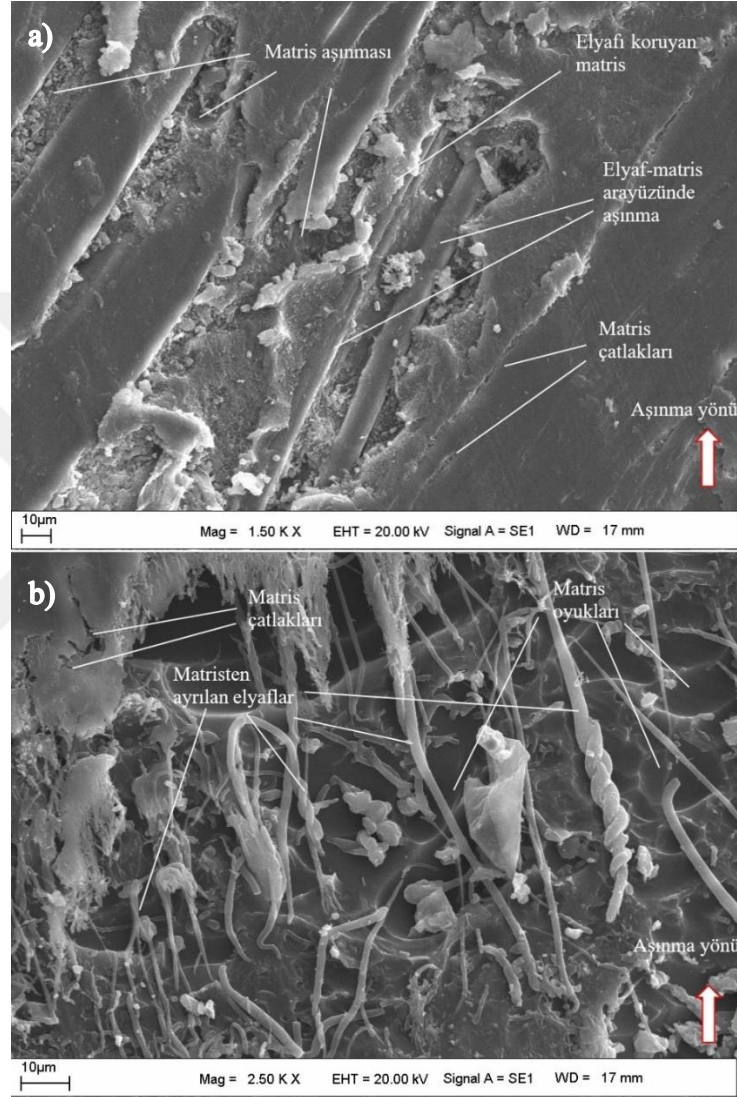
El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error	El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
			[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]	[%]				[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]	[%]
C	6	K-series	60.48	60.48	68.31	19.3	C	6	K-series	56.96	56.96	65.50	18.3
Fe	26	K-series	1.69	1.69	0.41	0.1	Fe	26	K-series	3.30	3.30	0.82	0.2
Ti	22	K-series	1.01	1.01	0.29	0.1	Ti	22	K-series	0.67	0.67	0.19	0.1
P	15	K-series	0.56	0.56	0.24	0.1	P	15	K-series	0.55	0.55	0.25	0.1
O	8	K-series	36.26	36.26	30.75	59.0	O	8	K-series	38.51	38.51	33.24	61.7
Total:			100.00	100.00	100.00		Total:			100.00	100.00	100.00	

**Şekil 4.22:** Disk yüzeyinde nadir olan polimer kalıntılı bölge SEM ve EDX analizi görüntüsü.

Şekil 4.22'de 5 ve 6 numaralı EDX noktalarında Ti elementinin olduğu görülmektedir. Ancak bu polimer kalıntıları disk yüzeyine iyi tutunmamış büyük parçalar halinde ve çok az

sayıdadır. Kompozitlerden kopan parçalar dönmenin etkisiyle oluşan merkez kaç kuvveti ile zamanla disk üzerinden atılmıştır. Bu durumun ortaya çıkmasında elastomer matris kullanılmasının ve yüksek sıcaklıklarda test yapılmasının etkisi büyüktür.

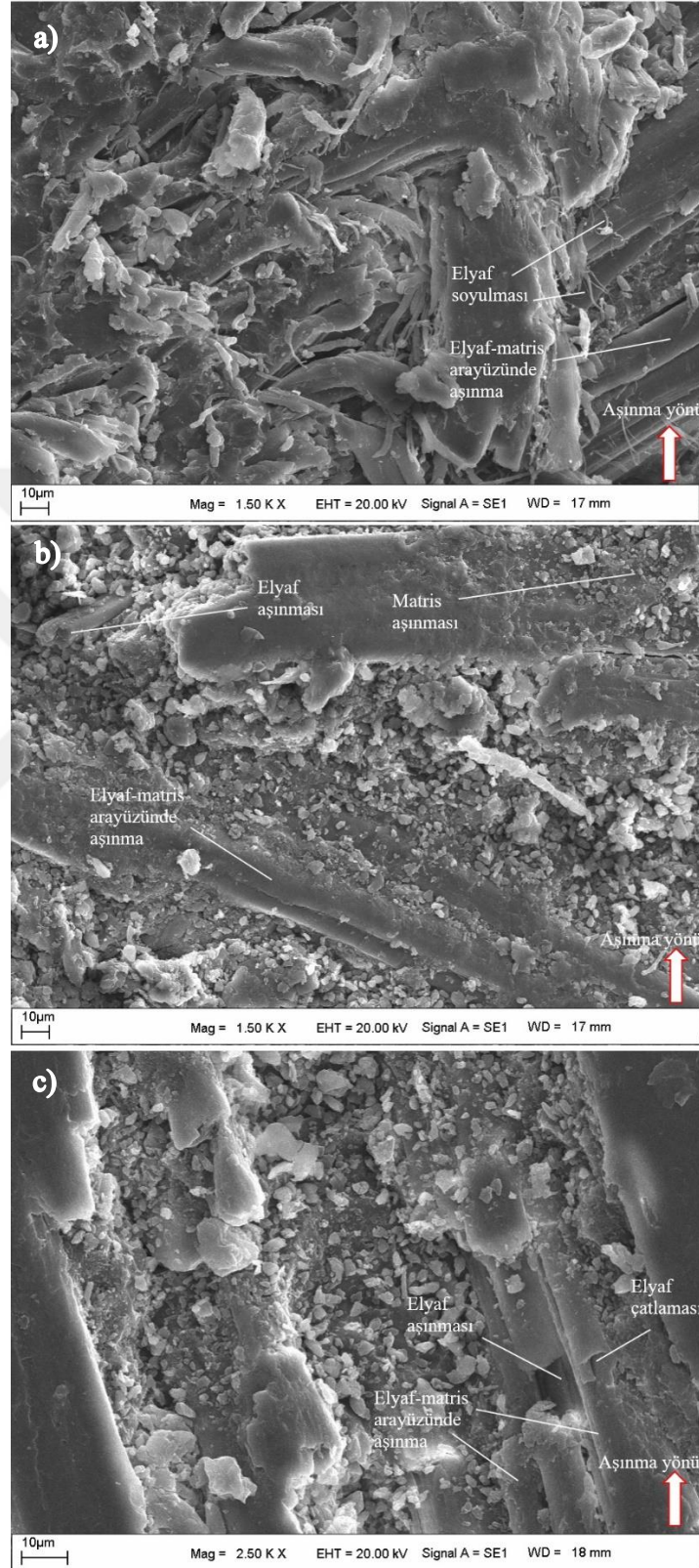
Şekil 4.23'te dolgusuz kompozit numunelerin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri sunulmuştur.



**Şekil 4.23:** Dolgusuz kompozit numunelerin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri, a) 10 N-150 °C, b) 30 N-150 °C.

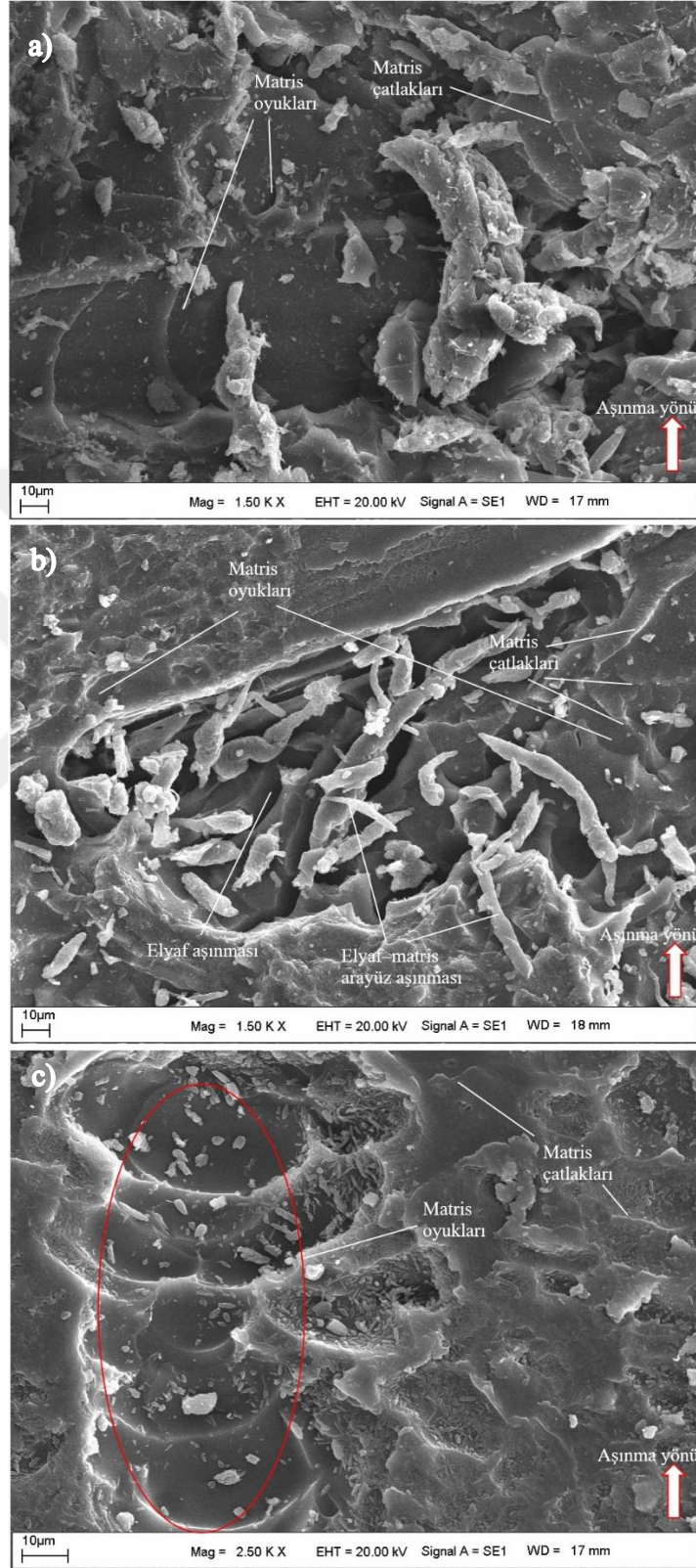
Şekil 4.23'e bakıldığında yaygın hasar mekanizmalarının gerçekleştiği görülmektedir. İlk olarak elyafı koruyan matris bölgelerinin aşınmasıyla elyaf-matris arayüz yapışmasının zayıf olduğu bölgelerde elyaf-matris arayüz aşınması, elyaf-matris arayüz yapışmasının güçlü olduğu bölgelerde ise elyaf aşınması ile malzeme kayıpları olduğu görülmektedir. Genel olarak adhezyona bağlı kopmalar olduğu görülse de matris bölgelerinde yer yer meydana

gelen keskin kenarlı oyuklar ve çatlaklar yorulma hasarını da işaret etmektedir. Şekil 4.24'te TiO<sub>2</sub> dolgulu kompozit numunelerin aşınan yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 4.24:** TiO<sub>2</sub> dolgulu kompozit numunelerinin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri, a) 30 N-150 °C- %0.5 TiO<sub>2</sub>, b) 30 N-150 °C- %1TiO<sub>2</sub>, c) 30 N-150 °C- %1.5 TiO<sub>2</sub>.

Şekil 4.25'te GNP dolgulu kompozit numunelerin aşınan yüzeylerine ait SEM görüntülerine yer verilmiştir.



Şekil 4.25: GNP dolgulu kompozit numunelerin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri, a) 30 N-150 °C- %0.5 GNP, b) 30 N-150 °C- %1GNP, c) 30 N-150 °C- %1.5 GNP.

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te de yaygın hasar mekanizmaları gözlenmiştir. Şekil 4.23'te olduğu gibi elyafı koruyan matris bölgelerinin aşınmasıyla elyaf-matris arayüz yapışmasının zayıf olduğu bölgelerde elyaf-matris arayüz aşınması, elyaf-matris arayüz yapışmasının güçlü olduğu bölgelerde ise elyaf aşınması ile malzeme kayıpları olduğu görülmektedir. Şekil 4.24'te  $TiO_2$  dolgulu kompozit numunelerin aşınmasında baskın mekanizma adhezif aşınmayken; Şekil 4.23'teki dolgusuz kompozit numunelerin ve Şekil 4.25'teki GNP dolgulu kompozit numunelerin aşınmalarında adhezif aşınmanın yanında yorulma aşınması mekanizmasının da etkin olduğuna dair işaretler gözlenmiştir.  $TiO_2$  nano dolgusunun kohezif dayanımı artırması dolayısıyla kompozitlerde abrazif ve yorulma aşınmalarına direnci artırması literatürle de uyumlu bir sonuçtur [79].



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada doğal elyaf takviyeli nanodolgulu poliaspartik PUr matrisli kompozitler VDRTK metodu ile üretilmiş ve bu yöntemle üretilebilirliği test edilmiştir. Üretilen kompozitler üzerinde mekanik testler ve tribolojik testler yapılarak nano dolgu oranının mekanik ve tribolojik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Öncelikle dış ortam koşullarına mükemmel dayanımı olduğu bilinen poliürenin bir kaplama olarak değil de matris fazı şeklinde yapısal bir bileşen olarak kullanımı hedeflendiğinden gerek kullanılabilirliğinin test edilmesi, gerekse de kullanıldığı taktirde ne tür özellikler göstereceğinin anlaşılmasına dönük kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür. Takviye malzemesiyle matrisin uyumuna ve bu yapının nano dolgularla güçlendirilebilirliğine dair araştırma yapılmıştır.

Üretilebilirlikle ilgili sonuçlar ve öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Poliaspartik PUr'nin viskozitesinin hızlı yükseldiği gözlemlendiğinden VDRTK yöntemiyle üretim yaparken reçinenin amin bileşeni ile izosiyanat bileşeni karıştırma süresinin ve devir hızının optimal olarak düşük tutulmasının çok önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- VDRTK yöntemi kullanılarak nano dolgulu PUr matrisli kompozit üretimi yapılırken TiO<sub>2</sub> dolgu malzemesinin iyi dağılım gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle büyük parça üretiminde de uyumlu olacağı düşünülmektedir. Ancak GNP dolgu malzemesinin gerek ayrıklarından birinin 1.5 µm olması, gerekse de viskozite artırıcı etkisinin yüksek olmasından dolayı topaklanmalara neden olması dolayısıyla kullanılan dolgu oranlarında büyük parça üretimine uyumlu olmadığı görülmüştür.
- GNP dolgunun TiO<sub>2</sub> dolgu ile aynı şartlarda hazırlanarak VDRTK yöntemiyle kompozit üretiminde kullanılmasında elyafların yeterince ıslanmadığı görülerek çift taraflı infüzyon filesi ve soyma kumaşı kullanılmıştır. Bu şekilde daha iyi ıslanma sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda VDRTK yöntemine ek olarak böyle bir uygulama yapılması önerilmektedir. Ayrıca, GNP dolgusu yapılarak büyük kütlelerde üretim yapılabilmesi için viskoziteyi düşürmeye ve topaklanmayı önlemeye yönelik bazı kimyasalların kullanılması veya daha düşük ağırlıkça oranlarda GNP kullanılması önerilmektedir.

- Jüt elyafıyla PUr matrisin uyumlu çalıştığı görülmüştür. Jüt kumaşa yıkama harici bir yüzey iyileştirme uygulaması yapılmamasına rağmen takviye ile matris arayüz yapışmasının iyi düzeyde olduğu anlaşılmıştır.
- Ağırlıkça matris oranının dolgusuz kompozitlerde en fazla olduğu, onları sırasıyla TiO<sub>2</sub> dolgulu kompozitler ve son olarak GNP dolgulu kompozitlerin izlediği görülmüştür. GNP dolgulu kompozitlerde hava boşluğu oranının daha fazla olduğu görülmüştür.

Mekanik ve tribolojik özelliklerle ilgili sonuç ve öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Tüm mekanik testlerde PUr matrisinin mükemmel elastik özellikler kazandığı görülmüştür. Özellikle eğilme testlerinde dış elyafların hasara uğramasının % 5 ile % 10 gerinim arasında olması bunu doğrulayan en büyük kanıt olmuştur.
- TiO<sub>2</sub> ve GNP dolgusu yapmanın çekme dayanımını artırdığı görülmüştür. En yüksek çekme dayanımı %1 TiO<sub>2</sub> dolgusuyla elde edilmiştir. GNP dolgusunda dolgu oranı arttıkça çekme dayanımının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.
- TiO<sub>2</sub> ve GNP dolgusu yapmanın eğilme dayanımını artırdığı görülmüştür. En yüksek eğilme dayanımı %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgusuyla elde edilmiştir. GNP dolgusunda dolgu oranı arttıkça eğilme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.
- PUr matrisin yüksek darbe dayanımı kazandığı görülmüştür. Kenara dik çentiksiz charpy darbe testlerinde en yüksek darbe dayanımı %1 GNP dolgusunda, yüzeye dik çentiksiz charpy darbe testlerinde ise en yüksek darbe dayanımı %1.5 TiO<sub>2</sub> dolgusunda elde edilmiştir. Sonuçlar PUr'nin genel elastik özelliklerinin sağladığı avantajlarla paralel bulunmuştur. Elde edilen kompozitlerin iyi sayılabilecek darbe sönümlenme özelliklerinin olduğu anlaşılmıştır.
- PUr matrisinin yüksek sıcaklıklarda iyi aşınma direnci sağladığı görülmüştür. Karşı yüzeye aşınma artışının kaydadeğer şekilde geçmediği görülmüştür. Ancak sürtünme katsayısıyla spesifik aşınma oranının ters orantılı olduğu durumların gözlenmesi de transfer filminin varlığı hakkında ipucu sunmuştur.
- GNP dolgusu yapılmasının arayüz sıcaklığının 150 °C'den yukarı çıkmasıyla birlikte artan sıcaklıkla arayüz sıcaklığının daha az yükselmesine sebebiyet verdiği anlaşılmıştır. Ayrıca dolgusuz ve GNP dolgulu kompozitlerde baskın aşınma mekanizması olarak adhezyonun yanında yorulma aşınmasının da ortaya çıktığı anlaşılmıştır.

- Ağırlıkça nanodolgu oranı ile sürtünme katsayısının da arayüz sıcaklığının da düzenli bir ilişkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Benzer durum sürtünme katsayısıyla spesifik aşınma oranı arasında da görülmüştür.
- 150 °C sıcaklığa kadar çalışılmasına rağmen aşınmadan dolayı ağırlık kayıplarının çok küçük olduğu görülmüştür. Bir elastomer matris malzemesi kullanmanın da etkisiyle, spesifik aşınma oranını en çok etkileyen parametrenin sıcaklık olduğu görülmüştür. Yük, dolgu çeşidi ve dolgu oranının spesifik aşınma oranına daha az etkisi olduğu anlaşılmıştır. Aşınma çalışmalarının korozyif ve abrazyif ortamlarda oda sıcaklığında çalışılması da bu çalışmayı tamamlayıcı nitelik taşıyacağı düşünülerek önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Avcı, U.** (2019). Yeni bir yaklaşımla partikül takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş hibrit özellikli tabakalı kompozit üretimi ve sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinin incelenmesi (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- [2] **Campbell, F. C.** (2010). *Structural composite materials*. ASM international.
- [3] **Groover, M. P.** (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- [4] **Kaw, A. K.** (2005). *Mechanics of composite materials*. CRC press.
- [5] **Kutz, M.** (2006). *Mechanical engineers' handbook, volume 1: Materials and engineering mechanics*. John Wiley & Sons.
- [6] **Wang, R. M. Zheng, S. R. & Zheng, Y. G.** (2011). *Polymer matrix composites and technology*. Elsevier.
- [7] **Kaundal, R. Patnaik, A. & Satapathy, A.** (2012). Comparison of the mechanical and thermo-mechanical properties of unfilled and SiC filled short glass polyester composites. *Silicon*, 4(3), 175-188.
- [8] **Callister Jr, W. D. & Rethwisch, D. G.** (2013). *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. John Wiley & Sons.
- [9] **Agarwal, G. Patnaik, A. & Sharma, R. K.** (2014). Thermo-mechanical properties and abrasive wear behavior of silicon carbide filled woven glass fiber composites. *Silicon*, 6(3), 155-168.
- [10] **Boopalan, M. Niranjanaa, M. & Umapathy, M. J.** (2013). Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 51, 54-57.
- [11] **Braga, R. A. & Magalhaes Jr, P. A. A.** (2015). Analysis of the mechanical and thermal properties of jute and glass fiber as reinforcement epoxy hybrid composites. *Materials science and engineering: C*, 56, 269-273.
- [12] **Bulut, Y. & Erdoğan, Ü. H.** (2011). Selüloz Esaslı Doğal Liflerin Kompozit Üretiminde Takviye Materyali Olarak Kullanımı. *Journal of Textiles & Engineers/Tekstil ve Mühendis*, 18(83).
- [13] **Zaman, H. U. Khan, A. Khan, R. A. Huq, T. Khan, M. A. Shahruzzaman, M. ... & Poddar, P.** (2010). Preparation and characterization of jute fabrics reinforced urethane based thermoset composites: Effect of UV radiation. *Fibers and Polymers*, 11(2), 258-265.
- [14] **Mishra, V. & Biswas, S.** (2013). Physical and mechanical properties of bi-directional jute fiber epoxy composites. *Procedia engineering*, 51, 561-566.
- [15] **Naik, N. K. Sekher, Y. C. & Meduri, S.** (2000). Damage in woven-fabric composites subjected to low-velocity impact. *Composites Science and Technology*, 60(5), 731-744.

- [16] **Todor, M. P. Bulei, C. & Kiss, I.** (2018). Composite materials manufacturing using textile inserts with natural origins fibres. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 393, pp. 1-6).
- [17] **Aliabadi, M. H.** (2015). *Woven composites*. London: Imperial College Press.
- [18] **Jawaid, M. H. P. S. & Khalil, H. A.** (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate polymers*, 86(1), 1-18.
- [19] **Chaudhary, V. Ahmad, F.** (2020). A review on plant fiber reinforced thermoset polymers for structural and frictional composites. *Polymer Testing*, 106792.
- [20] **Mohammed, L. Ansari, M. N. Pua, G. Jawaid, M. & Islam, M. S.** (2015). A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*, 2015.
- [21] **Li, M. Pu, Y. Thomas, V. M. Yoo, C. G. Ozcan, S. Deng, Y. ... & Ragauskas, A. J.** (2020). Recent advancements of plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications. *Composites Part B: Engineering*, 108254.
- [22] **Saheb, D. N. & Jog, J. P.** (1999). Natural fiber polymer composites: a review. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 18(4), 351-363.
- [23] **Jawaid, M. Khalil, H. A. Hassan, A. Dungani, R. & Hadiyane, A.** (2013). Effect of jute fibre loading on tensile and dynamic mechanical properties of oil palm epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 619-624.
- [24] **Pinto, M. A. Chalivendra, V. B. Kim, Y. K. & Lewis, A. F.** (2013). Effect of surface treatment and Z-axis reinforcement on the interlaminar fracture of jute/epoxy laminated composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 114, 104-114.
- [25] **Joshi, S. V. Drzal, L. T. Mohanty, A. K. & Arora, S.** (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 35(3), 371-376.
- [26] **Ashik, K. P. Sharma, R. S. & Raghavendra, N.** (2017). Evaluation of tensile, modal and fracture properties of jute/epoxy natural composites with addition of silicon Di oxide as filler material. *Materials Today: Proceedings*, 4(9), 9586-9591
- [27] **Gu, Y. Tan, X. Yang, Z. & Zhang, Z.** (2014). Hot compaction and mechanical properties of ramie fabric/epoxy composite fabricated using vacuum assisted resin infusion molding. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 852-861.
- [28] **Malkapuram, R. Kumar, V. & Negi, Y. S.** (2009). Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, 28(10), 1169-1189.
- [29] **Kabir, M. M. Wang, H. Lau, K. T. & Cardona, F.** (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883-2892.
- [30] **Vigneshwaran, S. Sundarakannan, R. John, K. M. Johnson, R. D. J. Prasath, K. A. Ajith, S. ... & Uthayakumar, M.** (2020). Recent advancement in the natural fiber polymer composites: a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 124109.

- [31] **Joseph, P. V. Joseph, K. Thomas, S. Pillai, C. K. S., Prasad, V. S. Groeninckx, G. & Sarkissova, M.** (2003). The thermal and crystallisation studies of short sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(3), 253-266.
- [32] **Sgriccia, N. Hawley, M. C. & Misra, M.** (2008). Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(10), 1632-1637.
- [33] **Pandita, S. D. Yuan, X. Manan, M. A. Lau, C. H. Subramanian, A. S. & Wei, J.** (2014). Evaluation of jute/glass hybrid composite sandwich: Water resistance, impact properties and life cycle assessment. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(1), 14-25.
- [34] **Prasob, P. A. & Sasikumar, M.** (2018). Static and dynamic behavior of jute/epoxy composites with ZnO and TiO<sub>2</sub> fillers at different temperature conditions. *Polymer Testing*, 69, 52-62.
- [35] **Patnaik, T. K. & Nayak, S. S.** (2018). Development of silicon carbide reinforced jute epoxy composites: Physical, mechanical and thermo-mechanical characterizations. *Silicon*, 10(1), 137-145.
- [36] **Raghavendra, G.** (2015). *Mechanical and Tribological Behavior of Nanofiller Reinforced Polymer Nanocomposite* (Doctoral dissertation). Retrieved from <http://ethesis.nitrkl.ac.in/6688/>
- [37] **Gopinath, A. Kumar, M. S. & Elayaperumal, A.** (2014). Experimental investigations on mechanical properties of jute fiber reinforced composites with polyester and epoxy resin matrices. *Procedia Engineering*, 97, 2052-2063.
- [38] **Bakis, C. E. Bank, L. C. Brown, V. Cosenza, E. Davalos, J. F. Lesko, J. J. ... & Triantafillou, T. C.** (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review. *Journal of composites for construction*, 6(2), 73-87.
- [39] **Bhatt, P. & Goe, A.** (2017). Carbon fibres: production, properties and potential use. *Material Science Research India*, 14(1), 52-57.
- [40] **Joshi, M. & Jauhari, S.** (2012). Glass reinforcement of various epoxy resins-polyurea systems. *Journal of materials engineering and performance*, 21(7), 1346-1351.
- [41] **Hill, R. Walker, E. E.** (1948). Trend of crystalline melting points in homologous series of aliphatic polymers. *J. Polym. Sci*, 3(5), 609-630.
- [42] **Primeaux, D. J.** (2004). Polyurea elastomer technology: history, chemistry & basic formulating techniques. *Primeaux Associates LLC*, 1-20.
- [43] **Chundawat, T. S. Vaya, D. Sini, N. K. & Varma, I. K.** (2018). Blast mitigation using FRP retrofitting and coating techniques. *Polymer Composites*, 39(5), 1389-1402.
- [44] **Samiee, A. Amirkhizi, A. V. & Nemat-Nasser, S.** (2013). Numerical study of the effect of polyurea on the performance of steel plates under blast loads. *Mechanics of Materials*, 64, 1-10.

- [45] **Iqbal, N. Tripathi, M. Parthasarathy, S. Kumar, D. & Roy, P. K.** (2016). Polyurea coatings for enhanced blast-mitigation: a review. *RSC advances*, 6(111), 109706-109717.
- [46] **Iqbal, N. Tripathi, M. Parthasarathy, S. Kumar, D. & Roy, P. K.** (2018). Aromatic versus aliphatic: hydrogen bonding pattern in chain-extended high-performance polyurea. *ChemistrySelect*, 3(7), 1976-1982.
- [47] **Howarth, G. A.** (2003). Polyurethanes, polyurethane dispersions and polyureas: Past, present and future. *Surface coatings international part B: coatings transactions*, 86(2), 111-118.
- [48] **Cai, D. & Song, M.** (2014). High mechanical performance polyurea/organoclay nanocomposites. *Composites science and technology*, 103, 44-48.
- [49] **Primeaux, D. J.** (1992). 100% solids aliphatic spray polyurea elastomer systems. *Journal of Elastomers & Plastics*, 24(4), 323-336.
- [50] **Rijensky, O. & Rittel, D.** (2016). Polyurea coated aluminum plates under hydrodynamic loading: Does side matter?. *International Journal of Impact Engineering*, 98, 1-12.
- [51] **Bodin, C. C. K.** (2013). *Energy storage and dissipation in polyuria composites* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [52] **Pan, W. C. Lin, C. H. Dai, S. A.** (2014). High-performance segmented polyurea by transesterification of diphenyl carbonates with aliphatic diamines. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 52(19), 2781-2790.
- [53] **Casalini, R. Bogoslovov, R. Qadri, S. B. & Roland, C. M.** (2012). Nanofiller reinforcement of elastomeric polyurea. *Polymer*, 53(6), 1282-1287.
- [54] **Huang, W. B. Lu, P. Zhang, J. & Li, X. M.** (2011). Properties of aliphatic polyurea coated concrete under salt fog exposure. In *Advanced materials research* (Vol. 168, pp. 1010-1015). Trans Tech Publications Ltd.
- [55] **Url-1** <<https://www.fapu.de/de/polyurea-welt/was-ist-polyurea>>, date retrieved 29.11.2020.
- [56] **Qian, X. Song, L., Tai, Q. Hu, Y. Yuen, R. K.** (2013). Graphite oxide/polyurea and graphene/polyurea nanocomposites: a comparative investigation on properties reinforcements and mechanism. *Composites science and technology*, 74, 228-234.
- [57] **Qiao, J. Wu, G.** (2011). Tensile properties of fly ash/polyurea composites. *Journal of materials science*, 46(11), 3935-3941.
- [58] **Liu, Q. Chen, P. W. Guo, Y. S. Su, J. J. Han, L. Arab, A. Yuan, J. F.** (2020). Mechanical behavior and failure mechanism of polyurea nanocomposites under quasi-static and dynamic compressive loading. *Defence Technology*.
- [59] **Raman, S. N. Ngo, T. Lu, J. Mendis, P.** (2013). Experimental investigation on the tensile behavior of polyurea at high strain rates. *Materials & Design*, 50, 124-129.
- [60] **Hu, H. Yu, S. Wang, M. Ma, J. Liu, K.** (2009). Tribological properties of epoxy/polyurea composite. *Polymers for Advanced Technologies*, 20(9), 748-752.

- [61] **Wang, X. Luo, S. Z. Liu, G. S. Zhang, L. C. Wang, Y.** (2014). Abrasion test of flexible protective materials on hydraulic structures. *Water Science and Engineering*, 7(1), 106-116.
- [62] **Rothon, R. (Ed.).** (2017). *Fillers for polymer applications*. Berlin, Germany: Springer.
- [63] **Davim, J. P. & Charitidis, C. A.** (2013). *Nanocomposites: materials, manufacturing and engineering*. De Gruyter.
- [64] **Url-2** <<https://nanografi.com/nanoparticles/single-metal-oxide-nanoparticles/titanium-dioxide-nanoparticles/>>, date retrieved 29.11.2020.
- [65] **Url-6** <<https://shop.nanografi.com.tr/grafen-nanoplatelet-safl-k-99-9-boyut-3-nm-y-a-320-m2-g-cap-1-5/>>, date retrieved 29.11.2020.
- [66] **Ku, H. Wang, H. Pattarachaiyakoop, N. & Trada, M.** (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 856-873.
- [67] **Ramana, M. V. & Ramprasad, S.** (2017). Experimental investigation on jute/carbon fibre reinforced epoxy based hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8654-8664.
- [68] **Deepak, K. Vattikuti, S. P. & Venkatesh, B.** (2015). Experimental investigation of jute fiber reinforced nano clay composite. *Procedia Mater. Sci*, 10, 238-242.
- [69] **Raghavendra, G. Ojha, S. Acharya, S. K. Pal, S. K.** (2016). A comparative analysis of woven jute/glass hybrid polymer composite with and without reinforcing of fly ash particles. *Polymer Composites*, 37(3), 658-665.
- [70] **Seshanandan, G. Ravindran, D. Sornakumar, T.** (2016). Mechanical properties of nano titanium oxide particles-hybrid jute-glass FRP composites. *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 1383-1388.
- [71] **Prasad, V. Joseph, M. A. Sekar, K. Ali, M.** (2018). Flexural and impact properties of flax fibre reinforced epoxy composite with nano TiO<sub>2</sub> addition. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24862-24870.
- [72] **Prasad, V. Joseph, M. A. Sekar, K.** (2018). Investigation of mechanical, thermal and water absorption properties of flax fibre reinforced epoxy composite with nano TiO<sub>2</sub> addition. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 115, 360-370.
- [73] **Chand, N. Fahim, M.** (2020). *Tribology of natural fiber polymer composites*. Woodhead publishing.
- [74] **Friedrich, K.** (2018). Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 1(1), 3-39.
- [75] **McKeen, L. W.** (2016). *Fatigue and tribological properties of plastics and elastomers*. William Andrew.
- [76] **Davim, J. P. (Ed.).** (2011). *Tribology for engineers: A practical guide*. Elsevier.
- [77] **Davis, J. R. (Ed.).** (2001). *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. ASM international.
- [78] **Holmberg, K. Ronkainen, H. Laukkanen, A. Wallin, K.** (2007). Friction and wear of coated surfaces—scales, modelling and simulation of tribomechanisms. *Surface and Coatings Technology*, 202(4-7), 1034-1049.

- [79] **Sinha, S. K. Briscoe, B. J.** (2009). *Polymer tribology*. World Scientific.
- [80] **Chang, L. Zhang, Z.** (2006). Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO<sub>2</sub>. *Wear*, 260(7-8), 869-878.
- [81] **Ahmed, K. S. Khalid, S. S. Mallinatha, V. Kumar, S. A.** (2012). Dry sliding wear behavior of SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filled jute/epoxy composites. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 306-315.
- [82] **Deepak, P. Sivaraman, H. Vimal, R. Badrinarayanan, S. Kumar, R. V.** (2017). Study of Wear Properties of Jute/Banana Fibres Reinforced Molybdenum disulphide Modified Epoxy Composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2910-2919.
- [83] **Yallem, T. B. Kumar, P. Singh, I.** (2014). Sliding wear properties of jute fabric reinforced polypropylene composites. *Procedia Engineering*, 97, 402-411.
- [84] **Sailesh, A. Arunkumar, R., Saravanan, S.** (2018). Mechanical properties and wear properties of Kenaf–aloe vera–jute fiber reinforced natural fiber composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 7184-7190.
- [85] **Jha, K. Samantaray, B. B. Tamrakar, P.** (2018). A study on erosion and mechanical behavior of jute/e-glass hybrid composite. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5601-5607.
- [86] **Lin, L. Y. Lee, J. H. Hong, C. E. Yoo, G. H. & Advani, S. G.** (2006). Preparation and characterization of layered silicate/glass fiber/epoxy hybrid nanocomposites via vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM). *Composites Science and Technology*, 66(13), 2116-2125.
- [87] **Tate, J. S. Akinola, A. T. & Kabakov, D.** (2009). Bio-Based Nanocomposites: An Alternative to Traditional Composites. *Journal Of Technology Studies*, 35(1), 25-32.
- [88] **Topkaya, T.** (2017). Bal peteği sandviç kompozitlerin darbe ön hasarı sonrası yorulma davranışlarının araştırılması (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [89] **Goodship, V. D. Middleton, B. Cherrington, R.** (2015). *Design and manufacture of plastic components for multifunctionality: structural composites, injection molding, and 3D printing*. William Andrew.
- [90] **Verma, D. Fortunati, E. Jain, S. Zhang, X. (Eds.).** (2019). *Biomass, Biopolymer-based Materials, and Bioenergy: Construction, Biomedical, and Other Industrial Applications*. Woodhead Publishing.
- [91] **Url-3** <<https://shop.nanografi.com.tr/titanyum-dioksit-tio2-nano-tozu-safl-k-99-55-boyut-13-nm-anataz/>>, date retrieved 29.11.2020.
- [92] **Url-4** <<https://shop.nanografi.com.tr/grafen-nanoplatelet-safl-k-99-9-boyut-3-nm-y-a-320-m2-g-cap-1-5/>>, date retrieved 29.11.2020.
- [93] **Url-5** <[https://cdn11.bigcommerce.com/s-wepv6/product\\_images/uploaded\\_images/09gnp150-25.jpg](https://cdn11.bigcommerce.com/s-wepv6/product_images/uploaded_images/09gnp150-25.jpg)>, date retrieved 29.11.2020.

- [94] **Sezgin, H.** (2018). *Investigation and enhancement of the mechanical properties of the fabric reinforced hybrid composites* (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, İstanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul).
- [95] **ASTM International.** (2014). *Standard test method for tensile properties of plastics*. ASTM International.
- [96] **Standard, A. S. T. M.** (2003). D790-03. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials,* ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [97] **ISO, I.** (2010). 179–1: 2010, Plastics—Determination of Charpy Impact Properties, Part 1: Non-Instrumented Impact Test. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.*
- [98] **ASTM.** (2000). G99-95a (2000) e1, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus.
- [99] **Watanabe, M. Karasawa, M. Matsubara, K.** (1969). The frictional properties of nylon. *Tribology*, 2(1), 78.

# ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Yusuf Eren ERDOĞDU

## ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı
- **Doktora** : 2020, İnönü Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

## MESLEKİ DENEYİM:

- 2011-2013 Özel sektörde araştırma-geliştirme departmanlarında makina mühendisi olarak çalıştı.
- 2014-2020 İnönü Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı.