



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI SICAKLIK VE
SU YAŞLANDIRMASININ
ARAMİD/KARBON TAKVİYELİ ELİUM
MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Muhammed Hüseyin GÜZEL

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran - 2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Hüseyin GÜZEL tarafından hazırlanan “Farklı Sıcaklık ve Su Yaşlandırmasının Aramid/Karbon Takviyeli Elium Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisi” adlı tez çalışması 27/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
(Selçuk Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Gürol ÖNAL
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Necati ATABERK
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Abdullah ASLAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması, Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 221110045 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Muhammed Hüseyin GÜZEL

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI SICAKLIK VE SU YAŞLANDIRMASININ ARAMİD/KARBON TAKVİYELİ ELİUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Muhammed Hüseyin GÜZEL

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Gürol ÖNAL

2025, 113 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Gürol ÖNAL
Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Prof. Dr. Necati ATABERK
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Doç. Dr. Abdullah ASLAN**

Bu tez çalışmasında, katman içi aramid/karbon hibrit fiber takviyeli termoplastik Elium matrisli kompozitlerin mekanik performansı farklı sıcaklık ve su yaşlandırması etkisi altında deneysel olarak incelenmiştir. Mekanik özellikler çekme, eğilme, SENB ve DCB testleri yapılarak tespit edilmiştir.

Farklı sıcaklık kapsamında -50, -25, 0, +25 ve +50°C'de testler gerçekleştirilmiştir. +25°C'de test edilmiş numunelerde 513.19 MPa olarak elde edilen çekme mukavemeti -50°C'de +25°C'ye göre %4.93 artış gösterirken +50°C'de %9.00 azalmıştır. +25°C'de eğilme mukavemeti 291.55 MPa olarak elde edilirken -50°C'de 389.90 MPa ve +50°C'de 234.66 MPa bulunmuştur. SENB testlerinde, +25°C'de kırılma tokluğu $138.83 \text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, -50 ve +50°C'de yapılan testler sonucunda sırasıyla $151.04 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ve $126.27 \text{ MPa}\sqrt{m}$ tespit edilmiştir. DCB testlerinde, +25°C'de elde edilen Mod-I kırılma tokluğu 1123.39 J/m^2 olurken, -50 ve +50°C'de sırasıyla 1240.30 J/m^2 ve 1242.61 J/m^2 olarak bulunmuştur.

Su yaşlandırması kapsamında yaşlandırılmamış numuneler ile 2, 4 ve 6 ay boyunca saf suda yaşlandırılmış numuneler test edilmiştir. Yaşlandırılmamış numuneler ile kıyaslandığında, 6 ay yaşlandırma sonunda çekme mukavemeti %4.40, eğilme mukavemeti %25.89 ve SENB testinde kırılma tokluğu %21.56 azalmıştır. DCB testlerinde ise yaşlandırılmamış numunelerde elde edilen Mod-I kırılma tokluğu 6 ay yaşlandırma sonucunda %32.14 artış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Aramid/karbon fiber, farklı sıcaklık, katman içi hibrit kompozit, kırılma tokluğu, su yaşlandırması, termoplastik Elium reçine.

ABSTRACT

PhD THESIS

EFFECT OF DIFFERENT TEMPERATURES AND WATER AGING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ARAMID/CARBON REINFORCED ELIUM MATRIX COMPOSITES

Muhammed Hüseyin GÜZEL

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Assoc. Prof .Dr. Gürol ÖNAL

2025, 113 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Gürol ÖNAL
Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Prof. Dr. Necati ATABERK
Assoc. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Assoc. Prof. Dr. Abdullah ASLAN**

In this thesis, the mechanical performance of intraply aramid/carbon hybrid fiber reinforced thermoplastic Elium matrix composites was experimentally investigated under the effects of different temperatures and water aging. Mechanical properties were determined by tensile, flexural, SENB and DCB tests.

Tests were carried out at -50, -25, 0, +25 and +50 °C to evaluate the effects of different temperatures. The tensile strength of the specimens at +25 °C was 513.19 MPa and increased by 4.93% at -50 °C compared to +25 °C, while it decreased by 9.00% at +50 °C. The flexural strength was 291.55 MPa at +25°C, 389.90 MPa at -50°C and 234.66 MPa at +50°C. In SENB tests, the fracture toughness at +25°C was $138.83 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, while $151.04 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ and $126.27 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ were determined as a result of tests at -50 and +50°C, respectively. In DCB tests, the Mod-I fracture toughness obtained at +25°C was 1123.39 J/m^2 , while it was 1240.30 J/m^2 and 1242.61 J/m^2 at -50 and +50°C, respectively.

In the context of water aging, tests were conducted on unaged specimens as well as those aged in distilled water for 2, 4, and 6 months. Compared to unaged specimens, tensile strength decreased by 4.40%, flexural strength decreased by 25.89% and fracture toughness decreased by 21.56% in SENB test after 6 months of aging. In DCB tests, the Mod-I fracture toughness obtained in unaged specimens increased by 32.14% after 6 months of aging.

Keywords: Aramid/carbon fiber, different temperature, fracture toughness, intraply hybrid composite, thermoplastic Elium resin, water aging.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın başından sonuna kadar bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Gürol ÖNAL'a teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamın yürütülmesinde ve tamamlanmasında öneri ve tavsiyeleriyle katkı sağlayan tez izleme komitesi üyelerim Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU ve Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN'e de teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam kapsamında büyük bir özveriyle bana destek olan, çıkmaz yollarda kaldığımda bana ışık olup yol gösteren mesai arkadaşlarım Öğr. Gör. Ahmet ÖNDER, Öğr. Gör. Mehmet HALKACI ve Dr. Öğr. Üyesi İlyas DEVECİ'ye teşekkür ederim.

Tez sürecimin her aşamasındaki yardımları için Dr. Öğr. Üyesi Okan DEMİR, Arş. Gör. Taner COŞKUN ve Arş. Gör. Ahmet Caner TATAR'a da teşekkür ederim.

Her zaman her konuda yanı başımda olan ve akademik çalışmalarına ayırdığım vakitler için sonsuz sabır gösteren eşim Tuğba GÜZEL'e ve çocuklarım Beyza ve Arda'ya da ayrı ayrı teşekkür ederim.

2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı desteğinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) da teşekkür ederim.

Muhammed Hüseyin GÜZEL
KONYA - 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler	4
2.1.1. Sentetik Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler	4
2.1.1.1. Karbon Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler	4
2.1.1.2. Cam Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler	6
2.1.1.3. UYMAPE Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler	8
2.1.1.4. Aramid Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler.....	9
2.1.2. Doğal Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler	10
2.1.3. Elium Matrisli Kompozitlerin Kırılma Özellikleri	11
2.1.4. Elium Matrisli Kompozitlerin Farklı Sıcaklıklardaki Özellikleri.....	13
2.1.5. Elium Matrisli Kompozitlerin Sıvı Yaşlandırma Sonrası Özellikleri.....	14
2.2. Aramid/Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler	16
2.2.1. Aramid/Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	16
2.2.2. Aramid/Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerin Kırılma Özellikleri	18
2.2.3. Aramid/Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerin Farklı Sıcaklıklardaki ve Sıvı Yaşlandırma Sonrası Özellikleri.....	19
2.3. Bu Çalışmanın Literatürdeki Yeri.....	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. Kompozit Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler	23
3.1.1. Matris Malzeme	23
3.1.2. Takviye Edici Malzeme	24
3.2. Kompozit Numunelerin Üretimi.....	24
3.3. Üretilen Kompozit Numunelerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	29
3.3.1. Numune Yoğunluk Hesabı.....	29
3.3.2. Numune Fiber Kütle Oranı Hesabı	30
3.3.3. Numune Fiber Hacim Oranı Hesabı	30
3.3.4. Numune Su Emme Oranı Hesabı.....	30
3.4. Üretilen Kompozit Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	31
3.4.1. Çekme Testi	32
3.4.2. Üç Nokta Eğilme Testi	35
3.4.3. Kırılma Testleri.....	37
3.4.3.1. Tek Tarafı Çentikli Eğilme (SENB) Testi	37
3.4.3.2. Çift Ankastre Kiriş (DCB) Testi	40
3.5. Hasar Bölgelerinin İncelenmesi.....	46

3.6. Üretilen Kompozit Numunelere Uygulanan Ortam Şartları	46
3.6.1. Farklı Sıcaklıklardaki Testlerin Yapılması	46
3.6.2. Saf Su Yaşlandırması	47
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	48
4.1. Numunelerin Fiziksel Özellikleri.....	48
4.1.1. Numunelerin Su Emme Oranları	48
4.2. Numunelerin Mekanik Özellikleri	50
4.2.1. Numunelere Uygulanan Farklı Sıcaklıkların Etkisi.....	50
4.2.1.1. Farklı Sıcaklıklardaki Çekme Testi Sonuçları	51
4.2.1.2. Farklı Sıcaklıklardaki Eğilme Testi Sonuçları.....	56
4.2.1.3. Farklı Sıcaklıklardaki Tek Taraflı Çentikli Eğilme Testi Sonuçları	61
4.2.1.4. Farklı Sıcaklıklardaki Çift Ankastre Kiriş Testi Sonuçları.....	68
4.2.1.5. Farklı Sıcaklıklardaki Sonuçların Değerlendirilmesi	74
4.2.2. Numunelere Uygulanan Saf Su Yaşlandırmasının Etkisi	77
4.2.2.1. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Çekme Testi Sonuçları	77
4.2.2.2. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Eğilme Testi Sonuçları.....	82
4.2.2.3. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Tek Taraflı Çentikli Eğilme Testi Sonuçları	87
4.2.2.4. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Çift Ankastre Kiriş Testi Sonuçları.....	93
4.2.2.5. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Sonuçların Değerlendirilmesi.....	98
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	101
5.1 Sonuçlar	101
5.1.1. Farklı Sıcaklıklardaki Sonuçlar	101
5.1.2. Su Yaşlandırması Sonrası Sonuçlar	103
5.2 Öneriler	104
KAYNAKLAR	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ρ	:	Yoğunluk (g/cm ³)
m	:	Kütle (g)
A	:	Alan (m ²)
h	:	Kalınlık (mm)
W	:	Fiber kütle oranı (%)
N	:	Tabaka sayısı
V	:	Fiber hacim oranı (%)
M	:	Su emme oranı (%)
σ	:	Gerilme (MPa)
P	:	Kuvvet (N)
ε	:	Birim şekil değiştirme (mm/mm)
δ	:	Yer değiştirme (mm)
L	:	Uzunluk (mm)
E	:	Elastiklik modülü (GPa)
Δ	:	İki nokta arasındaki fark
b	:	Genişlik (mm)
a	:	Çatlak uzunluğu (mm)
K	:	Kırılma tokluğu ($MPa\sqrt{m}$)
$f(x)$	:	Kalibrasyon faktörü
G	:	Mod-I tabakalar arası kırılma tokluğu (J/m ²)

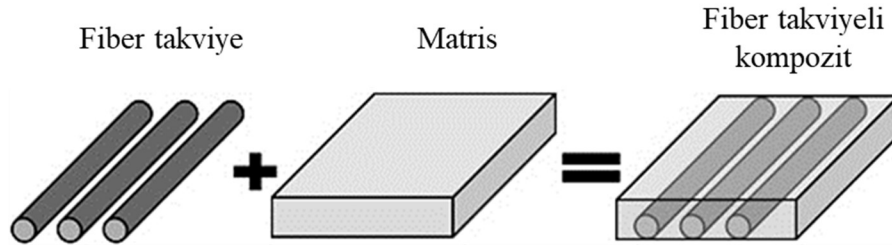
Kısaltmalar

ABS	: <i>Acrylonitrile - Butadiene - Styrene</i>
ASTM	: <i>American Society for Testing and Materials</i> (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
DCB	: <i>Double Cantilever Beam</i> (Çift Ankastre Kiriş)
ENF	: <i>End Notched Flexure</i> (Bir Ucu Çentikli Eğilme)
SEM	: <i>Scanning Electron Microscope</i> (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SENB	: <i>Single Edge Notch Bending</i> (Tek Tarafı Çentikli Eğilme)
UYMAPE	: Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
UYMAPP	: Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polipropilen

1. GİRİŞ

Kompozitler, kimyasal bileşimleri farklı ve birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla sayıda bileşenin kombinasyonundan oluşan malzemelerdir. Orijinal malzemelerden elde edilemeyen özellikleri sağlamak amacıyla kompozitler üretilir. Matris malzemesinin türüne göre polimerik, metalik ve seramik kompozitler olarak ayrılırlar. Yapı bileşenlerine göre ise fiber veya partikül takviyeli, levha ve tabakalı kompozitler olarak sınıflandırılabilirler. Kompozitler, hafiflik, yüksek darbe dayanımı, yüksek korozyon direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı çoğu mühendislik uygulamasında geleneksel malzemelere alternatif olarak kullanılmaktadır. Üstün özellikler elde etmek için matris malzemenin ya da katkıların iyileştirilmesi gerekmektedir. Bunun yanında matris ile katkı malzemesinin uyumu ve iyi ara yüzey birleşimi sağlaması da önemlidir.

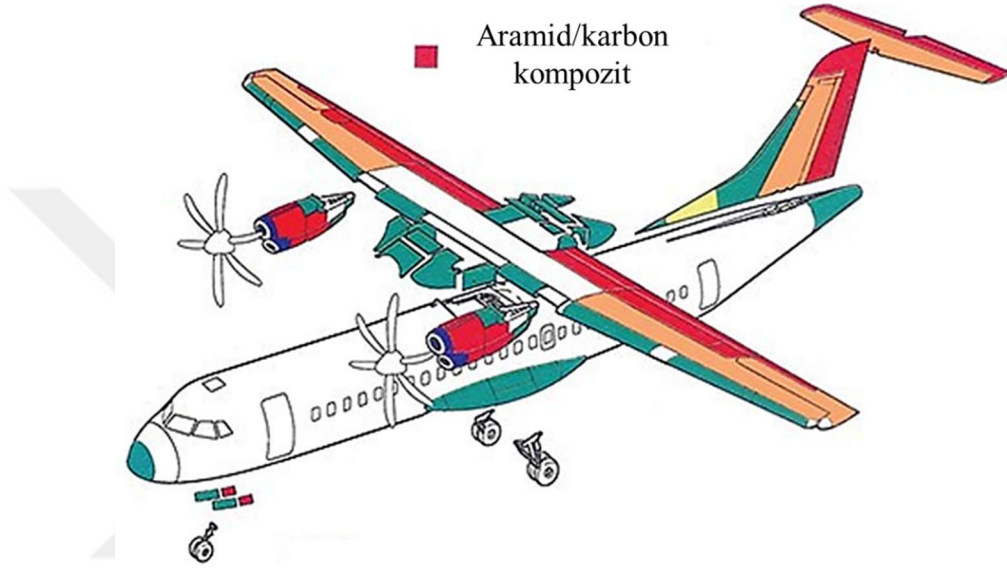
Fiber takviyeli kompozit malzemeler (Şekil 1.1) en çok kullanılan kompozit türüdür. Matrisin görevi içindeki takviye edici fiberleri bir arada tutmak ve onların malzeme üzerine gelen yüke karşı koyabilmesine yardımcı olmaktır. Takviye edicinin görevi ise kompozit malzeme içindeki dayanım, rijitlik ve diğer mekanik özelliklerin sağlanmasıdır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan başlıca takviyeler cam, karbon ve aramid fiberlerdir.



Şekil 1.1 Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi (Hesseler ve ark., 2021)

Karbon fiber düşük yoğunluk, yüksek rijitlik ve dayanıklılık gibi benzersiz özelliklere sahiptir. Havacılık, uzay, otomotiv ve denizcilik gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Aramid fiberler ise darbe ve aşınmaya karşı direnci yüksek olan bir fiber türüdür ve yüksek sıcaklığa direnç, düşük yoğunluk gibi özelliklere de sahiptir. Bu özellikleri sayesinde hava kuvvetleri, ordu (kurşun geçirmez yelekler, askeri araçlardaki zırhlar vb.), su ve motor sporları (bot, kano vb.) gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Aramid ve karbon fiberler hibrit bir şekilde kullanılabilir ve birçok özellik geliştirilebilir. Karbon fiber kompozitlere aramid fiber eklenerek darbe direnci önemli ölçüde artırılabilir. Benzer şekilde hasar veya çatlama riskini azaltmak için karbon fiberlere takviye edici olarak aramid kullanılabilir (Pincheira ve ark., 2018). Aramid/karbon fiberler havacılık alanında uçak gövdelerinde, kabin zemininde, rotorlarda, kanat ve yönlendiricilerde kullanılmaktadır. Şekil 1.2’de uçaklarda kullanılan aramid/karbon kompozitlerin kullanıldığı kısımlar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Uçaklarda kullanılan aramid/karbon kompozitler (Castanié ve ark., 2020)

Termoset reçinelerin (epoksi, polyester vb.) ticari kullanımı oldukça yaygın olmasına rağmen termoplastik reçinelerin kompozit parçalarda (özellikle büyük ölçekli) kullanımı yeterince yaygınlaşmamıştır. Termoplastik reçinelerin, ısı kullanılmadan üretim imkanı sunması, kısa üretim sürelerinin olması ve kullanım ömrünü tamamlamış parçaların geri dönüştürülebilmesi gibi önemli avantajları vardır (Cousins ve ark., 2019). Bu avantajlarından dolayı havacılık, otomotiv ve enerji vb. alanlarda kullanılan kompozitlerde termoset yerine termoplastik reçine kullanımı talep edilmektedir. Ayrıca, termoplastik reçinelerin termoset reçineler kadar iyi mekanik özellikler sunabildiği belirtilmiştir (Barbosa ve ark., 2019b; Obande ve ark., 2019b).

Termoset reçineli kompozitler geri dönüşüm açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Kompozitlere artan talepler sonucunda geri dönüşüm probleminin ekolojik sistem açısından önemi artmaktadır. Küresel düzenlemeler ve geri dönüşümün yaygınlaştırılması talepleri ile birlikte termoplastik reçineli kompozitlerin kullanımı artmaya başlamıştır. Havacılık, otomotiv ve enerji gibi çeşitli sektörlerde geri

dönüştürülebilir olma özelliğinden dolayı termoplastik reçineli kompozitlerin daha fazla kullanılacağı öngörülmektedir.

Bu bağlamda, havacılık alanında kullanılan kompozitlerin üretiminde çevreci uygulamaların arttırılması amacıyla uygun reçine seçimi önem arz etmektedir. Son yıllarda, metil metakrilat esaslı termoplastik bir reçine olan Elium, geleneksel termoset reçinelere kıyasla daha yüksek geri dönüştürülebilirlik ve işlenebilirlik avantajları sunmasıyla dikkat çekmektedir. Elium, oda sıcaklığında polimerleşebilme, düşük viskozite ve kolay işlenebilirlik özellikleri ile geleneksel termoset reçinelere güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, mekanik dayanımı yüksek olup aramid ve karbon gibi yüksek performanslı fiberlerle takviye edilerek çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılabilir.

Bu tez çalışması, geri dönüştürülebilir termoplastik Elium matrisli aramid/karbon katman içi hibrit fiber takviyeli kompozitler üzerine odaklanmaktadır. Günümüzde, hibrit fiber takviyeli kompozit malzemeler, farklı fiber türlerinin avantajlarını birleştirerek üstün mekanik özellikler sunabilmektedir. Aramid ve karbon fiberin hibrit yapı içinde bir araya getirilmesiyle, optimum mekanik performansa sahip kompozitler üretmek mümkün hale gelmektedir.

Bu çalışmada, Elium matrisli aramid/karbon hibrit fiber takviyeli kompozitlerin mekanik performansı detaylı olarak incelenmiştir. Bu kompozitlerin çekme, eğilme ve kırılma özellikleri belirlenerek farklı koşullara karşı mekanik davranışları analiz edilmiştir. Elde edilen veriler ile Elium matrisli hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri hakkında bilgiler sunulmaktadır. Bu malzemelerin uzay ve havacılık gibi ileri mühendislik uygulamalarında kullanım potansiyelini değerlendirmeye katkı sağlamak hedeflenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde sırasıyla fiber takviyeli Elium matrisli kompozitler, aramid/karbon fiberlerin takviye olarak kullanıldığı kompozitler ve tez çalışmasının literatürdeki yeri ele alınmıştır.

2.1. Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler

Gelecek vaat eden mekanik davranışa sahip geri dönüştürülmüş kompozit parçaların üretimine izin veren ilk sıvı termoplastik reçine olan Elium, 2014 yılında reçine piyasasına girmiştir (Allagui ve ark., 2021). Arkema tarafından geliştirilen Elium, ilk olarak Boufaida ve ark. (2015) tarafından akademik olarak ele alınmıştır. Bu tarihten itibaren çok sayıda akademik çalışmaya konu olan Elium matrisli kompozitler, yüksek performans sunma kabiliyeti sayesinde ilgi görmeye devam etmektedir. Literatürde yer alan Elium matrisli kompozit çalışmaları detaylı bir şekilde aşağıda açıklanmıştır.

Fiberler, elde edildikleri ham maddeye veya üretim türüne göre sentetik ve doğal fiberler olmak üzere ikiye ayrılır. Bu ayrım dikkate alınarak Elium reçine kullanılarak üretilen kompozit çalışmaları sentetik fiber takviyeli ve doğal fiber takviyeli olmak üzere iki bölümde ele alınmıştır.

2.1.1. Sentetik Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler

Sentetik fiberler insan yapımı fiberlerdir ve çoğunlukla doğal fiberlerden daha üstündürler. Uzay, havacılık, otomotiv ve enerji vb. çeşitli sektörlerde kullanılabilen sentetik fiberler, endüstride önemli yeri olan malzeme türlerindendir.

Sentetik fiber takviyeli Elium matrisli kompozitler karbon, cam ve Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UYMAPE) ve aramid fiber takviyeli kompozitler olmak üzere dört bölümde incelenmiştir.

2.1.1.1. Karbon Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler

Karbon fiberler düşük yoğunluğunun yanında yüksek rijitlik, dayanıklılık ve çekme mukavemeti gibi benzersiz mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde havacılık, uzay, savunma, otomotiv, enerji ve denizcilik gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Karbon fiber maliyeti teknolojinin ve üretim miktarının artması sayesinde her geçen gün azalmakta olsa da hâlâ çoğu kullanım alanı için oldukça yüksek maliyetli bir üründür. Bu nedenle düşük maliyetin önemli olduğu uygulamalarda kullanımı ekonomik değildir.

Bhudolia ve ark. (2017) vakum destekli infüzyon yöntemi ile üretilen Elium kompozitlerin üretim parametrelerini optimize etmeye çalışmıştır. Reçine kirlenmesi esnasında ortaya çıkan gazın aşamalı olarak vakum ile uzaklaştırılmasının daha az boşluklu ve daha tutarlı fiber hacim oranlarında numuneler üretmeye yardımcı olduğunu bulmuşlardır. Khan ve ark. (2022a) karbon ve cam fiber takviyeli Elium matrisli tabakalı kompozitler üretmiştir. Karbon fiberli kompozitlerde cam fiber kompozitlere göre daha az boşluk meydana gelmiştir. Aynı zamanda, cam fiber kompozitlerde, karbon fiber kullanılan duruma göre daha zayıf fiber matris ara yüzey bağlanması görülmüştür.

Gebhardt ve ark. (2021) karbon fiber takviyeli kompozitlerin geri dönüşüm sürecini araştırmıştır. Bu geri dönüşüm sürecinde, üretim atığı Elium matrisin, daha önce kullanılmamış Elium matrise bir katkı maddesi olarak yeniden kullanılmasını incelemişlerdir. Ağırlıkça %7.5'e kadar üretim atığı Elium matris katkısı sonucunda eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülünde neredeyse hiç değişiklik olmamıştır. Frej ve ark. (2021c) denizcilik uygulamaları alanında yaptıkları çalışmada karbon fiber takviyeli Elium matrisli kompozitlerde hem fiberlerin hem de matrisin geri kazanılması ve yeniden kullanılmasını araştırmıştır. Çekme davranışlarında, geri dönüştürülmüş kompozitlerin kullanılmamış olanlarla neredeyse aynı çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülü değerini gösterdiğini tespit etmişlerdir. Numuneler geri dönüştürülmeden 18.7 MPa tabakalar arası kayma mukavemeti gösterirken, geri dönüştürülmüş kompozitler 26.9 MPa değerine ulaşarak daha iyi performans göstermiştir.

Bhudolia ve ark. (2019c) karbon fiber takviyeli Elium kompozitlerin çekme, eğilme ve kısa kiriş tabakalar arası kayma testlerini gerçekleştirmiştir. 150 g/m²'den daha yüksek alan kütleline sahip kumaşlardan üretilen kompozitlerin çekme mukavemeti 589 MPa, eğilme mukavemeti 729 MPa ve tabakalar arası kayma mukavemeti 37.12 MPa olarak bulunmuştur. 150 g/m²'den daha düşük alan kütleline sahip kumaşlardan üretilen kompozitlerin çekme mukavemeti 742 MPa, eğilme mukavemeti 813 MPa ve tabakalar arası kayma mukavemeti 42.15 MPa elde edilmiştir. Sonuç olarak, daha düşük alan kütleline sahip kumaşlardan üretilen kompozitlerin daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Bhudolia ve ark. (2019a) çalışmasında karbon fiber takviyeli Elium ve epoksi kompozitlerin eğilme davranışını incelemiştir. Elium kompozitlerin epoksi kompozitlere yakın eğilme mukavemeti değerleri gösterdiği belirtilmiştir. Khan ve ark. (2022b) karbon fiber takviyeli Elium kompozitlerin eğilme davranışlarını incelemiştir. Hasar görmüş numunelere farklı sıcaklıklarda iyileştirme işlemi uygulanmış ve daha yüksek sıcaklıklarında iyileştirilenlerin daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Bhudolia ve Joshi (2018) çalışmasında karbon fiber takviyeli Elium ve epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışını incelemiştir. 25 J, 42 J ve 52 J olmak üzere üç farklı darbe enerjisinde yapılan testler sonucunda, Elium kompozitler %56'ya kadar daha fazla hasar enerjisi değeri göstermiştir. Bhudolia ve ark. (2019b) tarafından yapılan Elium kompozitlerin düşük hızlı darbe özelliklerinin incelendiği diğer bir çalışmada ise 200 g/m² ve 400 g/m² karbon fiber kumaşın etkisi araştırılmıştır. 25 J darbe enerjisinde, 400 g/m² olan kumaştan üretilen kompozitler 16.9 J hasar enerjisi gösterirken, 200 g/m² olan kumaştan üretilenler 22.6 J değerine ulaşarak %33.7 daha iyi performans sergilemiştir. Pinto ve ark. (2021) rüzgar türbin kanatlarını etkileyen düşük hızlı darbe davranışlarını incelemek için karbon ve cam fiber takviyeli Elium ve epoksi matrisli kompozitler üretmiştir. Sonuçlara göre Elium'un epoksinin yerini alabilecek potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir.

Demski ve ark. (2023) tek duvarlı karbon nanotüp katkısının karbon fiber takviyeli Elium kompozitlere etkisini araştırmıştır. Karbon fiber kumaşlara infüzyon yöntemi ile Elium'un emdirilmesi ile üretilen numunelere nano katkı sayesinde Young modülü, darbe direnci ve tabakalar arası kayma mukavemetinin arttığı görülmüştür. Shonar ve Chalivendra (2023) ağırlıkça %0.025 çok duvarlı karbon nanotüp katkılı, 0°/90° ve 45°/45° olarak yerleştirilmiş karbon ve cam fiber tabakalı Elium kompozitler üretmiştir. Tabakalar arası kayma testlerine göre 45°/45° olarak yerleştirilmiş numuneler, 0°/90° olanlara göre daha fazla kayma şekil değiştirmesi göstermiştir.

2.1.1.2. Cam Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler

Cam fiberler denizcilik, otomotiv ve enerji alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon fiberler ile kıyaslandığında daha düşük mekanik özellikler göstermektedir. Ancak, geleneksel malzemelerle kıyaslandığında mekanik özellikler, hafiflik ve maliyet konularında önemli avantajlara sahiptir. Ayrıca, kimyasallara karşı olan direnci diğer malzemelerin kullanılmadığı yerlerde cam fiber kompozitlerin kullanımını mümkün kılmaktadır.

Cousins ve ark. (2019) cam fiber takviyeli Elium termoplastik reçine ile üretilen kompozit rüzgar türbini kanat bileşenlerinin geri dönüşümünü araştırmışlardır. Sonuç olarak, cam fiberin %50'sinin ve reçinenin %90'ının geri kazanılabileceğini göstermişlerdir.

Ciardiello ve ark. (2023) cam fiber takviyeli Elium kompozitlerin üretiminde vakum infüzyon basıncının mekanik özellikler üzerine etkisini incelemiştir. Vakum

infüzyon basıncının 0.5 bar değerinden 0.8 bar değerine çıkarılması durumunda çekme mukavemetinde %6 ve eğilme mukavemetinde %8 artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Stanley ve ark. (2021) cam fiber kumaş kullanarak kompozitler üretmiştir. Fiber matris ara yüzey bağlanmasını iyileştirmek için matris içinde dağılan selüloz mikro kristaller (ağırlıkça %0.5, %1 ve %2) kullanmışlardır. %1 selüloz mikro kristal katkısının, eğilme mukavemetini %30, tabakalar arası kayma mukavemetini %38 ve aşınma performansını %22 iyileştirdiği görülmüştür.

Lorriot ve ark. (2015) rüzgar endüstrisi için vakum infüzyon yöntemi ile ürettikleri kompozitleri test etmiştir. Cam fiber takviyeli Elium ve epoksi reçineli numunelerin çekme davranışları incelenmiştir. Epoksi reçineli numuneler 452 MPa çekme mukavemeti gösterirken Elium'lu olanlar 480 MPa değerine ulaşmıştır. Shah ve ark. (2021c) yaptıkları çalışmada cam fiber takviyeli Elium kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çekme, basma, V çentikli kayma testleri ve kısa kiriş tabakalar arası kayma testleri gerçekleştirilmiştir. Elium kompozitler, termosetlere göre %15.5 daha yüksek çekme mukavemeti ve %21 daha yüksek kopma şekil değiştirmesi göstermiştir. Elium kompozitlerin basma mukavemeti termosetlerden %19 daha yüksek olmuştur. V-çentikli kayma testleri sonuçları her iki matrisli kompozitlerde de yaklaşık olarak aynı iken tabakalar arası kayma mukavemeti Elium kompozitlerde %20 daha yüksek olmuştur. Shah ve ark. (2022) 0°, 30°, 45°, 60° ve 90° olarak yerleştirilmiş tabakalar ile çeşitli cam fiber oryantasyonlarının etkisini değerlendirmiştir. 0° ve 90° oryantasyonlarının eğilmede daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan üç nokta eğilme testlerine göre Elium ve epoksi kompozitlerin eğilme mukavemetleri yaklaşık olarak benzer çıkarken Elium kompozitlerin eğilmede elastiklik modülü ve birim şekil değiştirme değerleri daha yüksek olmuştur.

Kinvi-Dossou ve ark. (2019) Elium kompozitlerin mekanik davranışını Charpy ve düşük hızlı darbe testleriyle araştırmıştır. Yapılan 10 J ile 60 J arasında yapılan darbe testleri, Elium kompozitlerinin belirgin bir biçimde daha üstün bir performans sergilediğini göstermiştir. Aynı zamanda, Obande ve ark. (2019b) cam fiber takviyeli Elium ve epoksi matrisli kompozitlerin darbe özelliklerini inceleyerek Elium'un %9 daha yüksek bir sönümleme özelliğine sahip olduğunu tespit etmiştir. Shah ve ark. (2021a) cam fiber takviyeli Elium ve epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe özelliklerini incelemiştir. Elium kompozitlerin %45'e kadar azaltılmış hasar alanı sergilediği ve %20'ye kadar daha yüksek darbe yükü taşıma kapasitesine sahip olabileceği ortaya koyulmuştur. Shah ve ark. (2021b) cam fiber takviyeli Elium ve epoksi kompozitlerinin darbe sonrası basma ve

burkulma davranışlarını araştırmıştır. Darbe sonrası basma testleri, Elium matrisli kompozitlerin darbe kaynaklı hasara daha az duyarlı olduğunu göstermiştir. Khan ve ark. (2023) Elium matrisi kullanarak ağırlıkça %2 ve %5 grafen nano-platelet katkılı filmler üretmiştir. Üretilen filmler tabakalar halinde cam fiber takviye ile birlikte kullanılarak Elium kompozit numuneler oluşturulmuştur. Üretilen kompozitler, %5 grafen nano-platelet katkı olduğunda takviyesiz olanlara göre %48 daha fazla darbe dayanımı göstermiştir.

Bakkal ve ark. (2023) cam fiber takviyeli Elium kompozitlerin yorulma özelliklerini araştırmıştır. $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$, $0^\circ/90^\circ$ ve $\pm 45^\circ$ olarak yerleştirilmiş tabakalar ile oryantasyon etkisini değerlendirmişlerdir. Hem çekme mukavemetinde hem de yorulma mukavemetinde en yüksek değerler $0^\circ/90^\circ$ cam fiber tabakalı kompozitlerde elde edilmiştir. $\pm 45^\circ$ cam fiber tabakalı kompozitler ise gerilme-çevrim sayısı eğrilerinde en düşük yorulma mukavemeti göstermiştir.

2.1.1.3. UYMAPE Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler

UYMAPE fiberler, yüksek mukavemet ve elastiklik modülüne sahip olmanın yanında düşük yoğunluktadır. Kimyasallara karşı direnç konusunda önemli özellikler taşıyan UYMAPE fiberler maliyetinin yüksek olmaması ile endüstride kendine yer bulmaktadır.

Shanmugam ve ark. (2019a) yaptıkları çalışmada UYMAPE fiber ile Elium arasındaki ara yüzey bağlanma gücünü artırmak için fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp ile modifiye edilmiş dopamin kaplama çözeltisini fiber yüzeyine kaplamıştır. Enine fiber demet testlerinin sonucunda, %0.03 nanotüp içeren dopamin kaplamasının fiberlere uygulanması ile fiber matris bağlanma kuvvetinin %42.5 artabileceğini göstermişlerdir. Bunun aksine, Elium matrisine nanotüp eklenmesi, dopamin kaplaması ile UYMAPE fiber arasındaki ara yüzey belirgin şekilde daha zayıf bir bağlanma etkisi göstermiştir. Sonuç olarak, daha düşük maliyetli ve daha hızlı bir şekilde uygulanabilen nanotüp yüzey modifikasyonunun, matrise nanotüp ilave edildiği duruma göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Shanmugam ve ark. (2020) devam çalışmalarında UYMAPE fiber takviyeli kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışını incelemiştir. 26 J, 32 J ve 50 J olmak üzere üç farklı darbe enerjisinde yapılan testler sonucunda, %0.03 nanotüp içeren dopamin kaplamasının uygulandığı fiberlerde darbe sonrası daha az hasar olduğu bildirilmiştir.

Kazemi ve ark. (2019) vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle ürettikleri Elium matrisli UYMAPE ve karbon fiber takviyeli kompozitler üzerinde çekme, basma ve kayma testleri yapmıştır. Sonuç olarak, termoplastik matrisli kompozitlerin termoset matrisli kompozitler kadar iyi mekanik özellikler sunduğunu ve geri dönüştürülebilme avantajından dolayı endüstride geniş uygulama alanları bulacağını belirtmişlerdir. Kazemi ve ark. (2020) yaptıkları devam çalışmasında Elium ve epoksi matrisli UYMAPE fiber takviyeli kompozitlere düşük hızlı darbe testleri yapmıştır. Testler sonucunda, termoplastik Elium matrisli kompozitlerin daha sünek davranış gösterdiği ve daha fazla darbe yükü elde ettiği bildirilmiştir. Ayrıca, Elium kompozitlerin %40 daha az emilen enerji ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, Elium kompozitlerinin epoksi kompozitlerine göre darbeye karşı önemli ölçüde iyi performans gösterdiği ortaya konulmuştur. Kazemi ve ark. (2021) yaptıkları diğer bir çalışmada, Elium matrisli UYMAPE ve karbon fiber takviyeli Elium ve epoksi matrisli kompozitlerin düşük hızlı darbe özelliklerine fiber tipi, reçine tipi ve istifleme sırasının etkilerini araştırmıştır. Üstte ve altta UYMAPE kumaşların olduğu hibrit tabakalanma sisteminde emilen enerjinin %18'e kadar azaltılabildiğini göstermişlerdir.

Gohel ve ark. (2023) UYMAPE, Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polipropilen (UYMAPP) ve polyester kumaş takviyeli Elium ve epoksi matrisli kompozitlerin oda sıcaklığında darbe özelliklerini araştırmıştır. 10 J, 20 J, 30 J, 40 J ve 50 J olmak üzere beş farklı darbe enerjisinde yapılan düşük hızlı darbe testleri sonucunda her üç takviye kumaşında da Elium reçinenin epoksiye göre daha üstün özellikler gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, Elium kompozitlerde fiber ve matris ara yüzey bağlanmasının daha sağlam gerçekleştiği de görülmüştür.

2.1.1.4. Aramid Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler

Taheri ve Llanos (2024) epoksi ve Elium matrisli aramid fiber takviyeli kompozitleri araştırmıştır. Çekme testlerinde epoksi matrisli olanlarda 463.2 MPa çekme mukavemeti ve 27.83 GPa çekmede elastiklik modülü elde edilirken Elium matrislilerde bu değerler 641.6 MPa ve 35.04 GPa olmuştur. Bunun aksine, kayma testlerinde epoksi numuneler daha iyi performans göstermiştir ve epoksi matrislilerde 61.2 MPa ve Elium matrislilerde 11.2 MPa kayma mukavemeti elde edilmiştir. Yapılan düşük ve yüksek hızlı darbe testlerinde ise Elium matrisli kompozitler daha üstün performans göstermiştir.

Bandaru ve ark. (2024b) Elium matrisli aramid fiber kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapılan testler sonucunda 173.11 MPa eğilme mukavemeti ve

19.63 MPa kayma mukavemeti elde edilmiştir. Bandaru ve ark. (2024a) diğer bir çalışmada 1.5 ve 2.5 mm kalınlıklara sahip Elium aramid kompozitlerin özelliklerini araştırmıştır. Çekmede ince numunelerde 667.9 MPa çekme mukavemeti görülürken kalınlarda 591.5 MPa değeri elde edilmiştir. Benzer durum eğilme testlerinde de gözlenmiştir. Eğilme mukavemeti değerleri 330.7 ve 278.8 MPa olmak üzere incelerde daha yüksek tespit edilmiştir. Kayma testlerinde ise bunun tersi görülmüştür. Kalın numunelerde 16.5 MPa olan kayma mukavemeti incelerde 14.5 MPa değerine düşmüştür.

2.1.2. Doğal Fiber Takviyeli Elium Matrisli Kompozitler

Bitki, hayvan ve mineral bazlı kaynaklardan üretilen doğal fiberler, genellikle yüksek elastiklik modülü gerekli olmadığında ve düşük maliyetli üretim gerektiğinde tercih edilirler. Doğal fiberlerin hidrofilik doğası, fiberlerin şişmesine ve matris ile fiber arasındaki ara yüzeyde boşlukların oluşmasına neden olabilir ve hazırlanan kompozitlerin zayıf mekanik özellikler göstermesine yol açabilir.

Elium ile bazalt fiberin birlikte kullanıldığı çalışmada Meyer zu Reckendorf ve ark. (2022) kompozitlerin geri dönüşümü üzerine odaklanmıştır. Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş kompozitlerin kullanılmamış olanlarla benzer mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir.

Chilali ve ark. (2016) vakum infüzyon tekniği kullanarak, keten ve cam fiber takviyeli termoplastik Elium ve termoset epoksi matrisli kompozit numuneler üretmiştir. Yaptıkları mekanik testlerde, Elium ve epoksi matrisli numunelerde çok yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Monti ve ark. (2016) keten fiber takviyeli Elium matrisli kompozitleri üretmiştir ve kompozitlerde mikro hasar mekanizmalarının tanımlanması ve karakterizasyonu için akustik emisyon tekniğini kullanılmıştır. Sonuç olarak, çekme mukavemeti 230 MPa ve çekmede elastiklik modülü 23.3 GPa elde edilmiştir. Baley ve ark. (2018) polipropilen, epoksi ve Elium olmak üzere üç farklı matrise jüt ve keten fiber takviye etmiştir. Çekme ve basma testleri gerçekleştirmişlerdir ve tüm numunelerde çekme mukavemetinin basma mukavemetinden yüksek olduğunu görmüşlerdir. Çalışmada fiber hacim oranlarının etkisi de araştırılmıştır ve sonucunda daha fazla oranda fiber kullanımı ile çekme mukavemetindeki artışın basma mukavemetindeki artıştan önemli derecede fazla olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, keten kompozitlerinin jüte göre hem çekmede hem de basmada daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Barbosa ve ark. (2020) jüt fiber takviyeli Elium matrisli kompozitleri vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile benzoil peroksit oranı ağırlıkça %1.2 olacak şekilde

üretmiştir. Testler sonucunda, çekme mukavemeti 41.5 MPa ve çekmede elastiklik modülü 5 GPa olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, jüt/Elium kompozitlerinin endüstri için daha sürdürülebilir üretimde düşük maliyetli bir alternatif olabileceği gösterilmiştir. Khalili ve ark. (2021) Elium matrisi, orman endüstrisinin önemli bir parçası olan rejenere selüloz (rayon) fiberler ile takviye etmiştir. Üretilen kompozit numunelerin mekanik özelliklerini araştırmak için çekme ve eğilme testleri yapılmıştır. Sonuçlara göre çekme mukavemeti 77.5 MPa, çekmede elastiklik modülü 3.2 GPa, eğilme mukavemeti 93.5 MPa ve eğilmeye elastiklik modülü 5.6 GPa bulunmuştur. Yaghoobi ve Taheri (2021) çalışmasında epoksi ve Elium matrise bazalt fiber takviye etmiştir ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çekme, burkulma ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerine göre, bazalt/Elium numuneler bazalt/epoksi numunelerine göre %24 daha fazla olacak şekilde 440 MPa çekme mukavemeti göstermiştir. Elium kompozitlerin epoksi kompozitlere iyi bir alternatif olabileceği belirtilmiştir.

Khalili ve ark. (2019) Elium matrise takviye olarak jüt fiber kullanarak kompozitler üretmiş ve aleve karşı dirençlerini incelemiştir. Grafen nano katkı kullanımı ile %14 oranında arttırılmış cam geçiş sıcaklığı elde etmişlerdir. Khalili ve ark. (2020) çalışmasında rami fiber takviyeli Elium matrisli kompozitlerin yanma, alevlenme ve duman özelliklerinde epoksi muadillerine göre üstün özellikler sunduğunu belirtmiştir.

Karbon, cam, UYMAPE, aramid ve doğal fiber takviyeler ile ilgili yapılan bu çalışmalar, Elium kompozitlerinin mekanik özelliklerini anlamak ve performanslarını optimize etmek adına önemli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, termoplastik Elium matrisinin, hasara dayanıklı uygulamalar için termoset epoksi matrise etkili bir ikame olduğunu ortaya koymaktadır.

2.1.3. Elium Matrisli Kompozitlerin Kırılma Özellikleri

Literatür incelendiğinde Elium kompozitlerin kırılma davranışlarının araştırıldığı az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bunlar aşağıda sunulmuştur.

Pini ve ark. Elium matris ile birlikte Elium matrisi içerisine ağırlıkça %10 akrilik blok kopolimer ilave edilmiş türevini (Elium Impact) kullanarak kompozitler üretmiş ve çeşitli incelemeler yapmıştır. İlk olarak fiber takviyeli kompozit üretiminde kullanılmak üzere tasarlanan bu iki reçine incelenmiştir ve her iki matrisin kırılma davranışının farklı eğilimlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Elium matriste çatlak hızı arttıkça tabakalar arası kırılma tokluğu artarken kopolimer ilave edilmiş matriste azalma görülmüştür (Pini ve ark., 2018b). Daha sonra bu reçinelere karbon fiber takviye edilmiştir ve kırılma

davranışları araştırılmıştır. Elium matrisli testlerdeki kırılmaların düşük fiber matris ara yüzey bağlanması nedeniyle olduğu ve matris içinde meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Kopolimer ilave edilmiş matriste ise fiber matris ara yüzey bağlanmasının daha iyi olduğu ve tabakalar arası kırılma tokluğunun arttığı belirtilmiştir (Pini ve ark., 2017; Pini ve ark., 2018a).

Bhudolia ve ark. (2016) raket benzeri spor ürünleri için önemli olan mekanik özellikleri deneysel olarak araştırmıştır. Elium ve epoksi reçineye karbon takviye edilerek vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilen numunelere çekme, eğilme ve DCB (Double Cantilever Beam - Çift Ankastre Kiriş) testleri yapmış ve karşılaştırılmıştır. Özellikle çekme ve eğilmede çatlak ilerlemesine direnmede Elium reçinenin çok üstün potansiyeli olduğu bildirilmiştir. Bhudolia ve ark. (2018) tarafından yapılan diğer bir çalışmada Elium reçine ve karbon fiber kullanılmıştır ve Elium kompozitlerinin Mod-I tabakalar arası kırılmaya karşı üstün performans sergilediği tespit edilmiştir. Barbosa ve ark. (2019a) yaptıkları çalışmada kompozitlerin delaminasyon sonucu hasar durumlarını araştırmıştır. Karbon fiber takviyeli Elium matrisli kompozitleri vakum infüzyon yöntemi ile üretmişlerdir ve ENF (End Notched Flexure - Bir Ucu Çentikli Eğilme) numuneleri ile Mod-II kırılma tokluğu testleri yapmışlardır. Çatlak ilerlemesine karşı daha dirençli olan Elium kompozitlerin epoksi kompozitlere göre, tabakalar arası kırılmaya %40 daha fazla direnç gösterdiğini tespit etmişlerdir. Khan ve ark. (2022c) yaptıkları çalışmada karbon fiber takviyeli Elium kompozit numunelere ön çatlak açmışlardır. Daha sonra bu numuneler Elium'un cam geçiş sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda ve farklı sürelerde sıcak pres ile iyileştirilmiştir. Mod-I kırılma tokluğu değerlerinin bulunması için DCB testleri yapılmıştır. Sonuçlara göre daha yüksek sıcaklıkta ve daha uzun sürelerde iyileştirilen numuneler, daha yüksek kırılma tokluğu değerleri göstermiştir. Chen ve ark. (2024) tek yönlü karbon fiber takviyeli Elium matrisli kompozitlere DCB testleri yaparak tabakalar arası ayrılma özelliklerini araştırmıştır. Mod-I kırılma tokluğu değerini 322 J/m^2 olarak elde etmişlerdir. Bu değer, fiber matris ara yüzey bağlanması güçlendirilmesi ile önemli artış sergileyerek 1024.8 J/m^2 'ye kadar yükselebileceğini göstermişlerdir.

Shanmugam ve ark. (2019b) yaptıkları diğer çalışmada UYMAPE fiber takviyeli kompozitler üzerine DCB testleri yapmıştır. 1 mm/dk hızda yapılan testler sonucunda Mod-I kırılma tokluğunun dopamin kaplaması ile %19.6 ve %0.03 çok duvarlı karbon nanotüp içeren dopamin kaplamasının fiberlere uygulanması ile %42.5 arttığını tespit etmişlerdir. Bu artış, iyi fiber matris ara yüzey bağlanması ve Elium reçinenin yüksek

sünekliğine bağlanmıştır. Bhudolia ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada UYMAPE, UYMAPP ve polyester kumaş takviyeli Elium ve epoksi matrisli kompozitler üretmiştir ve kırılma özelliklerini incelemiştir. Ayrıca, Elium matrisin içine ABS (Acrylonitrile - Butadiene - Styrene) kopolimer parçacık katkısının etkisini de araştırmışlardır. DCB testleri sonucunda en yüksek ortalama kırılma tokluğu değerlerinin, polyester kumaş takviyeli ABS katkılı Elium matrisli numunelerde elde edildiğini bildirmişlerdir. Bhudolia ve ark. (2022) kompozitlerin Mod-I ve Mod-II tabakalar arası kırılma davranışlarını incelemiştir. Karbon fiber ile UYMAPE ve UYMAPP fiberlerin hibrit olarak kullanıldığı Elium ve epoksi matrisli kompozitlerin DCB ve ENF testleri gerçekleştirilmiştir. Elium kompozitlerin hem Mod-I hem de Mod-II kırılma tokluğu değerlerinde daha yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Cao (2024) keten fiber takviyeli Elium matrisli kompozitleri üretmiştir ve kompozitlere DCB ve ENF testleri yapmıştır. Mod-I kırılma tokluğu değerini 16.3 J/m^2 ve Mod-II kırılma tokluğu değerini 13.1 J/m^2 olarak elde etmiştir. Ayrıca, fiber matris ara yüzey bağlanmasını güçlendirmek amacıyla matrise %15 silan ilavesi yaparak Mod-I ve Mod-II kırılma tokluğu değerlerinde %42.8 ve %85.4 artış gözlemiştir.

Sonuç olarak, Elium reçinenin epoksiye göre daha sünek davranabilmesinden dolayı daha iyi kırılma özellikleri gösterdiği bulunmuştur.

2.1.4. Elium Matrisli Kompozitlerin Farklı Sıcaklıklardaki Özellikleri

Boumbimba ve ark. (2017) Elium kompozitlerin düşük hızlı darbe özelliklerini araştırmıştır. Kendiliğinden birleşen kopolimer ilavesinin, darbe enerji seviyesinin ve test sıcaklığının incelendiği çalışmada karışıma ağırlıkça %5, %10 ve %15 kopolimer toz eklenmiştir. Yüksek darbe enerjilerinde daha iyi darbe direnci elde edilmiştir. $+20^\circ\text{C}$ ve $+80^\circ\text{C}$ sıcaklıklarda yapılan testlerde toz ilavesi darbe direncinde artışa neden olurken -80°C 'deki testlerde darbe direncini azaltmıştır.

Cadieu ve ark. (2020) cam fiber takviyeli Elium kompozitlerin mekanik özellikleri ve hasar mekanizmaları üzerinde sıcaklığın etkisini incelemiştir. Malzemenin gevrek davranıştan sünek davranışa geçişinin $+60^\circ\text{C}$ 'de meydana geldiğini ve sıcaklık $+20^\circ\text{C}$ 'den $+150^\circ\text{C}$ 'ye yükseldiğinde maksimum yükün %91 düştüğünü tespit etmişlerdir. $+20^\circ\text{C}$ 'nin altında, fiber kırılması, fiber kopması, tabaka içi ve tabakalar arası çatlak ilerlemesinin olduğu, $+60^\circ\text{C}$ 'de, fiber matris ara yüzeyinde mikro-çatlak yayılmasını değiştiren polimer matrisinin plastik akışının gözlemlendiğini ve $+90^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde, sadece tabakalar içi mikro-çatlak meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Cadieu ve ark. (2021) çalışmalarında cam fiber takviyeli Elium matrisli kompozitlerin kırılma davranışlarını incelemiştir. Farklı yükleme hızlarında ve -10°C 'den $+60^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar farklı sıcaklıklarda DCB testleri yapmışlardır ve hasar mekanizmalarını gözlemlemek için taramalı elektron mikroskobu ile kırılma yüzeylerini gözlemlemiştir. Sıcaklık $+60^{\circ}\text{C}$ 'ye çıktığında rijitlikte bir değişiklik olmazken matrisin sünekliğinden dolayı maksimum yükün %18 arttığını belirtmişlerdir. Han ve ark. (2022) vakum destekli reçine transfer tekniği ile cam fiber takviyeli Elium matrisli kompozitler $+24^{\circ}\text{C}$, $+50^{\circ}\text{C}$ ve $+80^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda üretilmiştir. Kompozitlere kısa kiriş tabakalar arası kayma, DCB ve ENF testleri yapılmıştır. Üretimdeki sıcaklık artışının tabakalar arası kayma mukavemetini %41, Mod-I kırılma tokluğunu %66 ve Mod-II kırılma tokluğunu %227 artırdığı bulunmuştur. Ayrıca, üretimdeki sıcaklık artışının daha iyi fiber matris ara yüzey bağlanması gösterdiği de tespit edilmiştir.

2.1.5. Elium Matrisli Kompozitlerin Sıvı Yaşlandırma Sonrası Özellikleri

Barbosa ve ark. (2019b) saf su yaşlandırmasının tabakalı kompozitler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bunun için, karbon fiber takviyeli Elium ve epoksi matrisli kompozitler vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Yaşlandırılmamış numuneler için, Elium kompozitler, epoksi kompozitlerden %30 daha fazla çekme mukavemeti göstermiştir. 80°C 'de 8 hafta süreyle saf su yaşlandırmasına maruz kalmış numunelerde ise bu fark %14 olmuştur. Ayrıca, epoksi kompozitler Elium kompozitlere göre daha fazla su emmiştir. Elium kompozitlerde %1.40 olan boşluk miktarı epoksi kompozitlerde %1.72 olmuştur. Epoksi kompozitlerin daha fazla su emmesi, bu oran ile ilişkilendirilmiştir. Frej ve ark. (2021b) karbon fiber takviyeli Elium matrisli kompozitlerde hidrotermal yaşlanmanın etkisini araştırmıştır. Hızlandırılmış yaşlandırma testleri, $+70^{\circ}\text{C}$ 'de deiyonize suda gerçekleştirilmiştir. Yaşlandırma sonucunda çekme özelliklerinde oldukça az değişim gözlenirken tabakalar arası kayma değerlerinde önemli azalmalar olmuştur. Frej ve ark. (2021a) yaptıkları diğer çalışmada karbon fiber takviyeli Elium matrisli kompozitleri farklı yaşlandırma koşulları altında test etmişlerdir. Deiyonize su içerisinde $+40^{\circ}\text{C}$ ve $+70^{\circ}\text{C}$ olmak üzere iki farklı sıcaklıkta bekletilen numunelerde su emme mekanizmalarını araştırmışlardır. Daha yüksek sıcaklıkta yaşlandırmanın mekanik olarak daha fazla etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir.

Bandaru ve ark. (2022) cam fiber takviyeli Elium kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemiştir. Ayrıca, numuneler 60 gün $+60^{\circ}\text{C}$ 'de damıtılmış suda yaşlandırılmıştır. Yaşlandırmanın çekme mukavemetini %30, eğilme mukavemetini

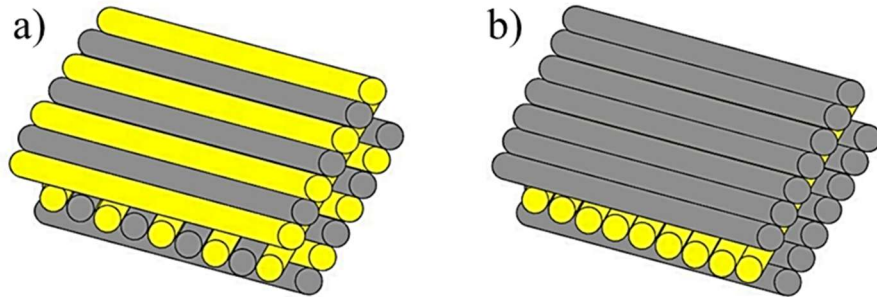
%59, tabakalar arası kayma mukavemetini %46 ve Mod-II kırılma tokluğunu %37 azalttığı tespit edilmiştir. Bunun aksine yaşlandırılmış numunelerde Mod-I kırılma tokluğu %90 daha yüksek olmuştur. Bu durum, yaşlanmaya bağlı olarak önemli ölçüde fiber köprülemesine bağlanmıştır. Devine ve ark. (2023) cam fiber takviyeli Elium ve epoksi matrisli kompozitlerin $+50^{\circ}\text{C}$ 'de deniz suyunda bekletildikten sonraki davranışlarını araştırmıştır. Elium matrisin epoksiden daha hızlı su emdiğini gözlemişlerdir. Bu durum üretilen numunelerde Elium matrisli olanların daha fazla boşluk içermesine bağlanmıştır. Daha fazla su emmesine rağmen yaşlandırma sonucunda Elium kompozitlerin mekanik özelliklerinin az etkilendiğini tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, boşluklara yerleşen serbest suyun etkisinin bağlanan suya göre daha az olduğu bildirilmiştir. Das ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada keten ve cam fiber takviyeli Elium ve epoksi matrisli kompozitler üretmiştir. Üretilen numuneler, sıvı yaşlandırması için $+23^{\circ}\text{C}$, $+40^{\circ}\text{C}$ ve $+60^{\circ}\text{C}$ 'de 7, 14, 28 ve 56 gün bekletilmiştir. Keten fiber kompozitlerin cam fiber olanlara göre daha fazla su emdiği gözlenmiştir. Kumar ve ark. (2024) cam fiber takviyeli Elium matrisli kompozitlerin $+55^{\circ}\text{C}$ 'de deniz suyunda 2 ay bekletildikten sonraki davranışlarını araştırmıştır. Yaşlandırılmamış numunelerde 292 MPa ve 17.2 GPa olan çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülü, yaşlandırma sonrası %25.6 ve %13 oranlarında azalarak 217.14 MPa ve 14.98 GPa olmuştur. Eğilme testlerinde ise 357.44 MPa olan eğilme mukavemeti %14.8 azalarak 305.75 MPa olarak elde edilmiştir. Hussnain ve ark. (2024) cam fiber takviyeli Elium matrisli kompozitlerin $+35^{\circ}\text{C}$ 'de deniz suyunda 135 gün ve $+70^{\circ}\text{C}$ 'de deniz suyunda 90 gün bekletildikten sonraki özelliklerini incelemiştir. Yaşlandırılmamış numunelerde 431.6 MPa ve 21 GPa olan çekme mukavemeti $+35^{\circ}\text{C}$ 'de yaşlandırma sonrası 387.8 MPa ve 20.5 GPa, $+70^{\circ}\text{C}$ 'de yaşlandırma sonrası 230.2 MPa ve 18.5 GPa değerlerine düşmüştür.

Chilali ve ark. (2017) çalışmasında vakum infüzyon tekniği ile üretilmiş keten fiber takviyeli Elium ve epoksi kompozitlerin difüzyon davranışını araştırmıştır. Su emme testleri, oda sıcaklığında musluk suyu ve tuzlu su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonucunda Elium kompozitin, epoksi kompozite göre daha az su emdiğini bulmuşlardır. Chilali ve ark. (2018) diğer bir çalışmasında Elium ve epoksiye keten fiber takviye etmiştir ve yaşlandırma için musluk suyu kullanmıştır. Elium ve epoksinin su yaşlandırmasından sonraki mekanik özelliklerinin benzer olduğunu bulmuşlardır. Elium reçinenin epoksiden daha yüksek maliyetli olmasına rağmen vakum infüzyon ve reçine transfer kalıplama gibi geleneksel üretim yöntemlerine uygunluğu ve geri dönüştürülebilir olması avantajlarıyla öne çıktığını belirtmişlerdir. Drouhet ve ark. (2022)

kenevir fiber ile takviye edilmiş Elium ve epoksi kompozitler üreterek incelemeler yapmıştır. Su yaşlandırmasında $+21^{\circ}\text{C}$, $+60^{\circ}\text{C}$ ve $+70^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklar ele alınmıştır. Her iki matrisin de sıcaklık ve nem etkisi altında mekanik özelliklerinde düşüşler görülmüştür. Elium kompozitlerin sıcaklıktan daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir. Manaii ve ark. (2023) keten fiber takviyeli Elium matrisli kompozitler üretmiştir. Çalışmalarında sıvı yaşlandırmasının düşük hızlı darbe özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Sıvı yaşlandırma sonrasında darbe direncinde %20 azalma tespit edilmiştir.

2.2. Aramid/Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitlerde hibrit kullanım farklı biçimlerde yapılabilmektedir. Kompozitler, katman içi (intraply) veya interply olarak fiberler ile takviye edilebilir. Katman içi, Şekil 2.1-a'da görüldüğü gibi, tek bir tabaka içinde farklı fiberlerin kullanımını tarif eder. Interply ise Şekil 2.1-b'deki gibi farklı fiber tabakalarının birbiri üzerine yerleştirilmesi durumudur. Katman içi takviyede kullanılan kumaşlarda, farklı fiberler tek bir tabakayı oluşturacak şekilde örülür. Interply takviyede ise tek tip fiberden üretilmiş kumaşlar kullanılır.



Şekil 2.1 Fiber takviye biçimlerinin şematik gösterimi a) intraply b) interply (Czech ve ark., 2021)

2.2.1. Aramid/Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Bu başlık altında, katman içi biçimde aramid/karbon fiber ile takviye edilmiş kompozitler ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir. Elium reçine ile birlikte aramid/karbon fiber takviyenin kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmadığından epoksi matrisin aramid/karbon fiber ile takviye edildiği çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

Kim ve ark. (2011) aramid/karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin çekme davranışını araştırmıştır. Sadece aramid fiber takviyeli numunelerin çekme mukavemeti 449.7 MPa ve çekmede elastiklik modülü 37.3 GPa olurken aramid/karbon fiber takviyeli numunelerin çekme mukavemeti aramid fiber yönünde 428.9 MPa ve

karbon fiber yönünde 625 MPa ve çekmede elastiklik modülü aramid yönünde 33.2 GPa ve karbon yönünde 64.97 GPa olmuştur. Kim ve ark. (2023) aramid ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmalarında reçine infüzyon yöntemi ile hem interply hem de katman içi kompozit numuneler üretmişler ve davranışlarını incelemişlerdir. Katman içi numunelerde karbon fiberlerin çekme doğrultusunda olduğu durumlarda interply numunelere göre daha yüksek çekme mukavemeti (katman içi:516.3 MPa - interply:412.85 MPa) ve çekmede elastiklik modülü (katman içi:54.1 GPa - interply:46.05 GPa) değerlerine ulaşıldığını bildirmişlerdir.

Alsaadi ve ark. (2017) çalışmasında aramid/karbon fiber tabakaların cam fiber tabakalar ile hibridizasyonunun çekme ve eğilme davranışları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çekme mukavemeti 378.6 MPa ve çekmede elastiklik modülü 18.50 GPa olarak elde edilmiştir. Eğilme testlerinde, eğilme mukavemeti 482.9 MPa ve eğilmede elastiklik modülü 16.2 GPa bulunmuştur. Cam fiber tabaka katkısı sonucunda ise çekme gerilmesine karşı performansta azalma olurken eğilmeye karşı dirençte artış olduğunu belirlemişlerdir. Alsaadi ve ark. (2018) tarafından aramid/karbon fiber kompozitlere nano-silika partikül katkısının çekme ve eğilme davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kompozit numune üretiminde ağırlıkça %0.5, %1, %1.5, %2.5 ve %3 olmak üzere beş farklı oranda nano-silika katkısı yapılmıştır. Nano-silika katkısı olmayan numunelerin çekme mukavemeti 371 MPa olurken, %3 nano-silika katkılı numunede 445 MPa olmak üzere %20 daha fazla performans göstermiştir. %1.5 nano-silika katkılı numunede eğilme mukavemeti nano-silika katkısı olmayan numunelere göre %35 artış göstererek 600 MPa olmuştur. Alsaadi ve ark. (2020) diğer çalışmasında aramid/karbon fiber tabakalara nano-kil partikül katkısının çekme ve eğilme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kompozit numune üretiminde ağırlıkça %0, %1, %2, %4, %6, %8 ve %10 olmak üzere yedi farklı oranda nano-kil katkısı yapılmıştır. Ağırlıkça %1 kil nano-kil katkılı numunede 421 MPa olmak üzere en yüksek çekme ve ağırlıkça %2 kil nano-kil katkılı numunede 554 MPa olmak üzere en yüksek eğilme mukavemeti değerleri elde edilmiştir.

Sebaey ve Wagih (2019) aramid/karbon fiber takviyeli katman içi ve sandviç kompozitlerin eğilmeye karşı performansını deneysel olarak araştırmıştır. Dört nokta eğilme testi sonuçlarına göre katman içi ve sandviç yapıların hasar yapısının farklı olduğu görülmüştür. Katman içi numunelerde katastrofik bir hasar gözlenirken, sandviç numunelerde ilerleyici hasar gözlenmiştir. Sandviç numuneler, katman içi numunelere kıyasla %30 daha yüksek özgül mukavemet göstermiştir.

Yin ve ark. (2021) çalışmasında aramid/karbon fiber takviyeli kompozitlerin eğilme davranışını fiber yönlenmesine göre araştırmıştır. Eğilme testlerinde, numuneler karbon fiber yönünde yüklendiğinde 559 MPa eğilme mukavemeti değerine ulaşırken, aramid fiber yönünde yüklendiğinde daha sünek davranmış ve eğilme mukavemeti 359 MPa olmuştur.

Ying ve ark. (2017) çalışmasında hem katman içi hem de interply aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışını deneysel olarak incelemiştir. Bulunan sonuçları sadece aramid ve sadece karbon fiber takviyeli numunelerin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Aynı darbe enerjileri altında, darbe yüzeyinde karbon fiber kumaş bulunan interply hibrit kompozitlerin en yüksek darbe hasarı direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Quanjin ve ark. (2020) çalışmasında otomotiv parçalarından çarpma kutusunda, hafiflik ve enerji soğurma performansı avantajlarından dolayı aramid/karbon fiber takviyeli kompozitlerin kullanımını araştırmıştır. Bu amaçla, içi boş bir yapıya sahip aramid/karbon kompozit çarpma kutusu üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Sonuç olarak, aramid/karbon kompozitlerin, otomotiv çarpışma kutusu olarak kullanılmak üzere metal malzemelerin yerini alma konusunda umut verici bir potansiyele sahip olabileceğini öne sürmüşlerdir. Qi ve ark. (2023) tarafından el yatırması yöntemi ile üretilen aramid/karbon fiber takviyeli kompozitlerin çekme, basma ve kayma özellikleri araştırılmıştır. Hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sonuçlar alınıp karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

2.2.2. Aramid/Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerin Kırılma Özellikleri

Kim ve ark. (2011) DCB numunesi kullanarak aramid/karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin davranışını araştırmıştır. Sadece karbon fiber takviyeli numunelerin test sonuçları aramid/karbon fiber takviyeli numunelerden daha yüksek bulunmuştur. Sadece aramid fiber takviyeli numunelerin ipliğinde ayrılmalar meydana gelmiştir ve fiber matris ara yüzey bağlanmasının zayıf olduğu görülmüştür. Ayrıca, aramid/karbon fiber takviyeli numunelerin Mod-I kırılma tokluğunun, sadece karbon fiber ve sadece aramid fiber takviyeli numunelerin kırılma tokluklarının ortalamasına eşit olduğu gözlenmiştir.

Pincheira ve ark. (2018) çalışmasında aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerde aramid fiberin etkisini deneysel olarak incelemiştir ve sadece karbon fiber takviyeli numunelerin sonuçları ile karşılaştırmıştır. Gerçekleştirilen testler,

aramid/karbon fiber takviyeli kompozitlerdeki aramid fiberin, malzeme sertliğini küçük miktarda azaltmasına rağmen darbe ve kırılmaya karşı dirençte önemli artış sağladığını göstermiştir. Bu durum, aramid fiberin sahip olduğu karbon fiberden daha sünek yapıya atfedilmiştir. Bu bilgi sayesinde kırılma ve çarpma özelliklerinde aramid fiberlerin davranışının büyük ölçüde avantaj sağlayabileceği ile birlikte uçak ve uzay gibi yüksek performanslı uygulamalarda yararlı olabileceği belirtilmiştir.

Rajasekar ve ark. (2019) tarafından aramid/karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin kırılma davranışına fiber köprülemenin etkisi araştırılmıştır. DCB numunesi ile yapılan testler sonucunda, Kim ve ark. (2011) çalışmasındaki sonuçların aksine, aramid/karbon fiber takviyeli numunelerin Mod-I kırılma tokluğunun hem sadece karbon fiber hem de sadece aramid fiber takviyeli numunelerin kırılma tokluklarından daha yüksek olduğu bulunmuştur. Köprüleme etkisinden ve iyi fiber matris ara yüzey bağlanmasının kaynaklanan bir sonuç olarak katman içi fiber takviyesinin, delaminasyon direncini artırdığı belirtilmiştir.

Alsaadi ve Erklığ (2021) aramid ve karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin kırılma davranışını araştırmıştır. Silisyum karbür partikül katkısının da incelendiği çalışmada, Mod-I kırılma tokluğunun DCB numunesi ile test edildiği deneyler gerçekleştirilmiştir. Partiküllerin aramid epoksi kompozitlere karbon epoksi kompozitlerden daha iyi yapıştığı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %5 partikül katkılı karbon fiber takviyeli numunede Mod-I kırılma tokluğu 701 J/m^2 olurken ağırlıkça %10 partikül katkılı aramid fiber takviyeli numunede 1391 J/m^2 değeri elde edilmiştir.

Bulut ve ark. (2020) çalışmasında aramid/karbon fiber tabakalara nano-kil ve nano-silika partikül katkısının etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. %1.5 nano-silika katkılı numunelerde ve %2 nano-kil katkılı numunelerde Mod-II kırılma tokluğunun arttığı bulmuşlardır. Ayrıca, her iki nanopartikül katkısı durumunda da ağırlıkça oranının artması ile su emme kapasitelerinin arttığını da bildirmişlerdir.

2.2.3. Aramid/Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerin Farklı Sıcaklıklardaki ve Sıvı Yaşlandırma Sonrası Özellikleri

Literatürde, katman içi aramid/karbon fiber takviyeli kompozitlerin farklı sıcaklıklarda ve sıvı yaşlandırma sonrası özelliklerine ilişkin oldukça az çalışma mevcuttur. Bunlar kısaca aşağıda açıklanmıştır.

Priyanka ve ark. (2021) tarafından sadece aramid fiber ve aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çekme, basma ve eğilme

testleri ile mekanik özellikler araştırılmıştır ve +30°C, +50°C, +70°C ve +90°C sıcaklıklarda sürünme testleri yapılmıştır. Ayrıca kompozit numunelerin difüzyon davranışını incelenmiştir. Su emme testleri için numuneler +35°C, +50°C ve +65°C sıcaklıklarda 72 saat saf suda bekletilmiştir. Aramid/karbon fiber takviyeli kompozitlerin çekme, basma ve eğilmeye karşı sadece aramid fiber takviyeli olanlardan daha yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Morfolojik incelemeler su difüzyonunun fiber yönüne doğru daha hızlı olduğunu ortaya koymuştur.

Karakuzu ve ark. (2021) tarafından ortam sıcaklığının aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. 20 J, 30 J, 50 J ve 80 J olmak üzere dört farklı darbe enerjisinde ve +23°C, +40°C, +60°C ve +80°C sıcaklıklarda testler yapılmıştır. Test sonuçlarına göre +80°C dışındaki sıcaklıklarda yapılan testlerin sonuçları benzer çıkmıştır. Djele ve Karakuzu (2021) devam çalışmasında, aynı şekilde üretilmiş kompozit numunelere yarı statik testler yapmıştır. +23°C, +40°C, +60°C ve +80°C sıcaklıklarda yapılan testler sonucunda, numuneleri belirli bir test hızında delmek için gereken enerji miktarının, düşük hızlı darbe testi ile aynı seviyede olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, malzemelerin delinmesi için gereken enerji miktarının düşük hızlı darbe testleri yerine uygun hızda yarı statik testler yapılarak da bulunabileceğini belirtmişlerdir.

Girijappa ve ark. (2022) çalışmasında keten, aramid, karbon ve aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerine tabakalanma sırasının etkisini incelemiştir. Numunelere çekme, eğilme, darbe, tabakalar arası kayma ve su emme testleri yapılmıştır. Keten fiberlerin aramid ve karbon ile birlikte kullanımı ile daha iyi performans ortaya çıkmıştır. Tabakalanma sırasının performansı önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Dış tabakaların karbon iç tabakaların keten olduğunu numuneler çekme, eğilme, darbe ve tabakalar arası kayma testlerinin tamamında daha iyi sonuçlar elde etmiştir. 30 günlük su yaşlandırması sonucunda en fazla su emen sadece keten fiber takviyeliler olurken en az su emen sadece karbon fiber takviyeli numuneler olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, çeşitli hafif mühendislik uygulamalarında hibrit keten fiberlerin kullanabileceği belirtilmiştir.

2.3. Bu Çalışmanın Literatürdeki Yeri

Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet/yoğunluk oranları ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv ve enerji gibi mühendislik alanlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle, termoplastik matrisli kompozit malzemeler, geri

dönüştürülebilir olmaları, darbe dayanımlarının yüksekliği ve işlem süreçlerinin kolaylaştırılması açısından termoset esaslı kompozitlere alternatif olarak öne çıkmaktadır. Metil metakrilat esaslı Elium reçinesi, mekanik ve fiziksel özellikleriyle geleneksel termoset reçinelere kıyasla çeşitli avantajlar sunmakta ve bu bağlamda yenilikçi bir malzeme olarak dikkat çekmektedir.

Mevcut literatür incelendiğinde, Elium matrisli kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmaların büyük ölçüde karbon ve cam fiber takviyeli sistemlere odaklandığı görülmektedir. Aramid ve karbon hibrit fiberlerle güçlendirilmiş Elium matrisli kompozitler üzerine gerçekleştirilen sistematik ve kapsamlı çalışmaların son derece sınırlı olduğu belirlenmiştir. Özellikle, bu malzemelerin farklı sıcaklıklarda ve su yaşlandırması gibi çevresel etkilere karşı gösterdiği mekanik tepkinin detaylı olarak incelendiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamaktadır. Bunun yanı sıra, su yaşlandırmasının ve düşük sıcaklık koşullarının kompozitlerin kırılma davranışları ve hasar mekanizmaları üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik deneysel çalışmaların eksik olduğu tespit edilmiştir. Ancak, aramid ve karbon fiberlerle güçlendirilmiş Elium matrisli kompozitlerin farklı sıcaklıklar ve su yaşlandırmasına karşı davranışlarının incelenmesi, havacılık ve uzay sanayii, denizcilik, otomotiv ve yenilenebilir enerji gibi kritik mühendislik alanlarındaki gerçek dünya uygulamaları için büyük önem taşımaktadır. Bu sektörlerde kullanılan malzemelerin, uçuş sırasında karşılaşılan aşırı düşük sıcaklıklardan yağmur suyuna maruz kalmaya veya rüzgar türbinlerinde olduğu gibi sürekli nem ve yağışa kadar çok farklı zorlu çevresel koşula dayanması gerekmektedir. Bu kapsamda, saf suyun tercih edilmesi ile yağmur suyunda bulunabilen değişken kimyasal bileşenlerin etkisi ortadan kaldırılmıştır. Böylece, deney koşulları standartlaştırılmış ve tekrarlanabilirlik sağlanmıştır. Saf su kullanımı ile suyun kompozitler üzerindeki temel yaşlandırma mekanizmalarının, diğer çevresel faktörlerden arındırılmış olarak daha net anlaşılmasına olanak tanınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde elde edilen sonuçların mevcut literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması sağlanmıştır.

Bu çalışma, Elium matrisli katman içi aramid/karbon hibrit fiber takviyeli kompozitlerin mekanik ve kırılma özelliklerini detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında, numuneler belirlenen farklı sıcaklıklarda test edilmiş ve farklı sürelerde saf su yaşlandırmasına tabi tutulmuş, ardından çekme, eğilme, SENB (Single Edge Notch Bending - Tek Tarafı Çentikli Eğilme) ve DCB testleri gerçekleştirilerek mekanik performansları değerlendirilmiştir.

Ayrıca, makro ve mikro görüntüler ile malzemenin iç yapısındaki değişimler analiz edilmiştir.

Literatürdeki eksikliği gidermeyi hedefleyen bu çalışma, aramid/karbon hibrit kompozitlerin çevresel koşullara karşı performansını değerlendirmeye yönelik bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışma sonuçlarının hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar açısından yol gösterici olacağı düşünülmektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde sırasıyla kompozit numunelerin üretiminde kullanılan malzemelerden, kompozit numunelerin üretim sürecinden, kompozit numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinden ve kompozit numunelere uygulanan ortam koşullarından bahsedilmiştir. Böylece, kompozit numune üretimi başlangıcından testlerin sonuçlandırılmasına kadar olan tüm süreçler detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.1. Kompozit Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışması kapsamında üretilen kompozit numuneler için matris ve takviye edici olmak üzere iki ana malzeme kullanılmıştır. Matris olarak Elium ve takviye edici olarak aramid/karbon hibrit fiber kullanılmıştır. Kompozit üretiminde kullanılan tüm malzemeler Dost Kimya Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir.

3.1.1. Matris Malzeme

Kompozit malzeme üretiminde matris olarak birbirlerine göre çeşitli üstünlükleri olmakla birlikte iki tür reçine kullanılmaktadır. Bunlar termoset ve termoplastik reçinelerdir. Aralarındaki en temel fark, termoplastik reçinelerin geri dönüştürülebilir olmasıdır. Kompozit üretiminde kullanılan termoplastik reçineler genellikle yüksek süneklik gösteren yapıdadır. Bundan dolayı termoplastik reçineli kompozitler, termoset reçinelilere göre daha fazla kalıcı şekil değiştirme gösterebilirler (Shanmugam ve ark., 2020).

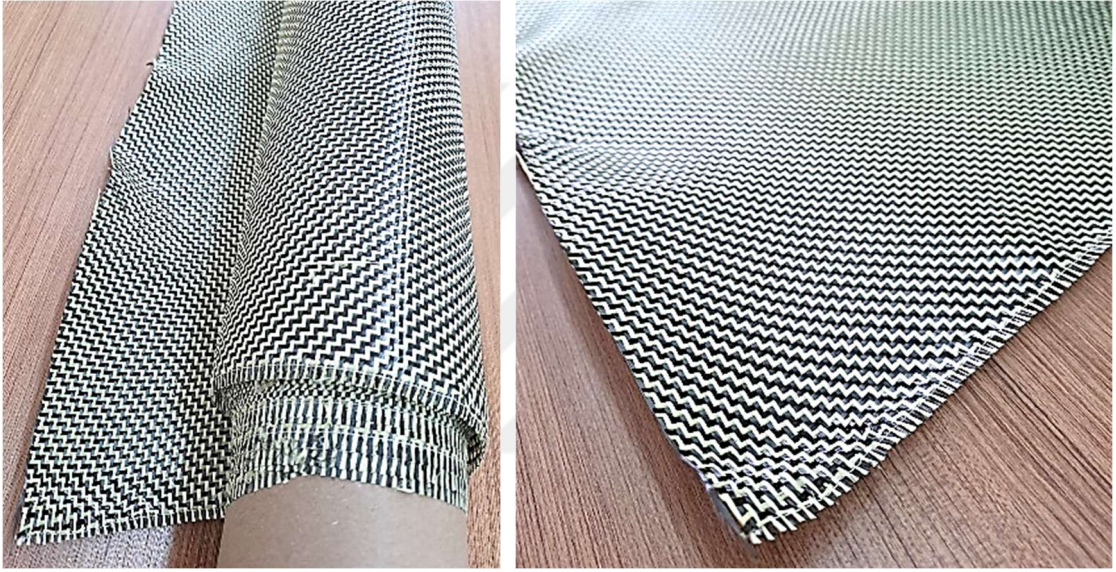
Bu çalışmada, Arkema tarafından geliştirilen metil metakrilat bazlı termoplastik bir reçine olan Elium kullanılmıştır. Elium reçine vakum infüzyon yöntemi ile fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde tercih edilerek kullanılmaktadır (Kazemi ve ark., 2020). Tablo 3.1'de Elium'un genel özellikleri verilmiştir. Elium'un kritik enerji salınım değeri 0.5 kJ/m^2 'dir ve epoksi reçinenin kritik enerji salınım değeri olan 0.12 kJ/m^2 'den daha büyüktür (Bhudolia ve ark., 2017). Bu nedenle, kompozitlerde epoksi reçine yerine Elium kullanımı ile çatlak büyümesine karşı daha yüksek dirençli bir yapı elde edilebilir. Elium oda sıcaklığında kürlenebilir, ısıyla sonradan şekillendirilebilir ve geri dönüştürülebilir (Kazemi ve ark., 2019; Kazemi ve ark., 2020).

Tablo 3.1. Elium'un özellikleri

Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme mukavemeti (MPa)	Çekmede elastiklik modülü (GPa)	Kırılma tokluğu ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	Maksimum sürekli çalışma sıcaklığı (°C)
1.19	76	3.3	1.2	85

3.1.2. Takviye Edici Malzeme

Aramid, yüksek performanslı bir sentetik poliamid türüdür ve karbon, hidrojen, nitrojen ve oksijen atomlarından oluşan aromatik zincirlerden oluşmaktadır. Karbon fiber ise temel bileşeni %99 saf karbon atomlarından oluşan kristalize grafit yapıdadır. Elium'u takviye etmek için %39'u aramid fiberden ve %61'i karbon fiberden oluşan aramid/karbon katman içi hibrit kumaş kullanılmıştır. Yüksek mekanik performans gösterme özelliğine sahip bu hibrit kumaşın kalınlığı 0.2 mm, alan kütlesi 210 g/m^2 ve el yatırması için tavsiye edilen reçine tüketimi 260 g/m^2 'dir. 1 metrelik rulo halinde temin edilen kumaş Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Aramid/karbon katman içi hibrit kumaş

3.2. Kompozit Numunelerin Üretimi

Numuneler üretimine başlamadan önce yapılması gereken ön hazırlıklar vardır. Bunlar sarf malzemelerin, takviye edicinin ve matrisin hazırlanmasıdır.

Sarf Malzemelerin Hazırlanması

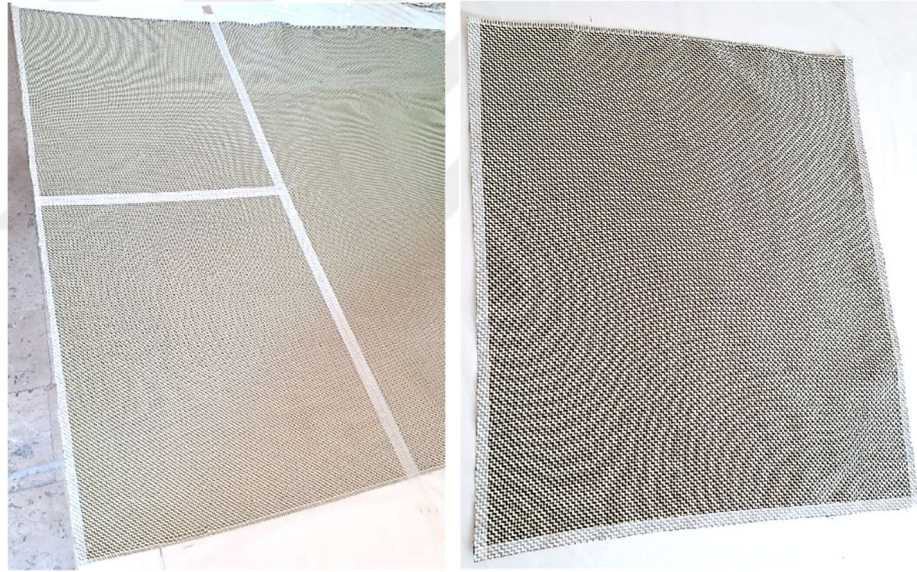
Numune üretiminden önce ilk olarak üretim için gerekli olan sarf malzemeler hazır hale getirilmiştir. Kullanılan sarf malzemeler Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bunlar soldan sağa doğru sırasıyla vakum sızdırmazlık bandı, vakum naylonu, peel ply kumaş (soyma kumaşı), infüzyon filesi, infüzyon vakum hortumu ve infüzyon spiral hortumdur.



Şekil 3.2 Üretimde kullanılan sarf malzemeler

Takviye Edicinin Hazırlanması

Sarf malzemeler hazır edildikten sonra aramid/karbon hibrit kumaş kesilmiştir (Şekil 3.3). Kesim yapılırken ölçünün değişmemesi ve kumaşın yapısının bozulmaması için kâğıt bant kullanılmıştır. Bant üzerine gerekli işaretlemeler yapıldıktan makas ile kesim gerçekleştirilmiştir. 50 x 60 cm ve 50 x 30 cm ölçülerinde kesim yapılmış ve kumaşlar üretime hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.3 Kumaşın kesilmesi ve hazırlanması

Matrisin Hazırlanması

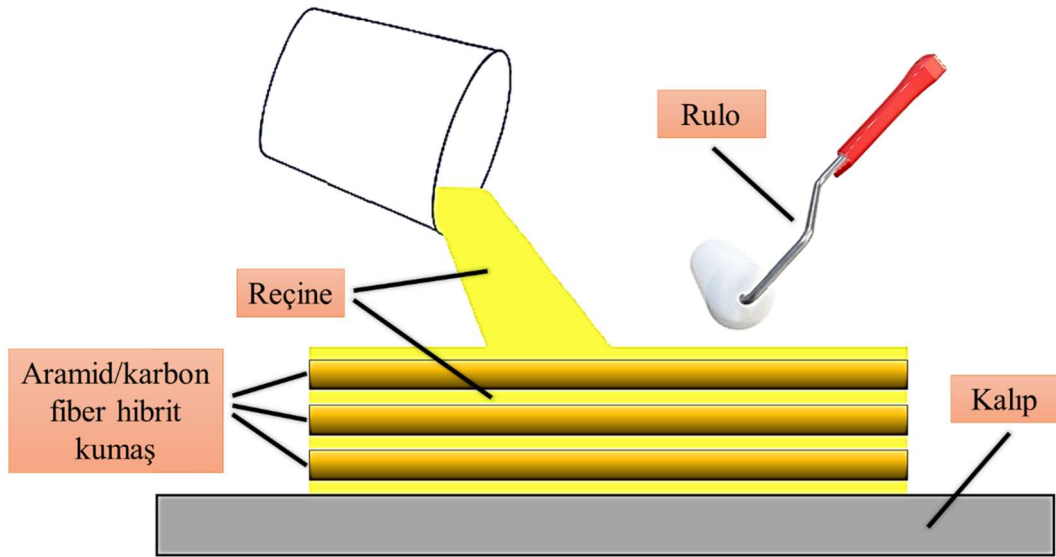
Sarf malzemeler ve takviye edici kumaş hazır edildikten sonra, üretime başlamadan hemen önce Elium reçine ve sertleştiricisi karıştırılarak kompozit üretiminde kullanılacak matris karışımı hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.4). Polimerizasyon reaksiyonunun başlatılması için, hazırlanan karışımlara kütlece %2 oranında dibenzoil peroksit sertleştirici katılmıştır.



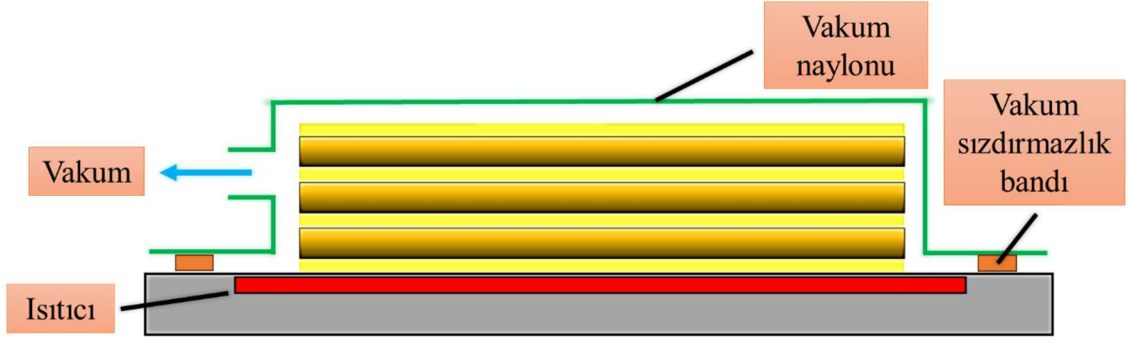
Şekil 3.4 Elüm reçine ve dibenzoil peroksit sertleştirici

Numune Üretimi

Kompozit numunelerin üretiminde el yatırması destekli vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.5 ve 3.6’da şematik olarak gösterilen bu yöntemde, reçinenin fiberler üzerinde homojen dağılımını sağlamak için el yatırması ve vakum infüzyon işlemleri sırayla uygulanmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında, ilk olarak hazırlanmış olan matris karışımı sırayla fiber tabakalarına bir rulo vasıtasıyla sürülmektedir. Karışım tüm tabakalara sürüldükten sonra ikinci işlem olan vakum infüzyon yöntemine geçilmektedir. Literatürde farklı adlar ile bulunabilen bu yöntem, birbirinden küçük farklılıklar ile ayrılrsa da temelde kuru fiber yığınının vakum etkisi altında sıvı reçine tarafından ıslatılması prensibine dayanmaktadır (Eskizeybek, 2012). Vakum infüzyon yöntemi maliyet ucuzluğu ve farklı büyüklüklerde kompozit üretimine imkân sağlaması sebebiyle tercih edilmektedir. Ayrıca, kompozit tabakaların içerdiği hava kabarcığı hatalarını en aza indirmekte ve üretimden kaynaklanan hurda oluşumunu azaltmaktadır.

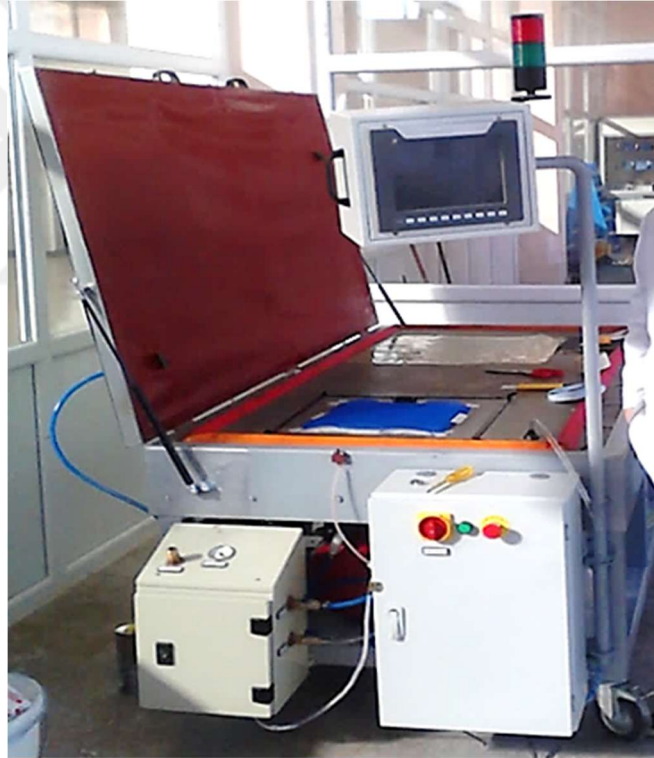


Şekil 3.5 El yatırması yöntemi



Şekil 3.6 Vakum infüzyon yöntemi

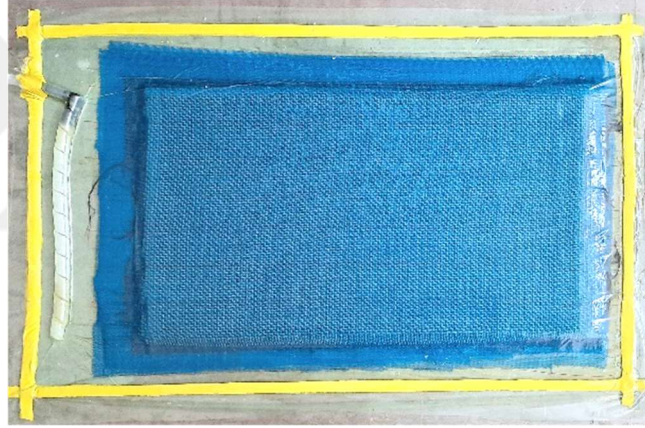
Kumaş, matris ve sarf malzemeleri hazır edildikten sonra numune üretimi aşamasına geçilmiştir. Üretim, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan ve Şekil 3.7'de gösterilen kompozit numune üretim düzeneği ile yapılmıştır.



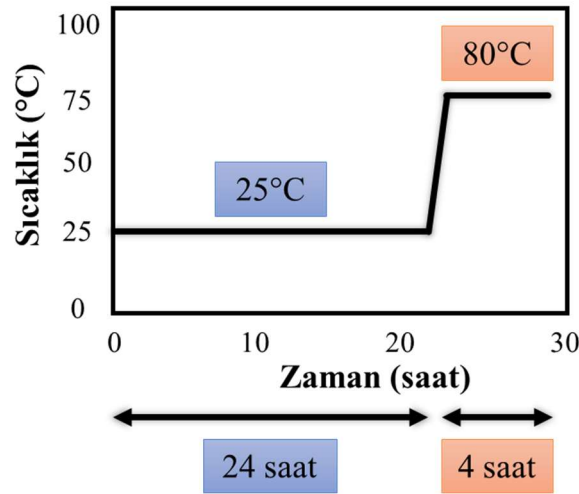
Şekil 3.7 Kompozit numune üretim düzeneği

Üretim gerçekleştirilirken, düzeneğin metal yüzeyine, üretilecek plakanın ölçülerine uygun boyutlarda kesilen vakum naylonu yerleştirilmiştir. Bu vakum naylonunun etrafına, Şekil 3.8'de sarı renk ile gözüken, vakum sızdırmazlık bandı yapıştırılmıştır. Yerleştirilen vakum naylonunun üzerine önce infüzyon filesi (Şekil 3.8'de mavi renk ile gözüken) sonra soyma kumaşı yerleştirilmiştir. Soyma kumaşının üzerine matris karışımı sürülmüştür ve ilk tabaka kumaş yerleştirilmiştir. Bunun üzerine

tekrar karışım sürülmüştür. İkinci tabaka kumaş koyulduktan sonra tekrar karışım sürülmüştür ve üretime tüm tabakalara aynı işlem yapılana kadar devam edilmiştir. Son tabaka kumaş koyulduktan sonra da üzerine karışım sürülmüştür. Bunun üzerine önce soyma kumaşı sonra infüzyon filesi yerleştirilmiştir. Bu aşamada, infüzyon vakum hortumu ve infüzyon spiral hortumu kullanılarak vakum pompası ile bağlantı kurulmuştur. Son olarak, en üste vakum naylonu yerleştirilmiştir ve vakum sızdırmazlık bandı ile yapıştırılmıştır. Fazla reçineyi plakadan uzaklaştırmak için vakit kaybetmeden vakum pompası çalıştırılmıştır. Yarım saat vakum yapıldıktan sonra, havanın vakuma alınmış bölgeye tekrar kaçmaması için infüzyon vakum hortumu sızdırmayacak şekilde sıkıca bağlanmıştır. Daha sonra vakum pompası kapatılmıştır. Plaka ön kürleme işlemi için 24 saat boyunca oda sıcaklığında (25°C) bu şekilde bekletilmiştir. Daha sonra, son kürleme işlemi için 4 saat 80°C’de kürleme yapılmıştır ve kompozit plaka üretimi tamamlanmıştır. Ön ve son kürleme işlemleri Şekil 3.9’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Numune üretiminin yapılması



Şekil 3.9 Ön (24 saat) ve son (4 saat) kürleme işlemleri

Çift ankastre kiriş testi için yapılan üretimde, diğer üretimlerden farklı olarak, üretim aşamasında ön çatlak oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla, bu plakaların üretimi esnasında, tabaka kumaşların yarısı koyulduktan sonra ön çatlak olması istenen kısımlara teflon film (Şekil 3.10’da kahverengi ile gözüken) yerleştirilmiştir. Bunun üzerine tekrar karışım sürülmüştür ve kumaş koyulmaya devam edilmiştir. Teflon filmin yerleştirilmesi dışındaki tüm işlemler diğer üretimler ile aynıdır.



Şekil 3.10 Çift ankastre kiriş testi için numune üretiminin yapılması

Üretimi tamamlanan plakalar ilgili standartlarda belirtilen numune boyutlarına göre kesilmiştir. Böylece, numuneler testlere hazır hale getirilmiştir.

3.3. Üretilen Kompozit Numunelerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretilen kompozit numunelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yoğunluk, fiber kütle oranı ve fiber hacim oranı hesaplamaları yapılmıştır. Bunlara ek olarak, su ortamında yaşlandırılan numunelerin su emme oranları da hesaplanmıştır. Fiziksel özelliklerin belirlendiği hesaplamalarda, çekme ve eğilme testi için üretilen numuneler kullanılmıştır. Her hesaplama için üç farklı numune ele alınmıştır.

3.3.1. Numune Yoğunluk Hesabı

Kompozit numunelerin yoğunluğu ASTM D3171 standartına uygun olarak, Denklem 3.1’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\rho_c = m / (A \times h \times 1000) \quad (3.1)$$

Burada;

ρ_c , g/cm³ cinsinden numune yoğunluğunu,

m , g cinsinden numune kütlesini,
 A , m^2 cinsinden numune alanını ve
 h , mm cinsinden numune kalınlığını göstermektedir.

Yoğunluk hesabı yapılırken, üç numune hassas terazide tartılmıştır ve kütleleri kaydedilmiştir. Daha sonra numunelerin kalınlık, genişlik ve uzunluk değerleri ölçülmüştür ve hesaba dahil edilmiştir.

3.3.2. Numune Fiber Kütle Oranı Hesabı

Kompozit numunelerin fiber kütle oranı ASTM D3171 standartına uygun olarak, Denklem 3.2’de gösterilen formül ile hesaplanmıştır.

$$W_r = (A_r \times N_p \times 0.1) / (\rho_c \times h) \quad (3.2)$$

Burada;

W_r , % fiber kütle oranını,

A_r , g/m^2 cinsinden bir takviye tabakasının alan kütlesini ve

N_p , numunedeki tabaka sayısını göstermektedir.

Kullanılan numunelerin tabaka sayısı 12 ve alan kütlesi $210 g/m^2$ ’dir.

3.3.3. Numune Fiber Hacim Oranı Hesabı

Kompozit numunelerin fiber hacim oranı ASTM D3171 standartına uygun olarak, Denklem 3.3’te gösterilen formül ile hesaplanmıştır.

$$V_r = (A_r \times N_p \times 0.1) / (\rho_r \times h) \quad (3.3)$$

Burada;

V_r , % fiber hacim oranını ve

ρ_r , g/cm^3 cinsinden takviye edicinin yoğunluğunu göstermektedir.

Kullanılan numunelerde takviye edicinin yoğunluğu $1.63 g/cm^3$ ’tür.

3.3.4. Numune Su Emme Oranı Hesabı

Kompozit numuneler, 10 gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra 6 ay boyunca oda sıcaklığında saf suda yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Kompozit numunelerin su emme oranı ASTM D5229 standartına uygun olarak, Denklem 3.4’te gösterilen formül ile hesaplanmıştır.

$$M = 100 \times (W_i - W_0) / W_0 \quad (3.4)$$

Burada;

M , % su emme oranını,

W_i , g cinsinden güncel numune kütlesini ve

W_0 , g cinsinden kuru numune kütlesini göstermektedir.

Su emme oranı hesaplamaları için üç adet numune saf su içine koyulmuştur. Su yaşlandırmasının ilk ayında numuneler 24 saatlik aralıklarla sudan çıkarılmış, yüzeyleri bir kâğıt havluyla kurutulmuş ve kütleleri ölçülmüştür. Kütle ölçümleri, ikinci ay boyunca haftada bir ve sonraki dört ay boyunca ayda bir olarak devam etmiştir.

Ayrıca, su emme oranları ve yaşlandırma süresi kullanılarak Fickian modeline uyan bir difüzyon eğrisi oluşturulmuştur. ASTM D5229 standardına göre difüzyon katsayısı Denklem 3.5'e göre hesaplanmıştır.

$$M_i = M_m \left\{ 1 - \exp \left[-7.3 \left(\frac{D_z t}{h^2} \right)^{0.75} \right] \right\} \quad (3.5)$$

Burada;

M_i , i 'inci noktada % su emme oranını,

M_m , denge durumundaki % su emme oranını,

D_z , m²/s cinsinden difüzyon katsayısını ve

t , s cinsinden zamanı göstermektedir.

3.4. Üretilen Kompozit Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretilen aramid/karbon fiber takviyeli Elium kompozit numunelere çekme, eğilme ve kırılma testleri uygulanmıştır. Her test en az üç kez başarılı bir şekilde tekrar edildikten sonra elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Tez çalışması kapsamındaki tüm mekanik testlerin gerçekleştirilmesinde hem statik hem de dinamik çalışabilme özelliğine sahip Instron 8801 test cihazı (Şekil 3.11) kullanılmıştır.

Kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının araştırılmasında çekme ve eğilme testleri yaygın olarak birlikte uygulanmaktadır. Çekme testleri, malzemenin tek eksenli gerilme altındaki temel özelliklerini belirlerken, eğilme testleri çekme ve basma gerilmelerine aynı anda maruz kalan elemanların performansını dikkate almaktadır. Kompozitlerin anizotropik yapısı ve farklı yükleme tipleri altında farklılaşan hasar

mekanizmaları göz önüne alındığında, bu iki testin uygulanması malzemenin bütünsel olarak mekanik özelliklerini değerlendirme imkanı sağlar.



Şekil 3.11 Instron 8801 test cihazı

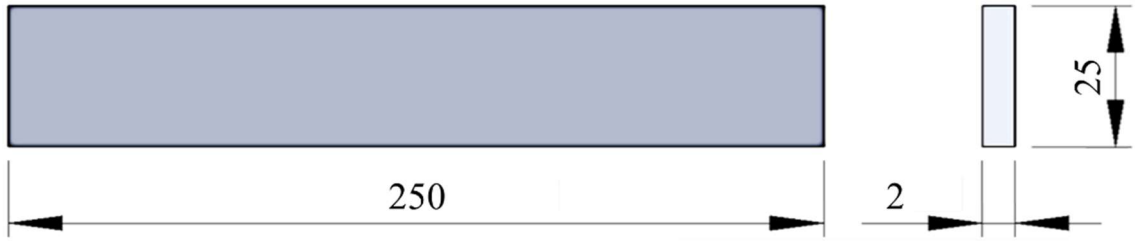
3.4.1. Çekme Testi

Bu çalışmada üretilen kompozitlerin çekme yüklemesi altındaki davranışları, ASTM D3039 standardına uygun olarak incelenmiştir.

Çekme Test Numunelerinin Hazırlanması

İlgili standartta numunelerin olması gereken ölçüler Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Buna uygun olarak, bu çalışmada hazırlanan çekme numune uzunlukları 250 mm ve genişlikleri 25 mm’dir. Numune kalınlıkları ise 2.1 - 2.2 mm aralığındadır. Şekil 3.13’te

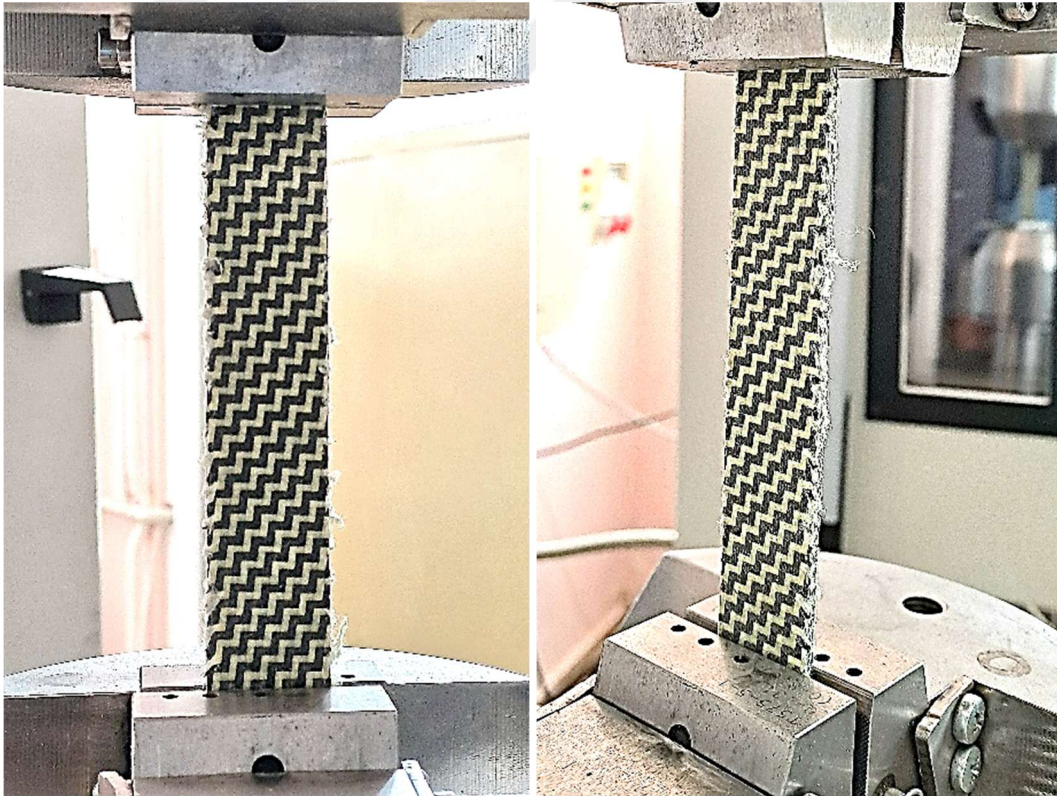
örnek çekme numune görselleri verilmiştir. Şekil 3.14'te ise çekme yüklemesine maruz bırakılmış örnek numune gösterilmiştir.



Şekil 3.12 ASTM D3039'a göre çekme numune ölçüleri



Şekil 3.13 Çekme numunesi örnekleri



Şekil 3.14 Çekme yüklemesine maruz bırakılmış numune

Çekme Testlerinin Yapılması ve Sonuçların Hesaplanması

Çekme testlerinde, her numuneye uygulanan kuvvet ve yer değiştirme değerleri anlık olarak kaydedilmiştir. Bu değerler kullanılarak, çekme mukavemeti aşağıda verilen denklemler ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_i = P_i / A \quad (3.6)$$

$$\sigma_{maks} = P_{maks} / A \quad (3.7)$$

Burada;

σ_i , MPa cinsinden i 'inci noktada oluşan gerilmeyi,

P_i , N cinsinden i 'inci noktada uygulanan kuvveti,

σ_{maks} , MPa cinsinden numunede oluşan en yüksek gerilmeyi,

P_{maks} , N cinsinden numunenin taşıyabildiği en yüksek kuvveti ve

A , mm² cinsinden ortalama kesit alanını göstermektedir.

Ayrıca, numunede oluşan birim şekil değiştirme Denklem 3.8 ve çekmede elastiklik modülü Denklem 3.9 ile hesaplanmıştır:

$$\varepsilon_i = \delta_i / L \quad (3.8)$$

$$E_{\zeta} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \quad (3.9)$$

Burada;

ε_i , mm/mm cinsinden i 'inci noktada oluşan birim şekil değiştirmeyi,

δ_i , mm cinsinden i 'inci noktadaki yer değiştirmeyi,

L , mm cinsinden numune gage uzunluğunu,

E_{ζ} , MPa cinsinden çekmede elastiklik modülünü,

$\Delta\sigma$, MPa cinsinden seçilen iki nokta arasındaki gerilme farkını ve

$\Delta\varepsilon$, mm/mm cinsinden seçilen iki nokta arasındaki birim şekil değiştirme farkını göstermektedir. $\Delta\varepsilon$ değeri 0.002 mm/mm alınırken, $\Delta\sigma$, 0.002 mm/mm birim şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerilme değerine göre hesaba katılmıştır.

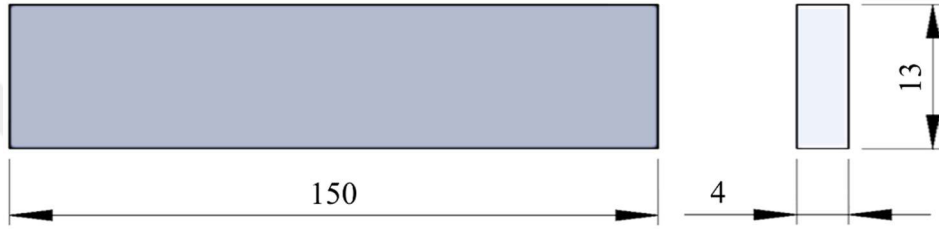
Ayrıca, test sonucunda oluşturulan gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin altında kalan hesaplanarak çekmede tokluk değerleri ele alınmıştır.

3.4.2. Üç Nokta Eğilme Testi

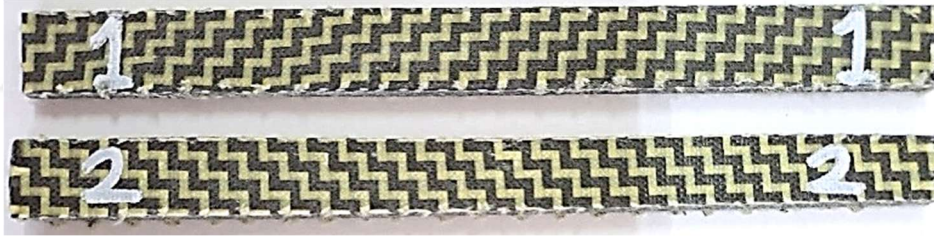
Bu çalışmada üretilen kompozitlerin eğilme yüklemesi altındaki davranışları, ASTM D7264 standardına uygun olarak incelenmiştir.

Eğilme Test Numunelerinin Hazırlanması

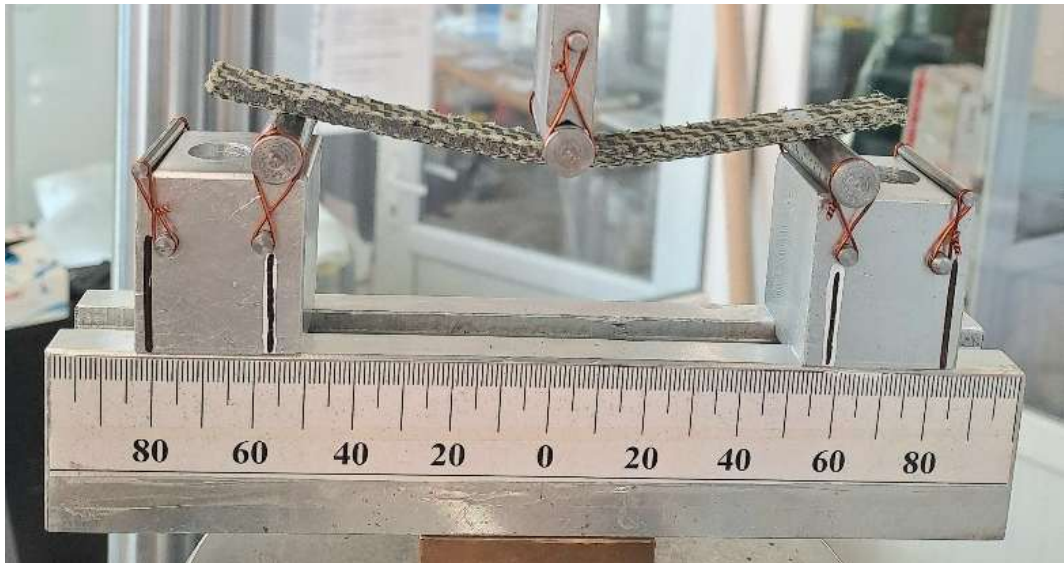
İlgili standartta numunelerin olması gereken ölçüler Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Buna uygun olarak, bu çalışmada hazırlanan eğilme numune uzunlukları 150 mm ve genişlikleri 13 mm'dir. Numune kalınlıkları ise 3.5 - 3.6 mm aralığındadır. Şekil 3.16'da örnek eğilme numune görselleri verilmiştir. Şekil 3.17'de ise eğilme yüklemesine maruz bırakılmış örnek numune gösterilmiştir.



Şekil 3.15 ASTM D7264'e göre eğilme numune ölçüleri



Şekil 3.16 Eğilme numunesi örnekleri



Şekil 3.17 Eğilme yüklemesine maruz bırakılmış numune

Eğilme Testlerinin Yapılması ve Sonuçların Hesaplanması

Eğilme testlerinde mesnetler arası mesafe ile numune kalınlığı oranı 32:1 olarak alınmıştır. Buna uygun olarak mesnetler arası mesafe 115 mm'ye ayarlanmıştır. Ayrıca, numune uzunluğu mesnetler arası mesafeden %30 daha uzundur.

Eğilme testlerinde, her numuneye uygulanan kuvvet ve yer değiştirme değerleri anlık olarak kaydedilmiştir. Bu değerler kullanılarak, eğilme mukavemeti aşağıda verilen denklem ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_{maks} = (3 P_{maks} L) / (2 b h^2) \quad (3.10)$$

Burada;

σ_{maks} , MPa cinsinden numunenin orta noktasında ve dış yüzeyde oluşan en yüksek gerilmeyi,

P_{maks} , N cinsinden numunenin taşıyabildiği en yüksek kuvveti,

L , mm cinsinden mesnetler arası açıklığı,

b , mm cinsinden numune genişliğini ve

h , mm cinsinden numune kalınlığını göstermektedir.

Ayrıca, numunede oluşan birim şekil değiştirme Denklem 3.11 ve eğilmede elastiklik modülü Denklem 3.12 ile hesaplanmıştır:

$$\varepsilon = (6 \delta h) / L^2 \quad (3.11)$$

$$E_e = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \quad (3.12)$$

Burada;

ε , mm/mm cinsinden dış yüzeyde oluşan en yüksek birim şekil değiştirmeyi,

δ , mm cinsinden orta noktadaki yer değiştirmeyi,

E_e , MPa cinsinden eğilmede elastiklik modülünü,

$\Delta\sigma$, MPa cinsinden seçilen iki nokta arasındaki gerilme farkını ve

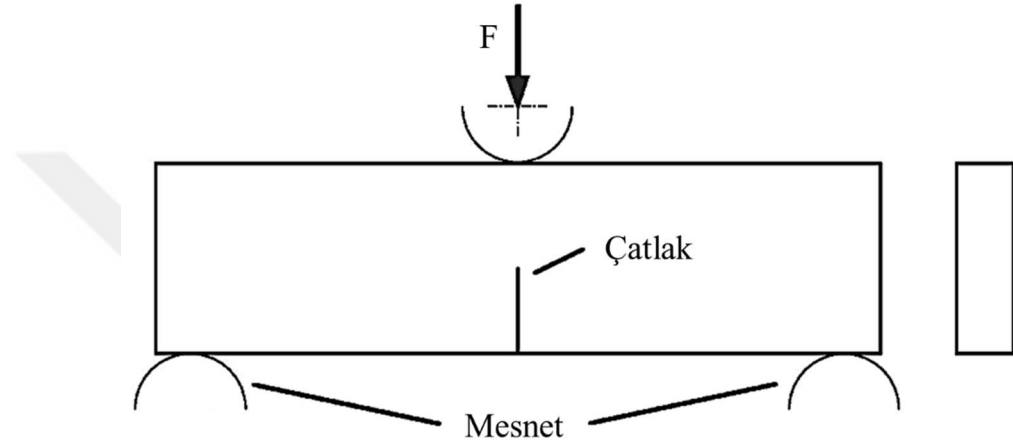
$\Delta\varepsilon$, seçilen iki nokta arasındaki birim şekil değiştirme farkını göstermektedir.

$\Delta\varepsilon$ değeri 0.002 mm/mm alınırken, $\Delta\sigma$, 0.002 mm/mm birim şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerilme değerine göre hesaba katılmıştır.

3.4.3. Kırılma Testleri

3.4.3.1. Tek Taraflı Çentikli Eğilme (SENB) Testi

SENB numunesi ile üç nokta eğilme testi yapmak kırılma tokluğunu inceleme yöntemlerinden birisidir. Üç nokta eğilme testinde, Şekil 3.18’de gösterilen numunenin bir kenarına çatlak açılır ve bu kenar test düzeneğinde iki mesnet üzerine yerleştirilir. Sonra, çentiğin karşı tarafından numuneye kuvvet uygulanır. Numunenin hasar alması sağlandıktan sonra test bitmiş olur. Son olarak, kuvvet-yer değiştirme grafiği oluşturulur ve hesaplama aşamasına geçilir.

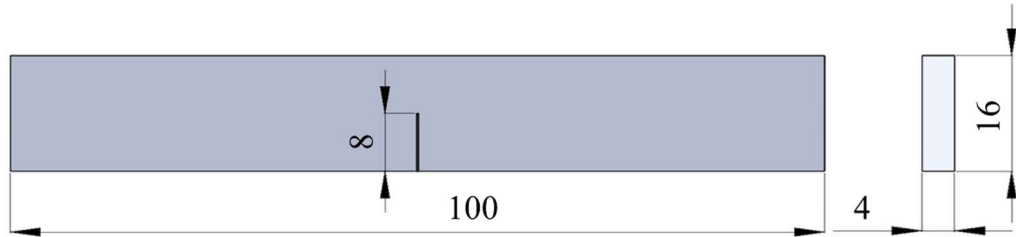


Şekil 3.18 SENB testi şematik gösterimi (Ayatollahi ve ark., 2019)

SENB Test Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada üretilen tek taraflı çentikli kompozitlerin eğilme yüklemesi altındaki davranışları, ASTM D5045 standardına uygun olarak incelenmiştir.

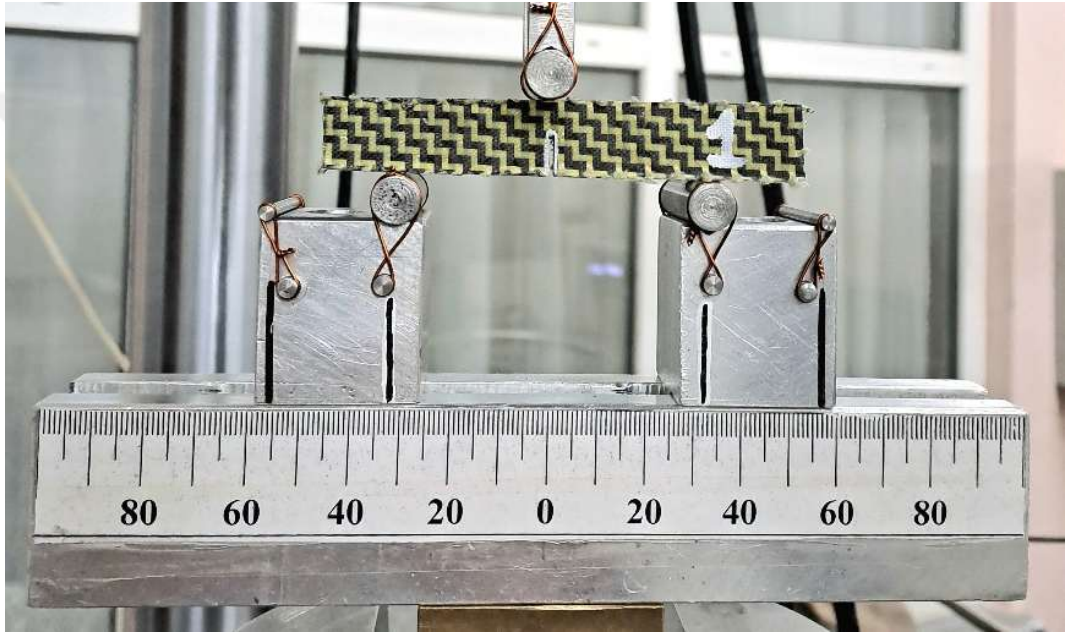
İlgili standartta numunelerin olması gereken ölçüler Şekil 3.19’da gösterilmiştir. Buna uygun olarak, bu çalışmada hazırlanan SENB numune uzunlukları 100 mm ve genişlikleri 16 mm’dir. Numune kalınlıkları ise 3.5 - 3.6 mm aralığındadır. Şekil 3.20’de örnek SENB numune görselleri verilmiştir. Şekil 3.21’de ise SENB yüklemesine maruz bırakılmış örnek numune gösterilmiştir.



Şekil 3.19 ASTM D5045’e göre SENB numune ölçüleri



Şekil 3.20 SENB numunesi örnekleri



Şekil 3.21 SENB yüklemesine maruz bırakılmış numune

SENB Testlerinin Yapılması

SENB testleri yapılırken aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

1. Numunenin kalınlığı, genişliği ve çatlakın ilk uzunluğu ölçülmüştür.
2. Mesnetler arası mesafe (S) 64 mm olacak şekilde ayarlanmıştır.
3. Numune üzerindeki çatlak, mesnetlerin tam ortasında ve yüklemenin merkezinde olacak şekilde, numune test aparatına yerleştirilmiştir.
4. 10 mm/dk hız ile yüklemeye başlanmıştır.
5. Yükleme 1 dakika süre sonunda durdurulmuştur.
6. Numune test başlangıcındaki konumuna geri getirilmiştir.
7. Test süresince uygulanan kuvvet ve oluşan yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir.

SENB Testleri Sonucunda Kırılma Tokluğu Hesabı

SENB testi sonucunda kırılma tokluğu hesaplamaları için öncelikle testin uygun olarak yapılıp yapılmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla iki aşamalı uygunluk kontrolü yapılmalıdır. İlk olarak, Denklem 3.13'te verilen birinci uygunluk kriteri sağlanmalıdır:

$$h, a, (b - a) > 2.5 (K_Q / \sigma_y)^2 \quad (3.13)$$

Burada;

h , mm cinsinden numune kalınlığını,

a , mm cinsinden çatlak uzunluğunu,

b , mm cinsinden numune genişliğini,

K_Q , $MPa\sqrt{m}$ cinsinden kırılma tokluğunu ve

σ_y , MPa cinsinden akma mukavemetini göstermektedir.

Eğer birinci uygunluk kriteri sağlanıyorsa hesaplamalara devam edilir. K_Q 'nun hesaplanması için ilgili standartta aşağıdaki formül verilmiştir:

$$K_Q = f(x) \times P_Q / (h b^{0.5}) \quad (3.14)$$

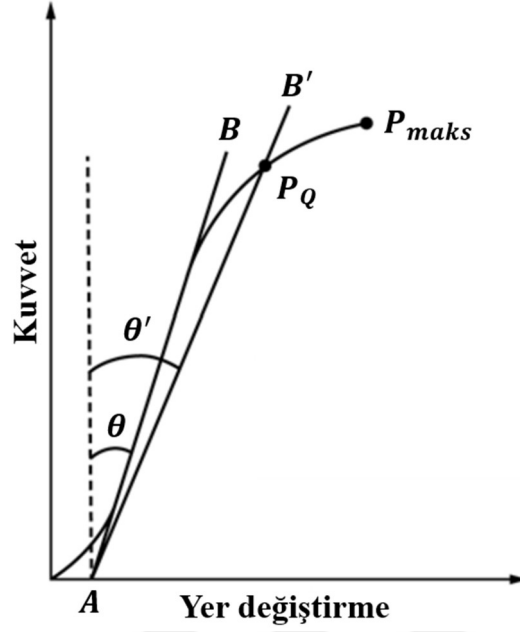
$f(x)$, kalibrasyon faktörünü ve

P_Q , N cinsinden %5 artırılmış eğim ile elde edilen kuvveti göstermektedir.

P_Q , kuvvet-yer değiştirme grafiğinin doğrusal olan kısmının $(A - B)$ çizilmesinden sonra, bu doğru ile dikey eksen olan kuvvet eksenindeki açının %5 büyütülmesi (θ') sonucunda yeni bir doğru $(A - B')$ çizilmesi durumunda, yeni çizilen doğrunun kuvvet-yer değiştirme grafiğini kestiği yeni noktada okunan kuvvet değeridir. P_Q 'nun bulunması Şekil 3.22'de gösterilmiştir.

$f(x)$ değeri ise, ilgili standartta S/b oranının 4 olması durumu için ve $(x = a / b)$ olmak üzere aşağıda verilen Denklem 3.15 ile hesaplanmıştır.

$$f(x) = 6 x^{0.5} \left(\frac{1.99 - x(1 - x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)}{(1 + 2x)(1 - x)^{1.5}} \right) \quad (3.15)$$



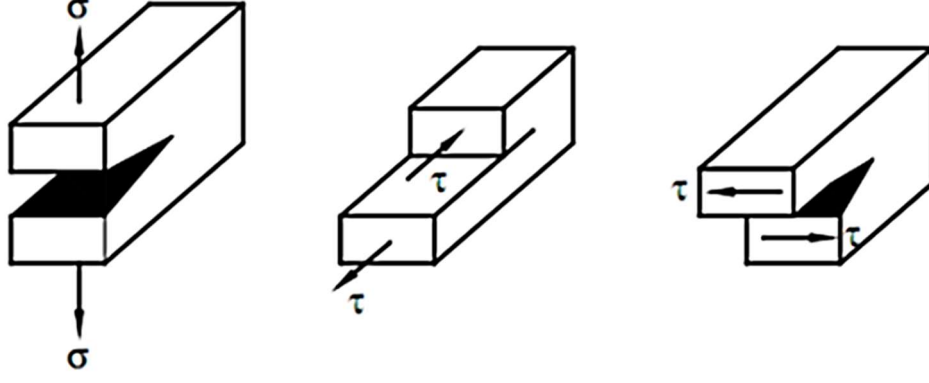
şekil 3.22 P_Q 'nun bulunması

P_Q bulunduktan sonra, kuvvet-yer değiştirme grafiğinin en yksek kuvvet değeri olan P_{max} tespit edilir.

Bu aşamada, ikinci uygunluk kriterinin kontrol edilmesi gereklidir. $P_{max}/P_Q > 1.1$ oluyorsa yapılan testin uygun olmadığı anlamına gelir ve test geğersiz sayılır. Test geğersiz ise yeni bir numune ile testin tekrarlanması gerekir. Eğer, $P_{max}/P_Q < 1.1$ sağlanıyorsa bulunan P_Q uygundur ve K_Q 'nun hesaplanmasında kullanılabilir. K_Q hesaplandıktan sonra Denklem 3.13 'te verilen kriterin uygunluğu tekrar kontrol edilir. Eğer her iki kriter de sağlanıyorsa testin uygun olduğuna karar verilir ve bulunan K_Q değeri, K_{Ic} kırılma tokluğu değeri olarak alınır.

3.4.3.2. Çift Ankastre Kiriş (DCB) Testi

Tabakalı kompozit malzemenin maruz kaldığı ykleme türüne göre açılma modu (Mod-I), kayma modu (Mod-II), yırtılma modu (Mod-III) veya bu kırılma modlarının bileşkeleri delaminasyon çatlağının gelişimine neden olabilir (şekil 3.23). Malzemenin, tabakalar arası çatlağın başlamasına karşı göstermiş olduğu direnç ise bir malzeme özelliği olarak kabul edilir (Darıcık ve elebi, 2017). Literatürde, kırılma için gereken enerjiye dayalı tokluk parametresi olan şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı olarak da değerlendirilen bu değer, bu çalışmada tabakalar arası kırılma tokluğu olarak adlandırılmıştır ve G_{Ic} ile gösterilmiştir.

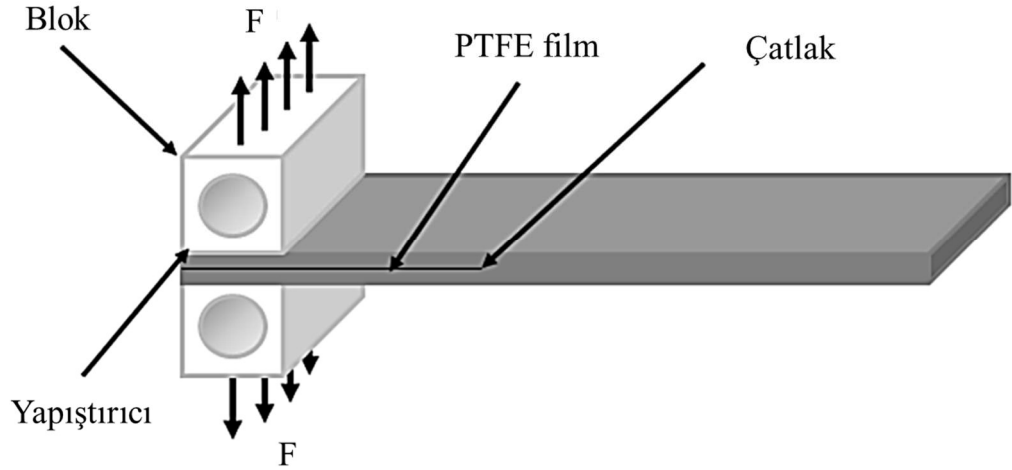


Mod-I (açılma modu) Mod-II (kayma modu) Mod-III (yırtılma modu)

Şekil 3.23 Tabakalar arası kırılma modları (Borazan, 2019)

Tabakalar arası açılma hasarı (delaminasyon) tabakalı kompozit malzemelerin servis ömürlerini kısıtlayan en önemli hasar türüdür. Delaminasyon hasarının oluşumu ve malzemenin bu hasar ile kırılması, malzemeye etkiyen yüklere göre farklı biçimlerde gelişebilir.

Açılma modu tabakalar arası kırılmanın en kolay gerçekleştiği ve kırılma tokluğunun en düşük olduğu kırılma modudur. DCB testi Mod-I kırılma tokluğunu ölçmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Mod-I yüklemesi altında tabakalar arası açılma testleri Şekil 3.24'te şematik olarak gösterilen DCB numunesi ile yapılır.

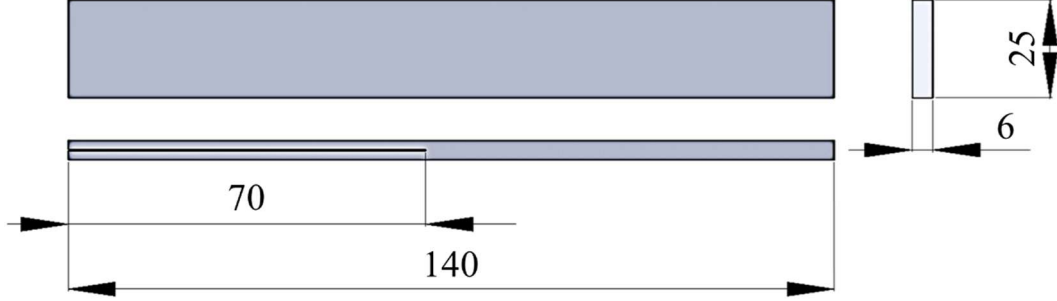


Şekil 3.24 DCB test numunesinin şematik gösterimi (Bican, 2019)

DCB Test Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada üretilen kompozitlerin Mod-I kırılma davranışları, ASTM D5528 standardına uygun olarak incelenmiştir.

İlgili standartta numunelerin olması gereken ölçüler Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Buna uygun olarak, bu çalışmada hazırlanan çekme numune uzunlukları 140 mm ve genişlikleri 25 mm'dir. Numune kalınlıkları ise 5.8 – 6.0 mm aralığındadır.



Şekil 3.25 ASTM D5528'e göre DCB numune ölçüleri

Şekil 3.26'da örnek DCB numune görselleri verilmiştir. Plakadan kesilen numunelerin ön çatlak oluşturulmuş tarafına, çatlak ilerlemesinin yapılması için menteşe yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi yapmadan önce her iki yüzeyde kalın zımpara ile pürüzlendirilmiştir. Sonra sıvı epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır.



Şekil 3.26 DCB numunesi örnekleri

Yapılan ön deneme çalışmalarında, çatlak ilerlemesinin oluşturulması esnasında sorunlar ile karşılaşmıştır. Şekil 3.27'de gösterildiği gibi yüklemeye başladıktan bir süre sonra DCB numunesinin bir tarafından kırılmalar meydana gelmiştir. Bu kırılmanın önlenmesi ve DCB testlerinin başarılı bir şekilde yürütülmesi amacıyla incelemeler

yapılmıştır. Benzer sorunun yaşandığı çalışmalarda, numune yüzeyini daha dayanıklı hale getirmek amacıyla metal bir plaka yapıştırılmıştır ve çözüm sağlanmıştır (Bhudolia ve ark., 2022; Shonar ve Chalivendra, 2023). Buna istinaden, bu tez kapsamında numunelerin yüzeyine metal plaka yapıştırılmıştır ve testler bu şekilde yürütülmüştür.

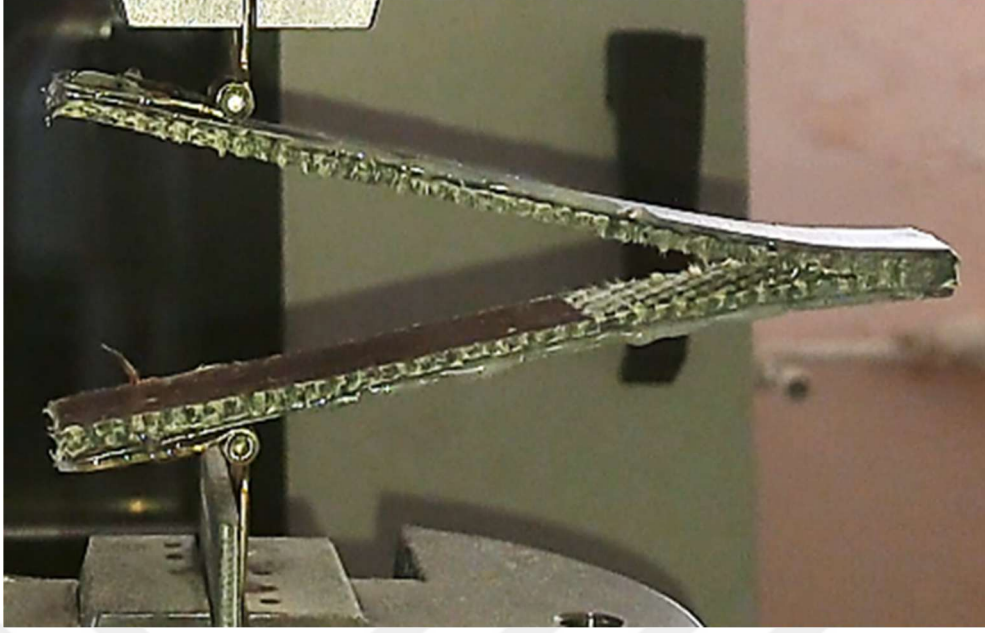


Şekil 3.27 Başarısız DCB test deneme örneği

Şekil 3.28’de yüzeyine metal plaka yapıştırılmış DCB numunesi gösterilmiştir. Revize edilmiş numuneler ile testler başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.29’da DCB yüklemesine maruz bırakılmış örnek numune gösterilmiştir.



Şekil 3.28 Revize edilmiş DCB numunesi



Şekil 3.29 DCB yüklemesine maruz bırakılmış numune

DCB Testlerinin Yapılması

DCB testleri yapılırken aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

1. Numunenin kalınlığı ve genişliği ölçülmüştür.
2. Tipik olarak 50 mm olması gereken a_0 mesafesi ölçülmüştür.
3. Çatlak ilerlemesinin takip edilmesi için ilgili kısma kâğıt yapıştırılmıştır. Kâğıt, her 1 mm'lik kısım ince dikey çizgilerle ve her 10 mm'lik kısım kalın dikey çizgilerle işaretlenerek hazırlanmıştır.
4. Kamera düzeneği çatlak ilerlemesini görecektir şekilde ayarlanmıştır ve video kaydı başlatılmıştır.
5. 2 mm/dk hız ile ilk yükleme yapılmaya başlanmıştır.
6. Çatlak ilerlemesi 30 mm'ye ulaşınca yükleme durdurulmuştur.
7. Numunenin her iki kenarında delaminasyon uçlarının konumları işaretlenmiştir.
8. 25 mm/dk hız ile yük boşaltılmıştır ve numune test başlangıcındaki konumuna geri getirilmiştir.
9. Test süresince uygulanan kuvvet ve oluşan yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir.
10. Video kaydı sonlandırılmıştır.
11. Video kaydı detaylı bir şekilde izlenerek, yükleme sırasında oluşan çatlak uzunluğu ve bu andaki kuvvet ile yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir.

Modifiye Edilmiş Kiriş Teoremi ile Mod-I Kırılma Tokluğu Hesabı

Modifiye edilmiş kiriş teoremine göre DCB testi sonucunda kırılma tokluğu Denklem 3.16'daki gibi ele alınmaktadır.

$$G_{Ic} = (3 P \delta) / (2 b a) \quad (3.16)$$

Burada;

G_{Ic} , J/m^2 cinsinden Mod-I tabakalar arası kırılma tokluğunu,

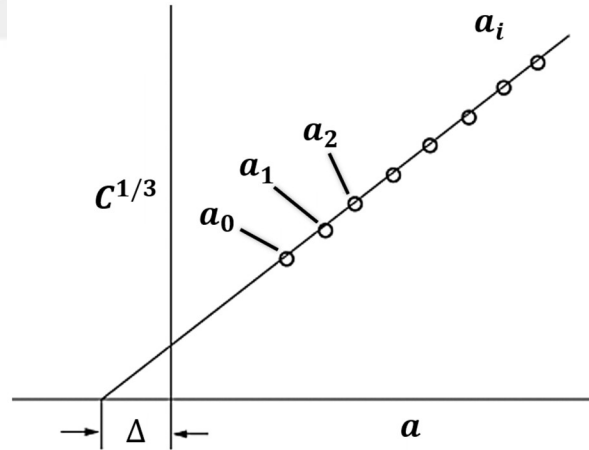
P , N cinsinden numuneye uygulanan kuvveti,

δ , mm cinsinden yük noktası yer değiştirmesini,

b , mm cinsinden numune genişliğini ve

a , mm cinsinden çatlak uzunluğunu göstermektedir.

İlgili standartta, delaminasyon bölgesinde rotasyon meydana gelme ihtimali olduğu için, Denklem 3.16 ile hesaplanan kırılma tokluğu değerlerinin olması gerekenden yüksek tahmin edileceği belirtilmiştir. Bu rotasyonu düzeltmenin yolu, çatlak uzunluğunu biraz daha uzun bir delaminasyon içeriyormuş gibi ele almaktır. Bu amaçla, normalize edilmiş çatlak uzunluğu, $|\Delta| + a$ hesaplanmaktadır.



Şekil 3.30 Normalize edilmiş çatlak uzunluğunun bulunması

Şekil 3.30'da gösterilen C , kompiyans anlamındadır ve yük noktası yer değiştirmesi δ 'nın uygulanan kuvvet P 'ye oranıdır ($C = \delta / P$). Bu şekle göre, $a + |\Delta|$ deneysel olarak kompiyans C ve çatlak uzunluğu a arasındaki ilişkiden bulunur. Sonuç olarak, Mod-I kırılma tokluğu değeri Denklem 3.17'deki gibi elde edilir.

$$G_{Ic} = (3 P \delta) / (2 b (|\Delta| + a)) \quad (3.17)$$

3.5. Hasar Bölgelerinin İncelenmesi

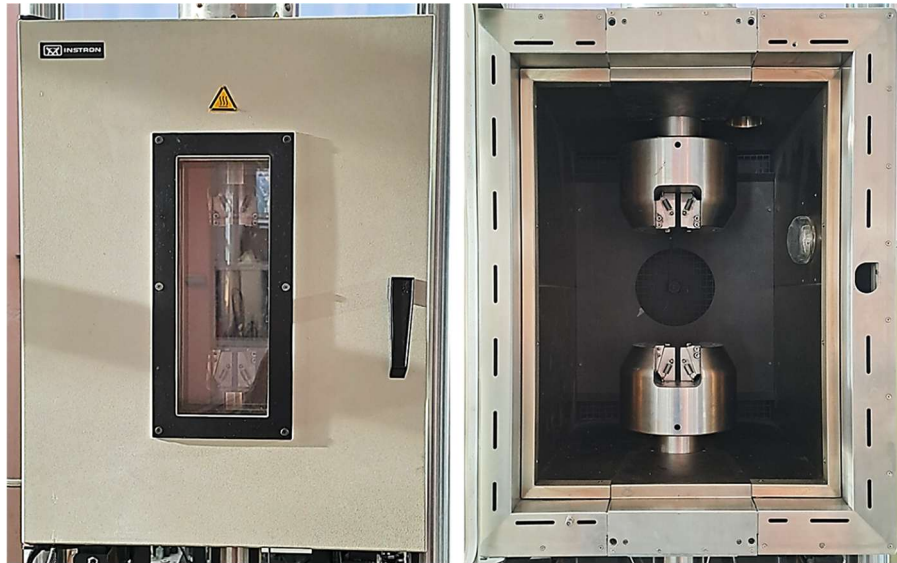
Hasar bölgelerinin detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla, makro ve mikro düzeyde görüntüleme yapılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle makro düzeyde görüntüler elde edilerek hasarın genel dağılımı ve yüzeydeki deformasyonlar değerlendirilmiştir. Ardından, daha yüksek büyütme oranlarıyla gerçekleştirilen taramalı elektron mikroskobu analizleri ile malzemenin iç yapısında meydana gelen değişimler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu yüksek çözünürlüklü SEM (Scanning Electron Microscope - Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri, malzemenin maruz kaldığı mekanik ve çevresel etkilerin neden olduğu mikroyapısal değişimleri anlamada önemli bir rol oynamaktadır.

3.6. Üretilen Kompozit Numunelere Uygulanan Ortam Şartları

Malzemelerin gerçek kullanım koşullarındaki davranışlarını belirlemek için laboratuvar ortamında kullanım şartlarının oluşturulması gereklidir. Bu amaçla, üretilen aramid/karbon fiber takviyeli Elium kompozit numuneler farklı sıcaklıklarda test edilmiş ve saf su yaşlandırmasına bırakılmıştır.

3.6.1. Farklı Sıcaklıklardaki Testlerin Yapılması

Kompozit numunelerin farklı sıcaklıklardaki özelliklerinin belirlenmesinde Şekil 3.31’de gösterilen Instron 8801 test cihazının fırını kullanılmıştır. Sıcaklık değişimi sonucundaki davranışın incelenmesi için -50, -25, 0, +25 ve +50°C olmak üzere beş farklı sıcaklıkta mekanik testler uygulanmıştır. Tablo 3.2’de ise, uygulanan test grupları ve farklı sıcaklar özet olarak sunulmuştur.



Şekil 3.31 Farklı sıcaklıklarda testlerin yapıldığı fırın

Tablo 3.2. Test grupları ve test sıcaklığı şartları

Test grubu	Test sıcaklığı (°C)
I	-50
II	-25
III	0
IV	+25
V	+50

3.6.2. Saf Su Yaşlandırması

Kompozit numunelerin su ortamında bekletilmesi sonucunda mekanik özelliklerinin değişimini incelemek için numuneler saf su içerisine koyulmuştur. Kuru (suda yaşlandırılmamış) numunelere çekme, eğilme ve kırılma testleri uygulanmıştır.

**Şekil 3.32** Saf su yaşlandırma görseli

Kuru numuneler test edildikten sonra, aynı testler 2, 4 ve 6 ay boyunca suda yaşlandırılan numunelere de uygulanmıştır. Şekil 3.32’de saf su içerisinde yaşlandırmaya bırakılmış numuneler gösterilmiştir. Tablo 3.2’de ise, uygulanan test grupları ve yaşlandırma şartları özet olarak sunulmuştur.

Tablo 3.3. Test grupları ve yaşlandırma şartları

Test grubu	Ortam şartları	Bekleme süresi (ay)
I	Normal ortam	0
II	Saf su ortamı	2
III	Saf su ortamı	4
IV	Saf su ortamı	6

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde aramid/karbon katman içi hibrit kumaştan üretilmiş kompozitler ile ilgili sonuçlar sunulmuştur. İlk olarak numunelerin fiziksel özellikleri ele alınmıştır. Sonra, kompozit numunelere uygulanan ortam şartları sonucunda elde edilen mekanik özellikler detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Aynı zamanda hasar bölgelerinin makro ve mikro görüntüleri alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

4.1. Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Kompozit numunelerin fiziksel özellikleri ilgili standartlarda belirtildiği üzere hesaplanmıştır. Üç farklı numune için hesaplanan ve ortalaması alınan yoğunluk, fiber kütle oranı ve fiber hacim oranı değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Buna göre, yoğunluk 1.39 g/cm^3 , fiber kütle oranı %55.82 ve fiber hacim oranı %47.62 olarak bulunmuştur.

Tablo 4.1. Numunelerin fiziksel özellikleri

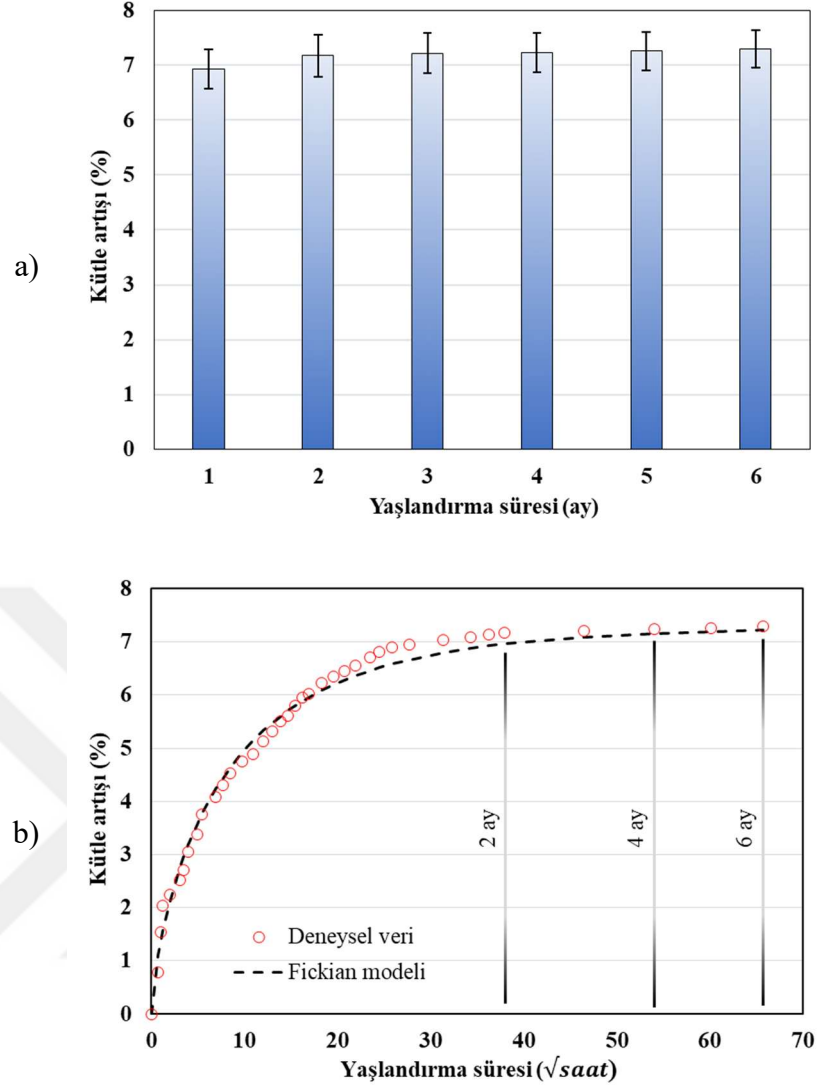
Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	1.39 ± 0.02
Fiber kütle oranı (%)	55.82 ± 0.65
Fiber hacim oranı (%)	47.62 ± 0.36

4.1.1. Numunelerin Su Emme Oranları

Kompozit numuneler 6 ay boyunca saf suda yaşlandırılmış ve belirli periyotlarla kütleleri ölçülmüştür. Her bir ölçüm, üç farklı numuneye yapılmış ve bir önceki tartıma göre farkları kaydedilmiştir. Elde edilen su emme sonuçları yaşlandırma süresine göre Tablo 4.2 ve Şekil 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Yaşlandırma süresine göre kütle artışı değerleri

Yaşlandırma süresi (Ay)	Kütle Artışı (%)
1	6.93 ± 0.35
2	7.17 ± 0.38
3	7.22 ± 0.36
4	7.23 ± 0.36
5	7.26 ± 0.35
6	7.29 ± 0.34



Şekil 4.1 a) Yaşlandırma süresine göre kütle artışı değişimi

b) Yaşlandırma süresinin kareköküne göre kütle artışının Fickian modeli ile uyumu

Yaşlandırmanın birinci ayı sonunda %6.93 kütle artışı olmuştur. Yaşlandırmanın ikinci ayında ise kütle artış hızı önemli ölçüde azalmıştır. İkinci ayın sonunda numuneler doygunluk durumuna yaklaşmıştır ve kütle artışı %7.17 olmuştur. İlerleyen aylarda kütle artışı oldukça az değişmiştir. Altıncı ayın sonunda kütle artışı %7.29 değerine ulaşmıştır. Bu da aramid/karbon Elium kompozitin iki ayda doygun noktasına ulaştığını göstermiştir. Karbon fiberin su moleküllerine karşı daha hidrofobik olması nedeniyle su emmenin büyük oranda aramid fiberden kaynaklandığı düşünülmüştür.

Şekil 4.1-b'ye göre, deneysel veriler ile Fickian modeli değerleri arasında benzer bir davranış görülmektedir ve su emme davranışı Fickian difüzyon modeline uymaktadır. Ayrıca, altıncı ayın sonunda elde edilen %7.29 maksimum kütle artışı ile hesaplanan difüzyon katsayısı $1.03 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur.

4.2. Numunelerin Mekanik Özellikleri

Kompozit numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ilk olarak numunelere farklı sıcaklıklarda çekme, üç nokta eğilme, SENB ve DCB testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak ise numuneler 6 ay boyunca saf suda yaşlandırılmış ve aynı testler yapılmıştır. Uygulanan ortam şartlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisi detaylı olarak ele alınmıştır.

SENB testlerinde, Denklem 3.13'te verilen birinci uygunluk kriteri için ön değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirmede, eşitliğin sol tarafı için $h = 3.5 \text{ mm}$, $a = 8 \text{ mm}$ ve $(b - a) = 8 \text{ mm}$ alınmıştır. Eşitliğin sağ tarafı için, literatürde yer alan sonuçlar göz önüne alınarak tahmini K_Q değerinin $100 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ile $200 \text{ MPa}\sqrt{m}$ aralığında olacağı düşünülmüştür. σ_y ise hem farklı sıcaklıklarda hem de su yaşlandırma sonrasında elde edilen çekme mukavemeti değerleridir ve uygunluk kriterinin hesaplanmasında ilgili değerler kullanılmıştır. Eşitliğin sol tarafının daha büyük olması istendiği için eşitliğin sağ tarafının en büyük değerini bulunmuştur. Bunun için, tahmini K_Q 'nin en büyük değeri $200 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ve σ_y 'nin en küçük değeri 467.02 MPa ($+50^\circ\text{C}$ 'de test sıcaklığındaki çekme mukavemeti) değerleri kullanılmıştır. Hesaplama sonucunda eşitliğin sağ tarafı 0.4585 olarak bulunmuştur ve her üç uzunluk değerinden de küçük olduğu tespit edilmiştir. Bu değer ile uygunluk kriterinin sağlandığını Denklem 4.1'de gösterilmiştir. Bu denklem, aynı zamanda diğer tüm durumlar için de uygunluk kriterinin sağlandığını göstermektedir.

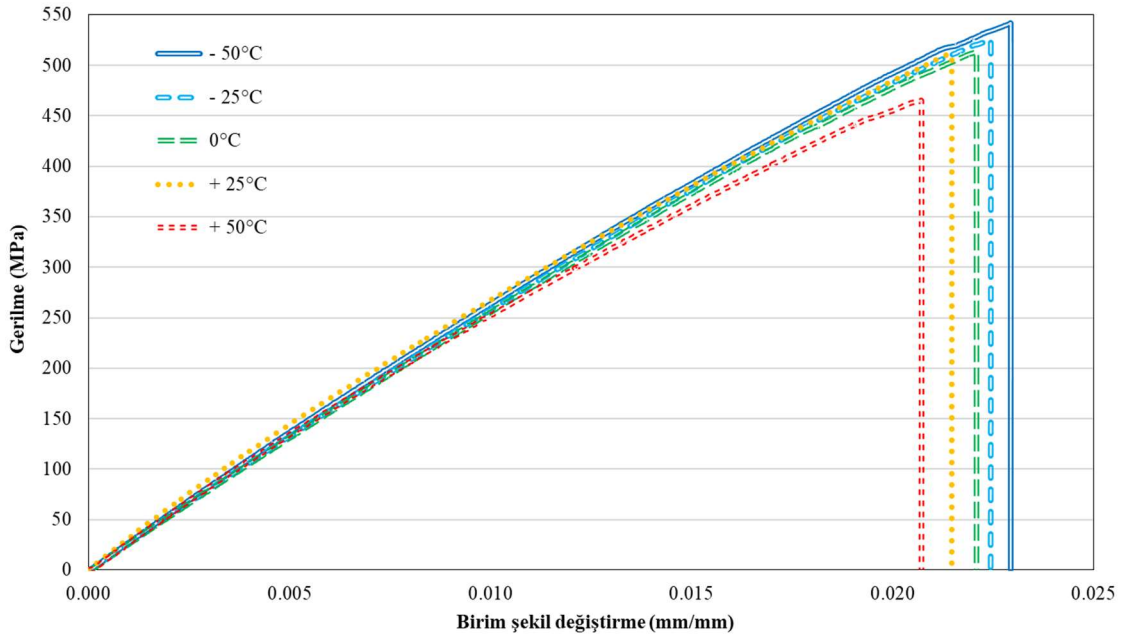
$$3.5, 8, 8 > 2.5 \times (200 / 467.02)^2 \quad (4.1)$$

4.2.1. Numunelere Uygulanan Farklı Sıcaklıkların Etkisi

Numunelerin sıcaklık değişimleri ile mekanik davranışlarını anlamak için 5 farklı sıcaklıkta (-50 , -25 , 0 , $+25$ ve $+50^\circ\text{C}$) testler gerçekleştirilmiştir. $+25^\circ\text{C}$ 'deki test sonuçları referans olarak alınmıştır. Instron 8801 test cihazının fırını farklı sıcaklıkların oluşturulduğu ortamdır. Soğutma için fırının arka tarafındaki soğutucu girişinden sıvı azot gönderilirken, ısıtmada fırının içindeki ısıtıcı rezistans devreye sokulmuştur. Testlere başlamadan önce fırın test sıcaklığına göre ayarlanmıştır ve test edilecek numuneler 30 dakika boyunca bu sıcaklıkta bekletilmiştir.

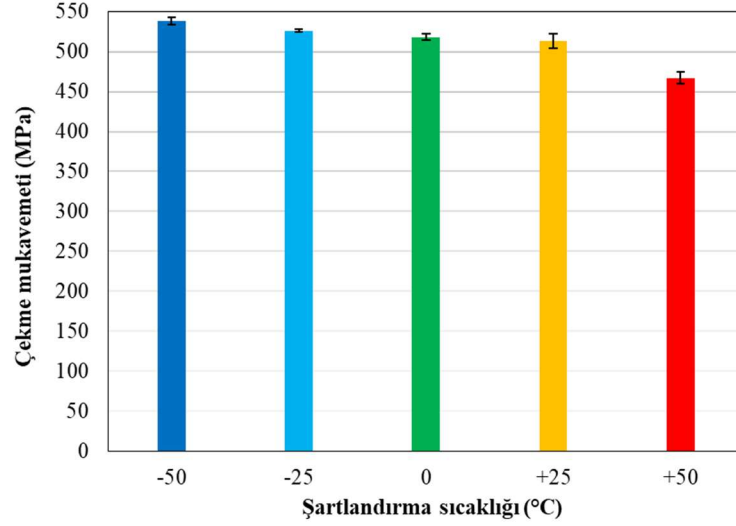
4.2.1.1. Farklı Sıcaklıklardaki Çekme Testi Sonuçları

Çekme testleri -50, -25, 0, +25 ve +50°C'de gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'de gösterilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri, her bir test sıcaklığı için ortalama çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülü değerlerine en yakın sonuçları sunan belirli bir numuneye aittir. Bu eğrilerden, ortam sıcaklığı değişimi etkisi ile çekme gerilmesinin nasıl değiştiği açıkça görülmektedir. Ortalama oda sıcaklığı olarak kabul edilen +25°C referans sıcaklığı ile karşılaştırma yapıldığında, ortam sıcaklığı azaldıkça çekme mukavemeti düşük oranda artış gösterirken, sıcaklık +50°C'ye yükseldiğinde tüm çekme özelliklerinde önemli bir düşüş gözlenmektedir.

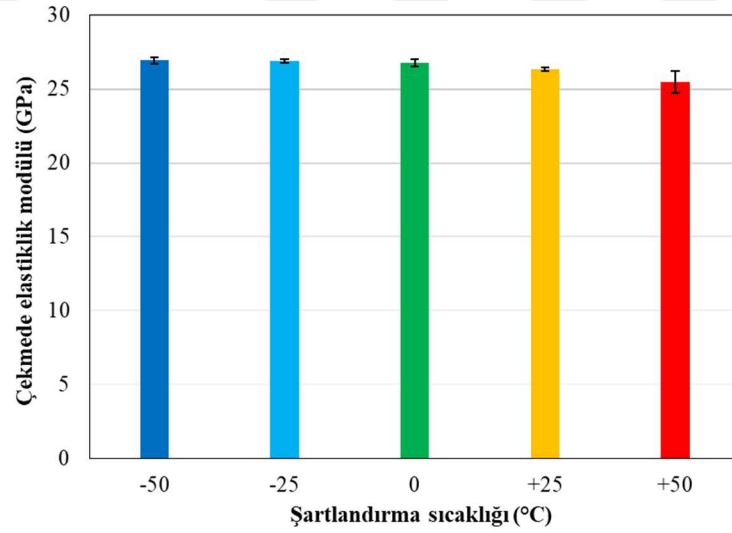


Şekil 4.2 Test sıcaklığına göre çekmede gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Numunelerin test sıcaklığına göre ortalama çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülü değerleri sırasıyla Şekil 4.3 ve 4.4'te gösterilmiştir. +25°C'de 513.19 MPa olan çekme mukavemeti 0°C'de %0.97 artarak 518.19 MPa'ya, -25°C'de %1.58 daha artarak 526.29 MPa'ya ve -50°C'de %2.38 daha artarak 538.50 MPa'ya yükselmiştir. Benzer şekilde, +25 °C'deki numunelerde 26.35 GPa olan çekmede elastiklik modülü, 0 °C'de %1.64 artarak 26.78 GPa'ya, -25 °C'de %0.47 daha artarak 26.91 GPa'ya ve -50 °C'de %0.13 daha artarak 26.94 GPa'ya yükselmiştir. +50°C'de çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülü %9.00 ve %3.26 oranında azalarak 467.02 MPa ve 25.49 GPa'ya düşmüş ve test edilen tüm sıcaklıklarda en düşük performans gözlenmiştir.



Şekil 4.3 Test sıcaklığına göre ortalama çekme mukavemeti değerleri



Şekil 4.4 Test sıcaklığına göre ortalama çekmede elastiklik modülü değerleri

Numunelerin test sıcaklığına göre ortalama çekme testi sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir. Tablodaki değişim değerleri +25°C referans alınarak hesaplanmıştır. +25°C'de 0.0217 mm/mm olan maksimum birim şekil değiştirme miktarı, -50°C'de %3.55 artarak 0.0225 mm/mm'ye yükselirken, +50°C'de %2.45 azalarak 0.0212 mm/mm'ye düşmüştür. Ortam sıcaklığının +25°C'den -50°C'ye azalması sonucunda, çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülünde sırasıyla %4.93 ve %2.24'lük bir artış gözlenmiştir. Çekmede tokluk değerleri ele alınınca, sıcaklık azalması ile oldukça küçük bir değişim görülerek, +25°C'de 5.82 N.mm/mm³ olan değer -50°C'de %1.87'lik bir artış ile 5.93 N.mm/mm³ olmuştur. Bu artışın, düşük sıcaklıklarda matrisin rijitliğinin artmasıyla birlikte, numunelerin kırılmadan önce daha fazla enerji

depolayabilme yeteneğiyle ilgili olduğu düşünülmüştür. +25°C'den +50°C'ye değişim sonucunda ise çekmede tokluk değerinde %4.09 bir azalma söz konusu olmuştur.

Test sıcaklığı +50°C'den -50°C'ye değiştiğinde çekme mukavemeti %13.93 ve çekmede elastiklik modülü %6 artmıştır. Sonuç olarak, Elium kompozitlerin $\pm 50^\circ\text{C}$ aralığındaki ortam sıcaklıklarında, +50°C'de daha düşük ve -50°C'de daha yüksek mekanik performans gösterdiği görülmektedir.

Tablo 4.3. Test sıcaklığına göre ortalama çekme testi sonuçları

Test sıcaklığı	Çekme mukavemeti	Çekme mukavemeti değişimi	Maksimum birim şekil değiştirme	Maksimum birim şekil değiştirme değişimi	Çekmede elastiklik modülü	Çekmede elastiklik modülü değişimi	Çekmede tokluk	Çekmede tokluk değişimi
°C	MPa	%	mm/mm	%	GPa	%	N.mm/mm ³	%
- 50	538.50 ± 4.82	+ 4.93	0.0225 ± 0.0007	+ 3.55	26.94 ± 0.23	+ 2.24	5.93 ± 0.25	+ 1.87
- 25	526.29 ± 1.25	+ 2.55	0.0220 ± 0.0004	+ 1.05	26.91 ± 0.11	+ 2.10	5.88 ± 0.28	+ 0.93
0	518.19 ± 4.28	+ 0.97	0.0218 ± 0.0003	+ 0.31	26.78 ± 0.24	+ 1.64	5.85 ± 0.32	+ 0.51
+ 25	513.19 ± 9.49	-	0.0217 ± 0.0004	-	26.35 ± 0.12	-	5.82 ± 0.19	-
+ 50	467.02 ± 7.05	- 9.00	0.0212 ± 0.0007	- 2.45	25.49 ± 0.75	- 3.26	5.59 ± 0.25	- 4.09

Referans olarak alınan +25°C'de elde edilen Elium kompozit sonuçlara göre çekme mukavemeti 513.19 MPa olurken, aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin oda sıcaklığında özelliklerinin araştırıldığı çalışmalarda bu değer Kim ve ark. (2023) tarafından 516.3 MPa ve Karacor ve Özcanlı (2022) tarafından ise 538.88 MPa olarak tespit edilmiştir. Buna göre, aramid/karbon fiber takviyeli Elium ve epoksi kompozitlerin benzer özellikler gösterdiği ve Elium'un bu hibrit fiber takviye yapısında geleneksel epoksi ile karşılaştırılabilir çekme performansı sergilediği söylenebilir.

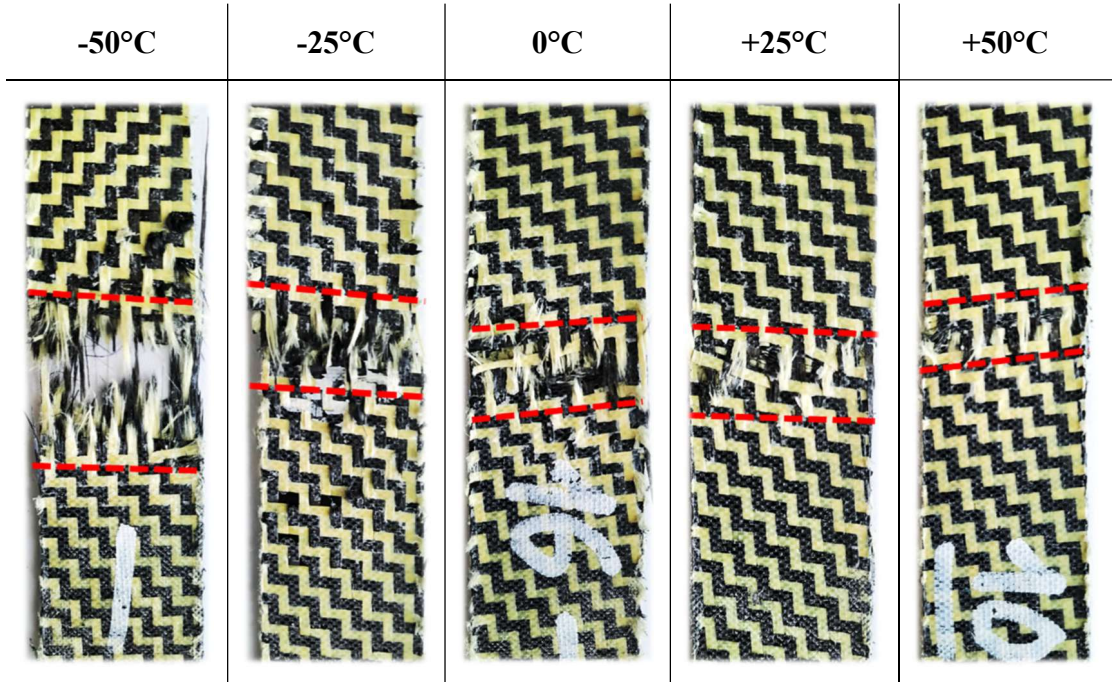
Bang ve ark. (2022) cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin çekme özelliklerini farklı sıcaklıklarda test ederek araştırmıştır. +20°C'de 146.9 MPa olan çekme mukavemeti -20°C'de %1.7 artarak 149.3 MPa olmuştur. Elium matrisin farklı

sıcaklıklardaki özelliklerinin incelendiği çalışmalara bakılırsa, cam fiber takviyeli kompozitlerin düşük hızlı darbe özelliklerini araştıran Boumbimba ve ark. (2017) deney sıcaklığının $+20^{\circ}\text{C}$ 'den $+80^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkması ile elastik enerji değerinde %10.67 azalma ve -80°C 'ye düşmesi ile %131.25 artış tespit etmiştir. Cadieu ve ark. (2020) cam fiber takviyeli Elium kompozitlerin dinamik mekanik analizini yapmıştır. Yaptıkları çalışmada, $+20^{\circ}\text{C}$ 'de 3823 N olan maksimum kuvvet değeri $+60^{\circ}\text{C}$ 'de %17.29 azalarak 3162 N ve -20°C 'de %12.08 artarak 4285 N olarak bulunmuştur.

Farklı Sıcaklıklardaki Çekme Testi Hasar Görüntüleri

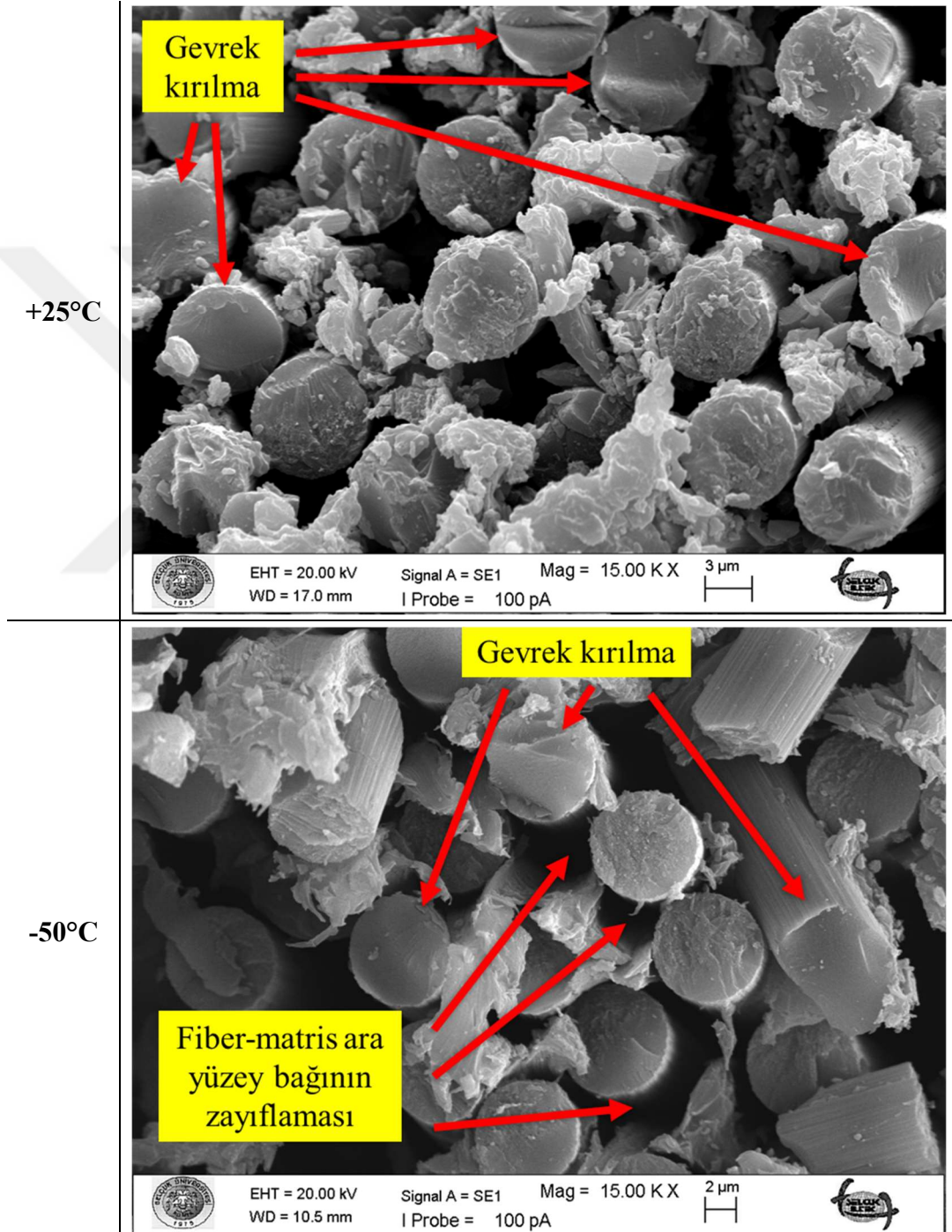
Şekil 4.5'te çekme özellikleri için test edilen numunelerin test sıcaklığına göre makro hasar görüntüleri verilmiştir. Hasar bölgeleri her numunede açıkça görülmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda ($+25$ ve $+50^{\circ}\text{C}$) fiber kopmaları gerçekleşmesine rağmen kırılan yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmamıştır. Daha düşük sıcaklıklarda (-25 ve -50°C) ise bu ayrılmalar daha belirgindir.

Numunelerin makro görüntülerinde hasar davranışlarının benzer olduğu görülmektedir. Buna göre, ASTM D3039'da yer alan hasar tipi ve kodlarına göre yatay ayrılma (LGM tipi: Lateral-Gage-Middle) gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ortam sıcaklığının değişimi çekmede hasar oluşumunu büyük ölçüde etkilememiş ve genel olarak bir değişikliğe neden olmamıştır. Sonuç olarak hem çekme mukavemetinde hem de çekmede elastiklik modülünde farklı sıcaklıklarda büyük değişimler meydana gelmemiştir.



Şekil 4.5 Test sıcaklığına göre çekme testi sonrası makro hasar görüntüleri

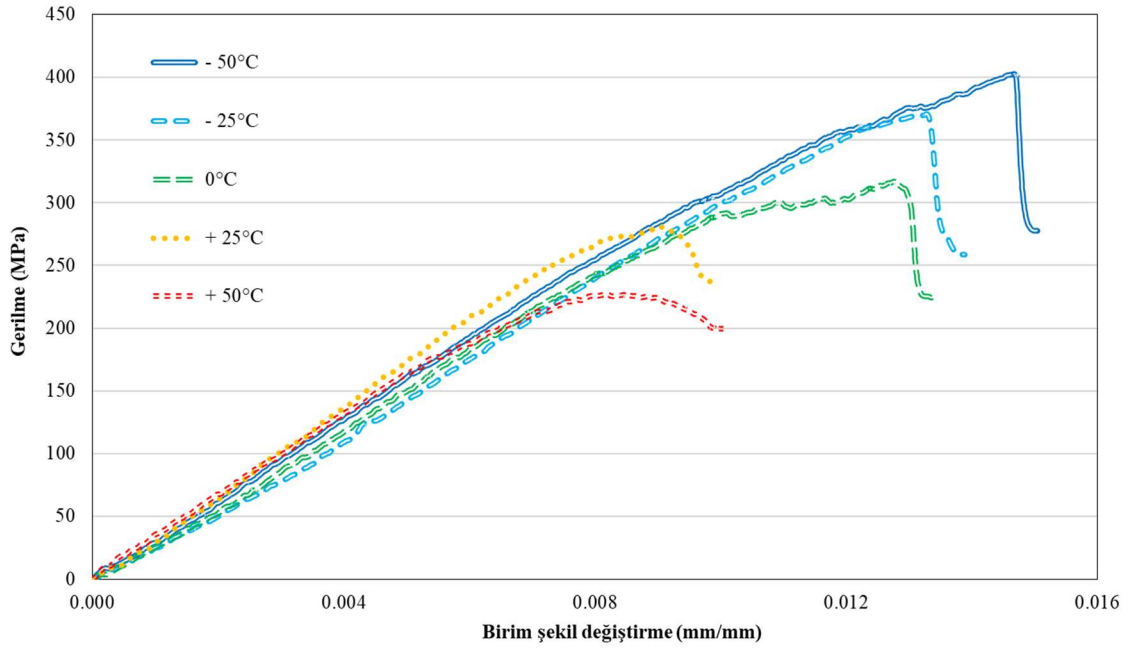
Şekil 4.6'da +25 ve -50°C'de test edilmiş numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri sunulmuştur. Her iki görüntüde de fiberlerin kopması belirgindir. +25°C'de gevrek kırılmalar tipik olarak görülmektedir (Medeiros ve ark., 2019). -50°C'de test edilmiş numunede gevrek kırılan fiberlerin yüzeyleri, düşük sıcaklığın etkisi ile meydana gelen daha zayıf fiber matris ara yüzey bağlanması sonucunda oldukça keskin yapıdadır (Priyanka ve ark., 2023).



Şekil 4.6 Farklı sıcaklıklarda test edilmiş numunelerin çekme testi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri

4.2.1.2. Farklı Sıcaklıklardaki Eğilme Testi Sonuçları

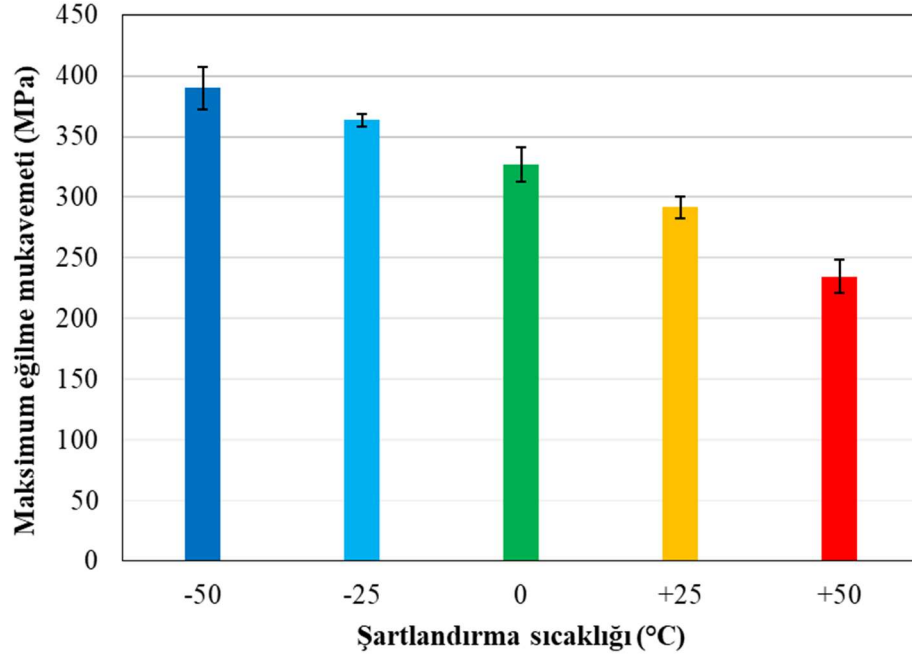
Üç nokta eğilme testleri -50, -25, 0, +25 ve +50°C’de gerçekleştirilmiştir ve elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Bu eğriler, her bir test sıcaklığı için ortalama eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülü değerlerine en yakın sonuçları sunan belirli bir numuneye aittir. Bu eğrilerden, ortam sıcaklığı değişimi etkisi ile eğilme davranışının nasıl değiştiği açıkça görülmektedir. Genel olarak, ortam sıcaklığı azalmasının eğilme davranışı üzerinde hem gerilme hem de birim şekil değiştirme miktarları bakımından artırıcı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7 Test sıcaklığına göre eğilmede gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

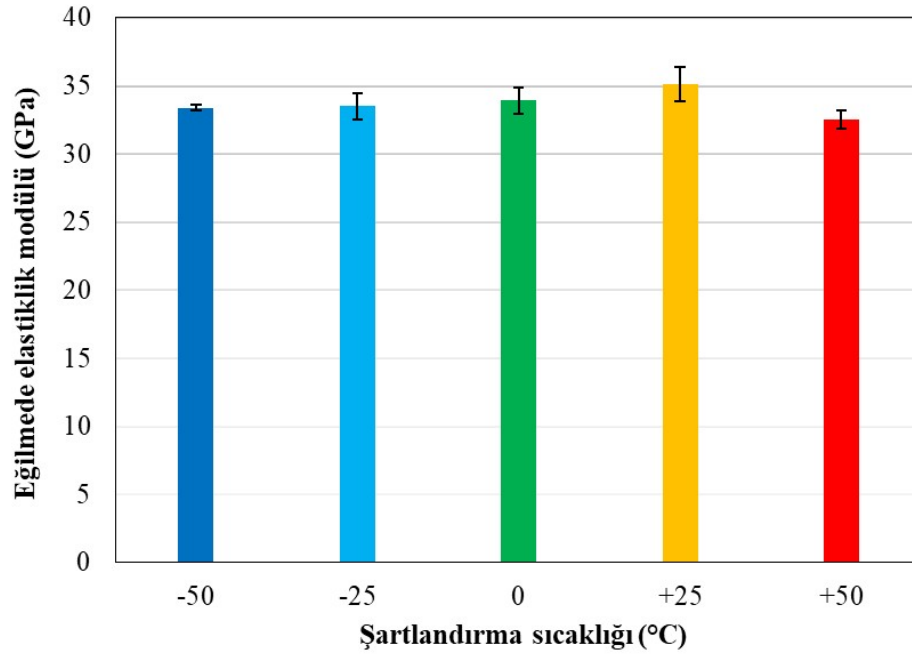
Numunelerin test sıcaklığına göre ortalama maksimum eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülü değerleri sırasıyla Şekil 4.8 ve 4.9’da gösterilmiştir. Ortalama eğilme testi sonuçları ise Tablo 4.4’te verilmiştir. Tablodaki değişim değerleri +25°C referans alınarak hesaplanmıştır.

+25°C’de 291.55 MPa olan eğilme mukavemeti, 0°C’de %12.22 artarak 327.20 MPa’ya, -25°C’de %12.42 daha artarak 363.40 MPa’ya ve -50°C’de %9.09 daha artarak 389.90 MPa’ya yükselmiştir. Eğilme mukavemetinin aksine, +25°C’de 35.14 GPa olan eğilmede elastiklik modülü, 0°C’de %3.48 azalarak 33.91 GPa’ya, -25°C’de %1.10 daha azalarak 33.53 GPa’ya ve -50°C’de %0.34 daha azalarak 33.41 GPa’ya düşmüştür.



Şekil 4.8 Test sıcaklığına göre ortalama maksimum eğilme mukavemeti değerleri

+50°C’de eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülü %19.52 ve %7.45 azalarak 234.66 MPa ve 32.52 GPa’ya düşmüş ve en düşük eğilme performansını göstermiştir. Ortam sıcaklığının +25°C’den -50°C’ye azalması sonucunda, eğilme mukavemetinde %33.73’lük bir artış ve eğilmede elastiklik modülünde %4.92’lik bir azalma gözlenmiştir. Test sıcaklığı +50°C’den -50°C’ye değiştiğinde eğilme mukavemeti %53.25 ve eğilmede elastiklik modülü %2.53 artmıştır.



Şekil 4.9 Test sıcaklığına göre ortalama eğilmede elastiklik modülü değerleri

Tablo 4.4. Test sıcaklığına göre ortalama eğilme testi sonuçları

Test sıcaklığı	Maksimum eğilme mukavemeti	Maksimum eğilme mukavemeti değişimi	Eğilmede elastiklik modülü	Eğilmede elastiklik modülü değişimi
°C	MPa	%	GPa	%
- 50	389.90 ± 17.28	+ 33.73	33.41 ± 0.25	- 4.92
- 25	363.40 ± 5.34	+ 24.64	33.53 ± 0.96	- 4.58
0	327.20 ± 14.13	+ 12.22	33.91 ± 0.99	- 3.48
+ 25	291.55 ± 8.67	-	35.14 ± 1.23	-
+ 50	234.66 ± 13.54	- 19.52	32.52 ± 0.66	- 7.45

Bu çalışmanın sonuçlarına benzer değişimlerin elde edildiği araştırmada Jia ve ark. (2018) karbon fiber takviyeli vinil ester matrisli kompozitlerin eğilme davranışlarının sıcaklık ile değişimini incelemiştir. Eğilme mukavemeti, ortam sıcaklığı +20°C'den -20°C'ye düştüğünde %20 ve -60°C'ye düştüğünde %31.94 artış göstermiştir. Eğilmede elastiklik modülünde ise, ortam sıcaklığının +20°C'den -20°C'ye düşmesi %2.03'lik bir azalmaya sebep olurken -60°C'ye düşmesi sonucu bir değişiklik gözlenmemiştir.

Sonuç olarak, çekme sonuçlarına benzer bir şekilde, Elium kompozitlerin düşük sıcaklıklardaki eğilme özelliklerinin yüksek sıcaklıklardakilere göre genelde daha üstün olduğu görülmektedir. Ancak, eğilmedeki performans değişimi, çekmedekine göre oldukça fazla gerçekleşmiştir. Çekmede -50°C'de %4.93 mukavemet artışı olurken eğilmede %33.73 artış görülmüştür. Benzer şekilde, elastiklik modülü değişimleri de eğilmede daha büyük oranda olmuştur.

Farklı Sıcaklıklardaki Eğilme Testi Hasar Görüntüleri

Şekil 4.10'da eğilme özellikleri için test edilen numunelerin test sıcaklığına göre makro hasar görüntüleri verilmiştir. Her bir test sıcaklığına için örnek bir makro görüntü verilmiştir. Tüm görüntülerde, üst taraf eğilme testi sırasında kuvvetin uygulandığı alanı temsil etmektedir. Buna göre, numunenin üst tarafında basma gerilmesi ve alt tarafında ise çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

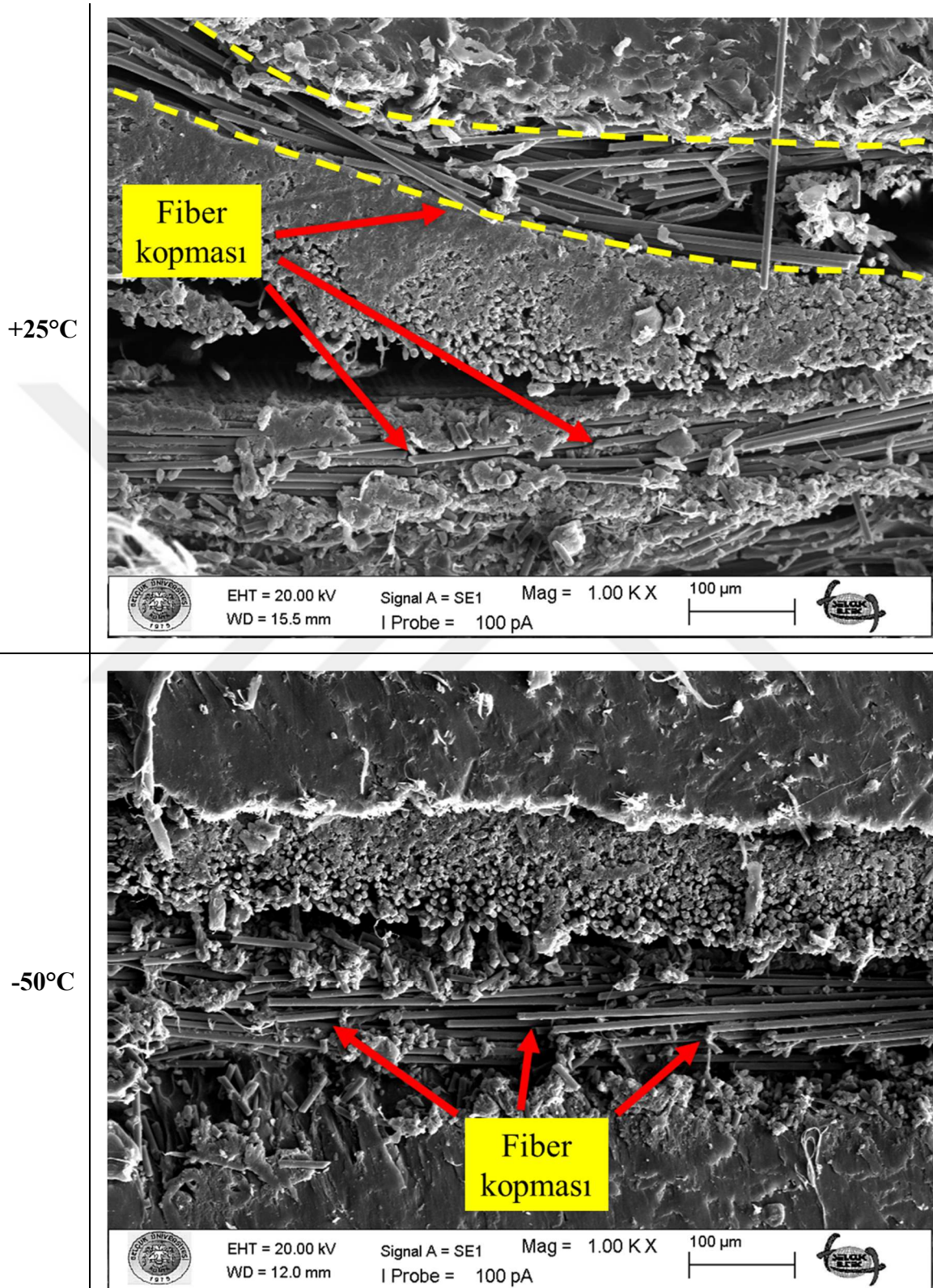
Makro görüntülere göre, kalıcı şekil değiştirmenin oldukça az gerçekleştiği görülmektedir. Bununla birlikte, test sıcaklığı yükseldikçe kalıcı şekil değiştirmenin arttığı da açıkça gözlenmiştir. Sıcaklık yükseldikçe matris daha yumuşak hale gelir ve bunun sonucunda kalıcı şekil değiştirme kabiliyeti artar (Ghorbani ve ark., 2020). Düşük sıcaklıklarda matris daha gevrek olurken, yüksek sıcaklıklarda daha sünek davranmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda daha fazla kalıcı şekil değiştirme olmuştur.



Şekil 4.10 Test sıcaklığına göre eğilme testi sonrası makro hasar görüntüleri

Eğilmede hasar davranışını incelemek için +25 ve -50°C'de test edilmiş numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. +25°C'de, matris ve fiberler daha düzensiz bir kırılma yapısına (fiber doğrultusunun değişmesi) sahip ve daha fazla kalıcı şekil değiştirme görülmektedir. Bu da daha sünek bir yapı gözlemlendiği

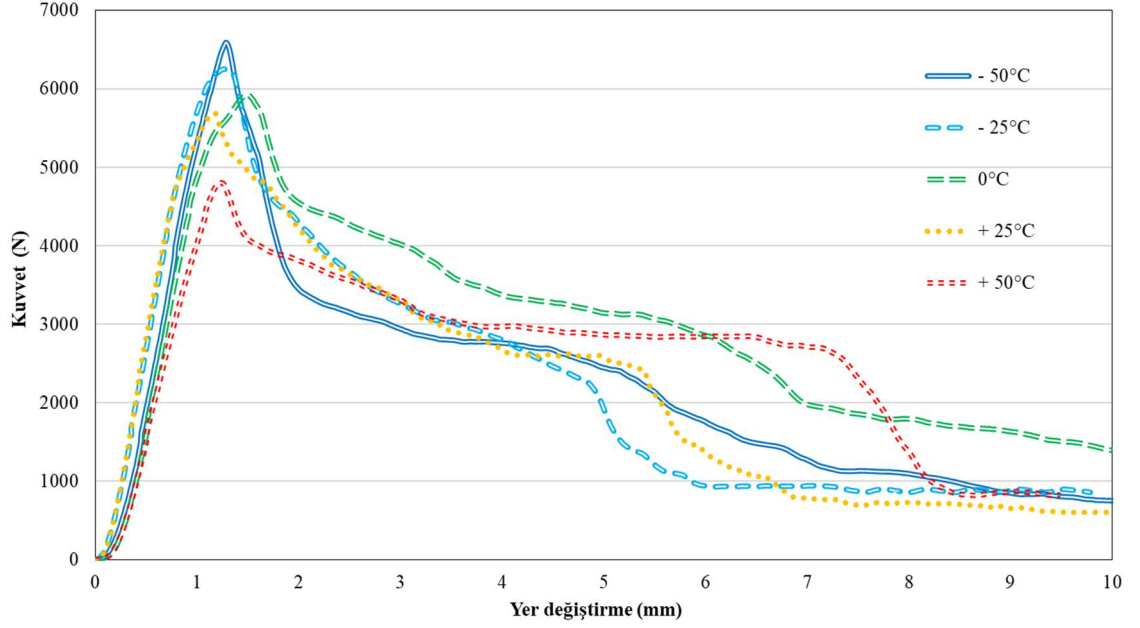
anlamına gelmektedir. -50°C 'de ise keskin kırılmalar ile birlikte hasar yüzeyi daha gevrek bir yapı sergilemiştir.



Şekil 4.11 Farklı sıcaklıklarda test edilmiş numunelerin eğilme testi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri

4.2.1.3. Farklı Sıcaklıklardaki Tek Taraflı Çentikli Eğilme Testi Sonuçları

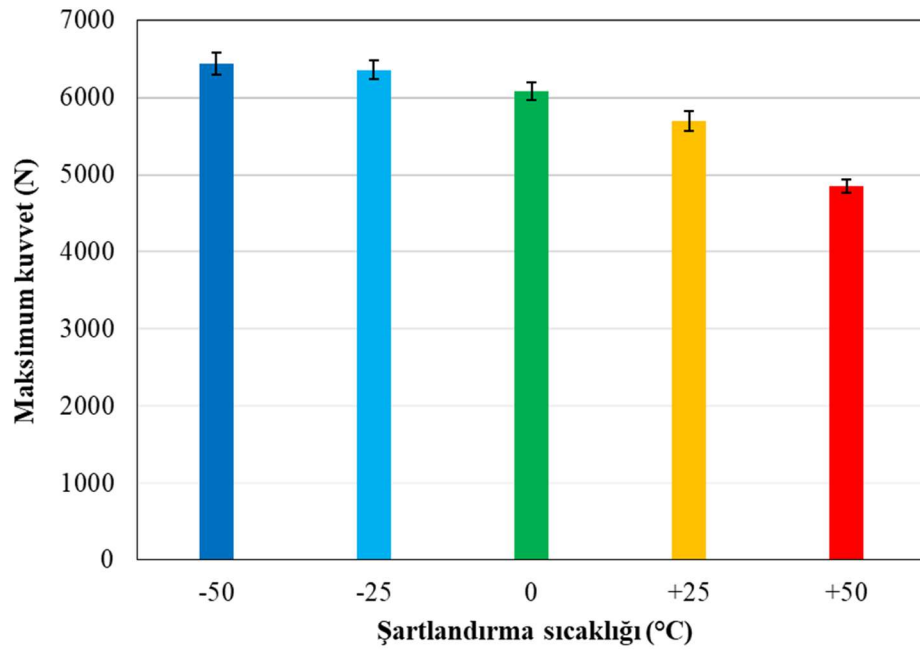
SENB testleri -50, -25, 0, +25 ve +50°C'de gerçekleştirilmiş ve elde edilen kuvvet-çene yer değiştirmesi eğrileri Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Bu eğriler, her bir test sıcaklığı için ortalamaya en yakın ve benzer sonucu veren belirli bir numunenin değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre, ortam sıcaklığı azalmasının maksimum kuvvet üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



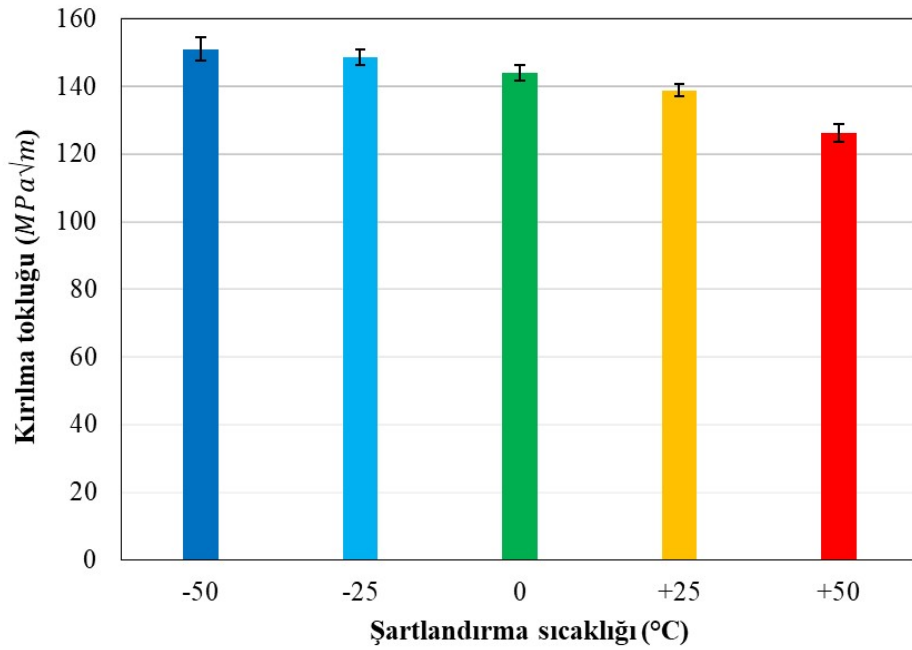
Şekil 4.12 Test sıcaklığına göre SENB testinde kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Numunelerin test sıcaklığına göre ortalama maksimum kuvvet ve kırılma tokluğu değerleri sırasıyla Şekil 4.13 ve 4.14'te gösterilmiştir. Ortalama SENB testi sonuçları ise Tablo 4.5'te verilmiştir. Tablodaki değişim değerleri +25°C referans alınarak hesaplanmıştır.

+25°C'de 5694.55 N olan ortalama maksimum kuvvet, 0°C'de %6.77 artarak 6079.87 N'ye, -25°C'de %4.83 daha artarak 6354.71 N'ye ve -50°C'de %1.42 daha artarak 6435.31 N'ye yükselmiştir. Benzer şekilde, +25°C'de numunelerde $138.83 MPa\sqrt{m}$ olan kırılma tokluğu, 0°C'de %3.76 artarak $144.05 MPa\sqrt{m}$ 'ye, -25°C'de %3.29 daha artarak $148.62 MPa\sqrt{m}$ 'ye ve -50°C'de %1.74 daha artarak $151.04 MPa\sqrt{m}$ 'ye yükselmiştir.



Şekil 4.13 Test sıcaklığına göre ortalama maksimum kuvvet değerleri



Şekil 4.14 Test sıcaklığına göre ortalama kırılma tokluğu değerleri

En düşük performans $+50^{\circ}\text{C}$ 'de test sonucunda görülmüştür ve $+25^{\circ}\text{C}$ 'ye göre maksimum kuvvet ve kırılma tokluğu sırasıyla %14.83 ve %9.04 azalarak 4850.20 N ve $126.27 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olmuştur. SENB testleri sonucunda, ortam sıcaklığının $+25^{\circ}\text{C}$ 'den -50°C 'ye azalması ile maksimum kuvvette %13.01 ve kırılma tokluğunda %8.80'lik bir

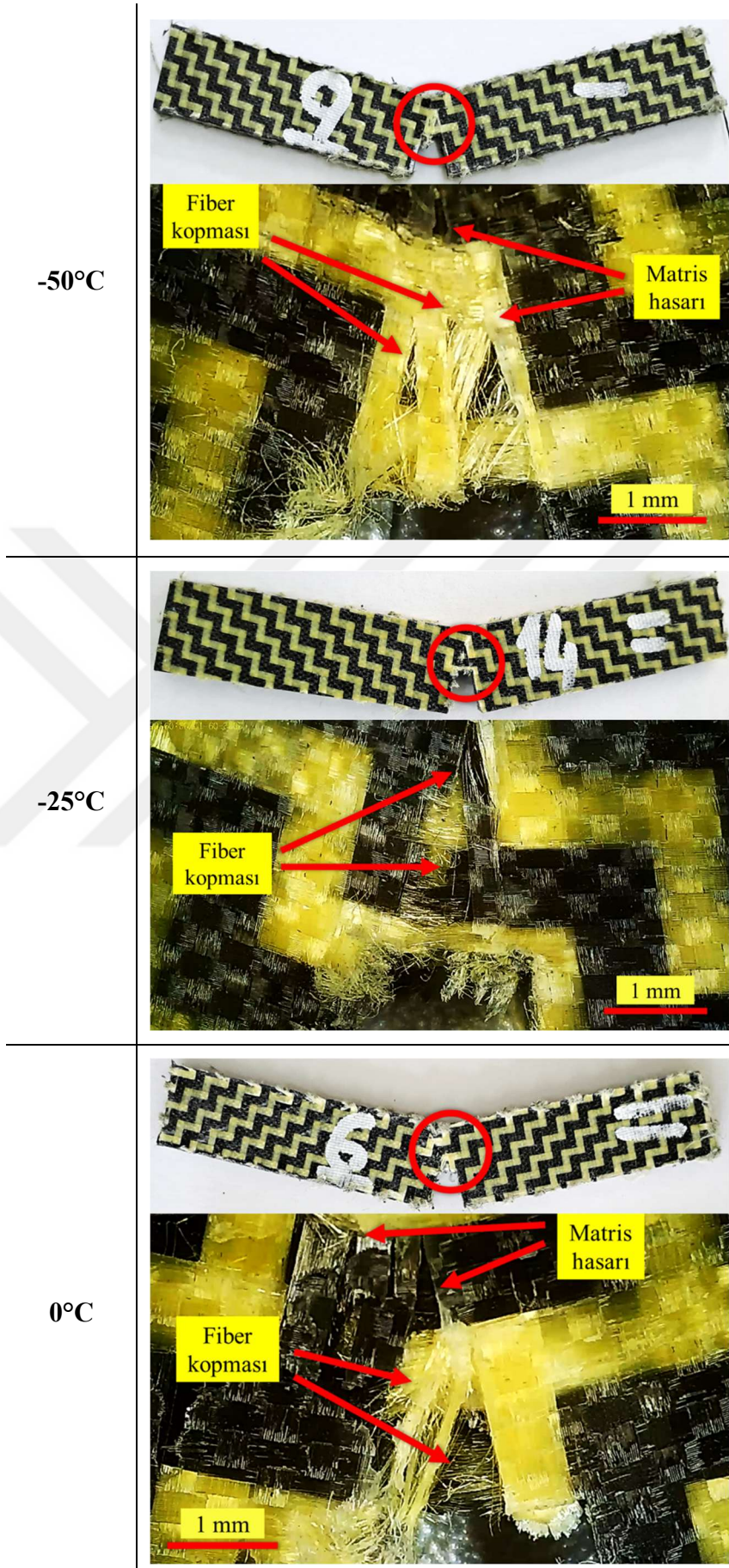
artış gözlenmiştir. Test sıcaklığı +50°C'den -50°C'ye değiştiğinde maksimum kuvvet %27.84 ve kırılma tokluğu % artmıştır. Sonuç olarak, Elium kompozitlerin SENB yüklemesine maruz kalması durumunda ortam sıcaklığının azalması ile birlikte çatlak ilerlemesine karşı direncinin arttığı belirtilebilir.

Tablo 4.5. Test sıcaklığına göre ortalama SENB testi sonuçları

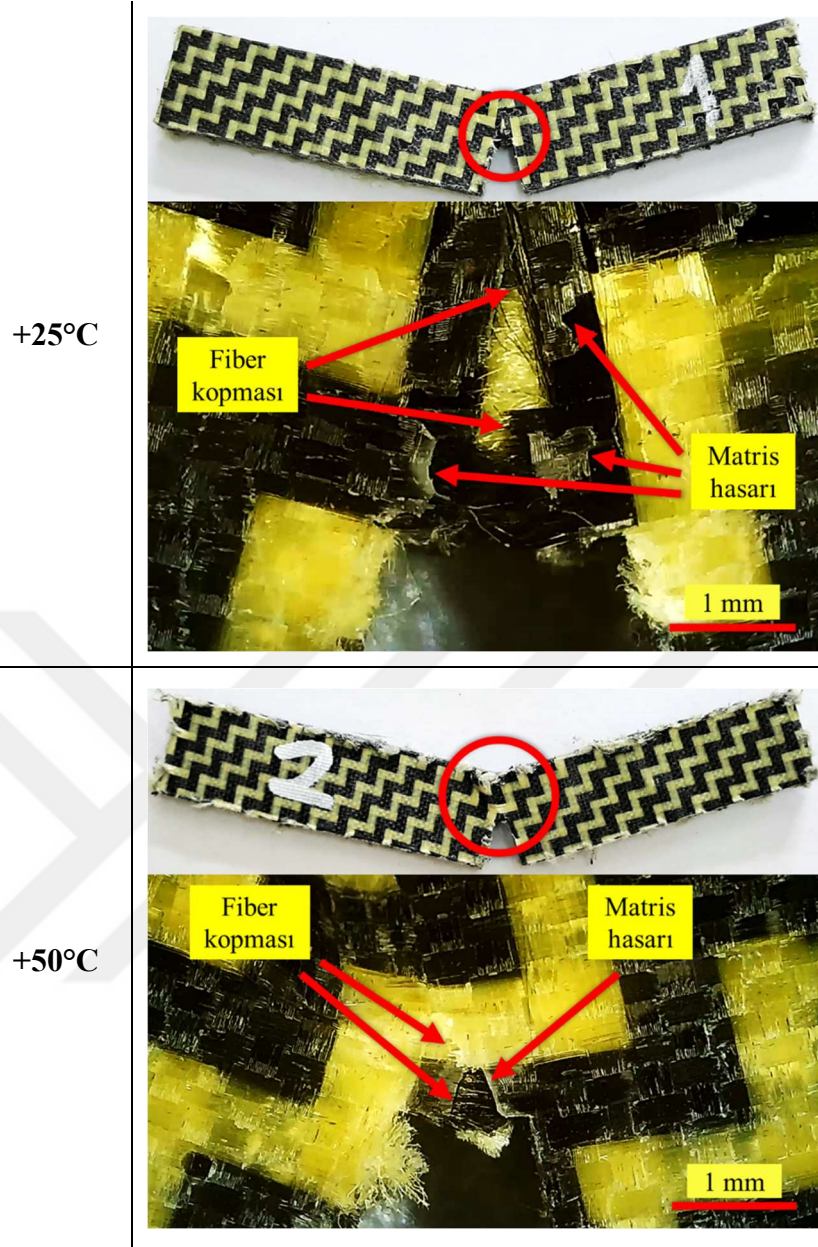
Test sıcaklığı	Maksimum kuvvet	Maksimum kuvvet değişimi	Kırılma tokluğu	Kırılma tokluğu değişimi
°C	N	%	$MPa\sqrt{m}$	%
- 50	6435.31 ± 142.83	+ 13.01	151.04 ± 3.42	+ 8.80
- 25	6354.71 ± 123.62	+ 11.59	148.62 ± 2.39	+ 7.05
0	6079.87 ± 116.44	+ 6.77	144.05 ± 2.35	+ 3.76
+ 25	5694.55 ± 134.64	-	138.83 ± 1.74	-
+ 50	4850.20 ± 81.49	- 14.83	126.27 ± 2.66	- 9.04

Farklı Sıcaklıklardaki SENB Testi Hasar Görüntüleri

Şekil 4.15'te SENB özellikleri için test edilen numunelerin test sıcaklığına göre makro hasar görüntüleri verilmiştir. Her bir test sıcaklığına için önce makro görüntü verilmiştir. Sonra, makro görüntüde kırmızı ile işaretlenmiş hasar bölgesinin detay görüntüsü sunulmuştur. Detay görüntüler, çatlak ilerlerken ve kırılma olurken hem matrisin hem de fiberlerin hasara uğradığını ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, ortam sıcaklığı düştükçe hasarın daha belirgin ve büyük olduğu da görülmektedir.



Şekil 4.15 Test sıcaklığına göre SENB testi sonrası makro hasar görüntüleri

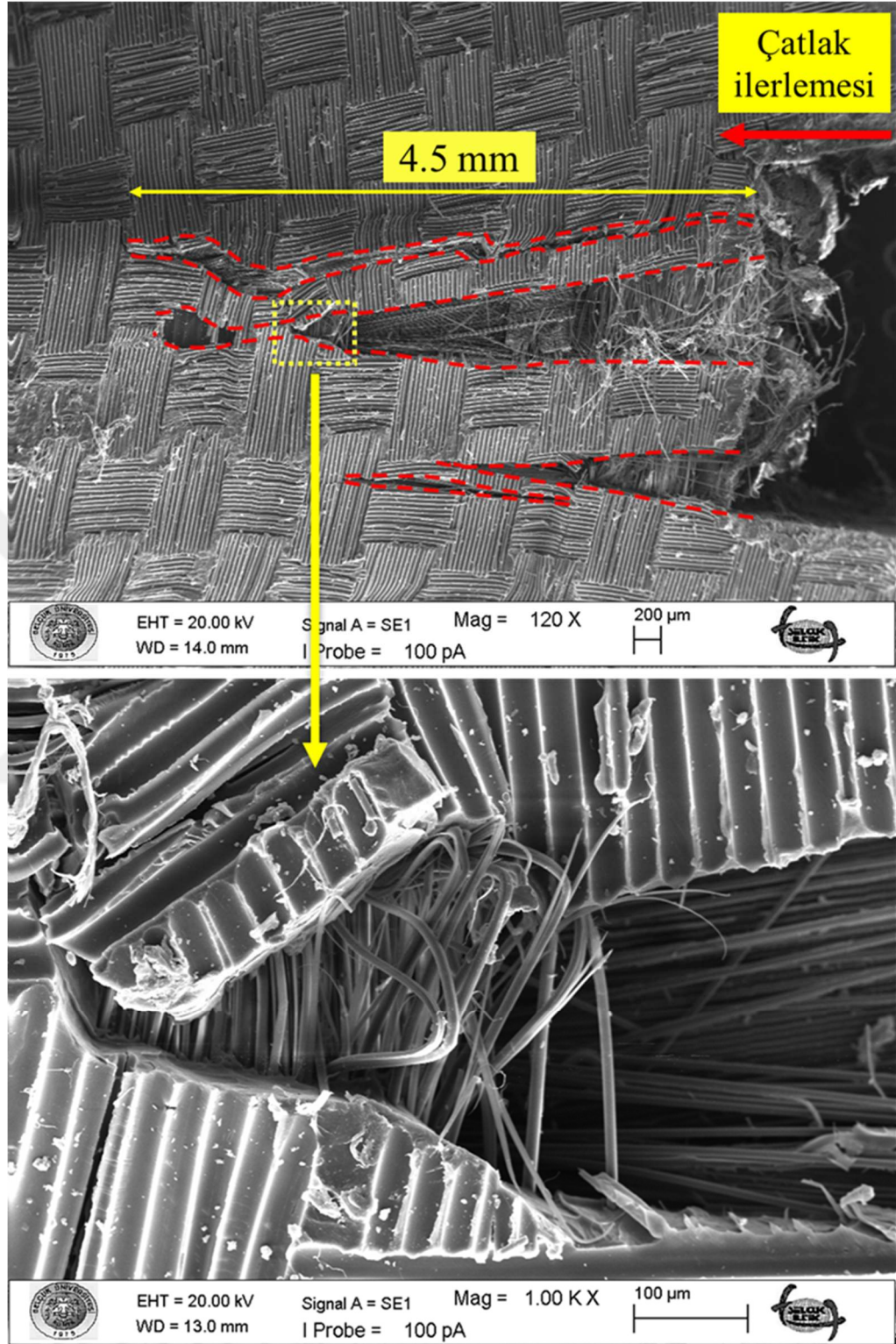


Şekil 4.15 Test sıcaklığına göre SENB testi sonrası makro hasar görüntüleri (devamı)

SENB testinde hasar davranışını incelemek için +25 ve -50°C’de test edilmiş numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır ve Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Her iki görüntüde de birden fazla çatlak oluştuğu ve ilerlediği görülmektedir.

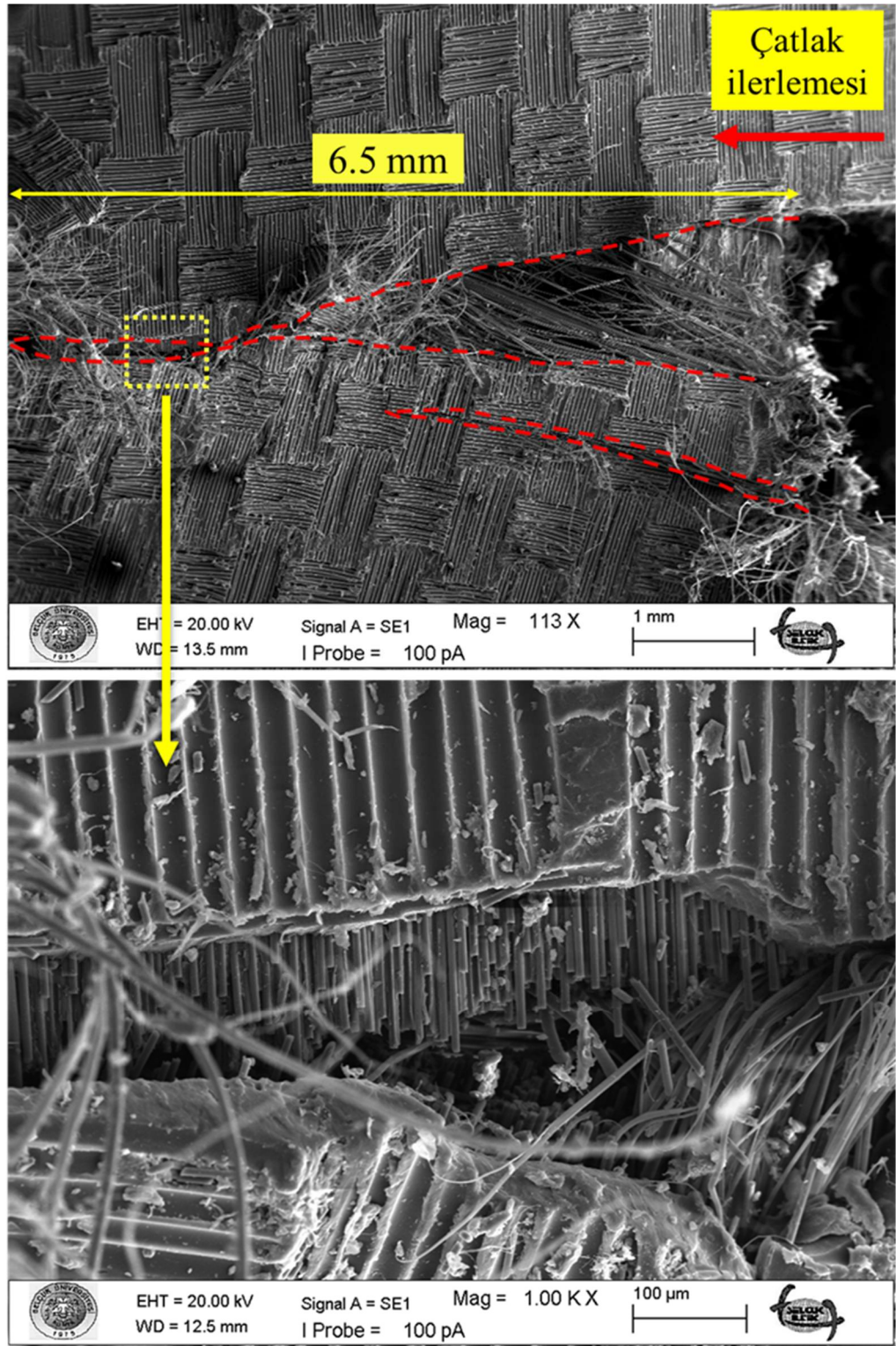
+25°C test sıcaklığında çatlak ilerlemesi sınırlı kalmış (4.5 mm) ve çatlak daha kontrollü bir şekilde takviye kumaşı takip ederek ilerlemiştir. Yüksek büyütmede fiber çekilmesi belirgin olarak görülmektedir. Buna karşılık, -50°C’de çatlak ilerlemesi daha fazla (6.5 mm) olmuş ve çatlak hattı düzensiz bir seyir izlemiştir. Aynı zamanda düşük sıcaklığın etkisi ile matrisin gevrekleşmesi sonucu fiberlerin daha keskin kırıldığı gözlenmiştir.

+25°C



Şekil 4.16 Farklı sıcaklıklarda test edilmiş numunelerin SENB testi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri

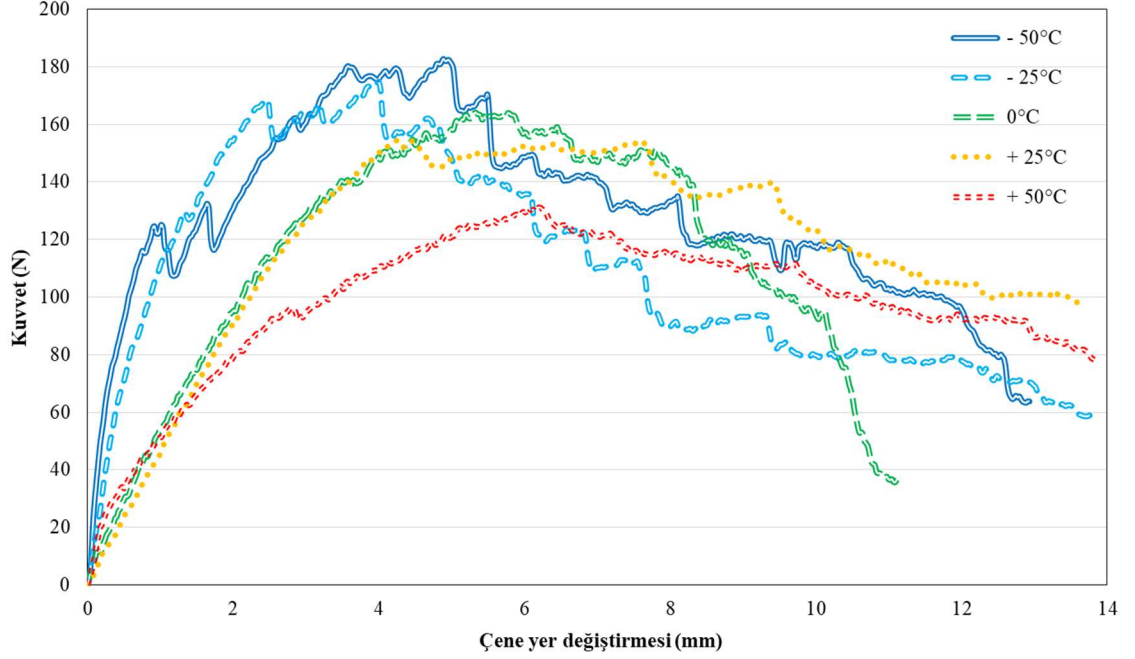
-50°C



Şekil 4.16 Farklı sıcaklıklarda test edilmiş numunelerin SENB testi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri (devamı)

4.2.1.4. Farklı Sıcaklıklardaki Çift Ankastre Kiriş Testi Sonuçları

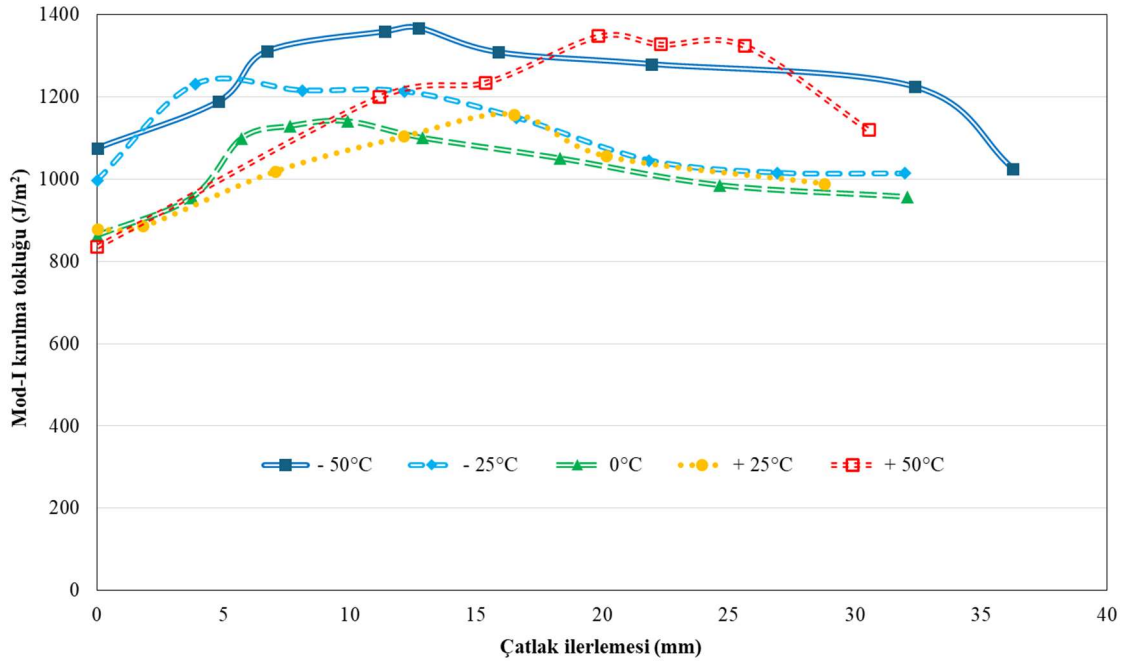
DCB testleri -50 , -25 , 0 , $+25$ ve $+50^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilmiştir ve elde edilen kuvvet-çene yer değiştirmesi eğrileri Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Bu eğriler, her bir test sıcaklığı için ortalamaya en yakın ve benzer sonucu veren belirli bir numunenin değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre, ortam sıcaklığı azalmasının kuvvet değerleri üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.17 Test sıcaklığına göre DCB testinde kuvvet-çene yer değiştirmesi eğrileri

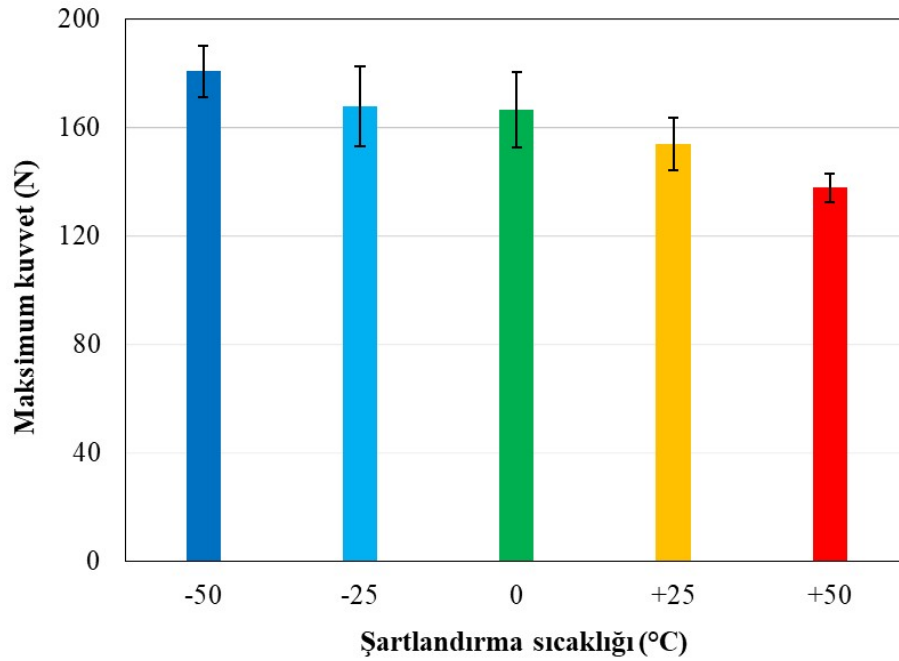
Şekil 4.18'de test sıcaklığına göre Mod-I kırılma tokluğu-çatlak ilerlemesi eğrileri verilmiştir. Kuvvet-çene yer değiştirmesi eğrilerinde görülen durumun aksine, $+25^{\circ}\text{C}$ referans alınarak kıyaslama yapıldığında, ortam sıcaklığı azalmasının ve artmasının kırılma tokluğu değerlerini artıracak bir etki sergilediği görülmektedir.

En yüksek kırılma tokluğu değerlerini gösteren numuneler -50°C ve $+50^{\circ}\text{C}$ 'de test edilenler olmuştur. Bu iki sıcaklıkta, numunelerin çatlak ilerlemesine karşı davranışı birbirinden farklı gerçekleşmiştir. -50°C 'de test edilen numuneler çatlak ilerlemesinin ilk kısımlarında daha yüksek kırılma tokluğu sergilerken, $+50^{\circ}\text{C}$ 'deki numuneler çatlak ilerlemesi devam ettikçe artan kırılma tokluğu değerleri göstermiştir.



Şekil 4.18 Test sıcaklığına göre Mod-I kırılma tokluğu-çatlak ilerlemesi eğrileri

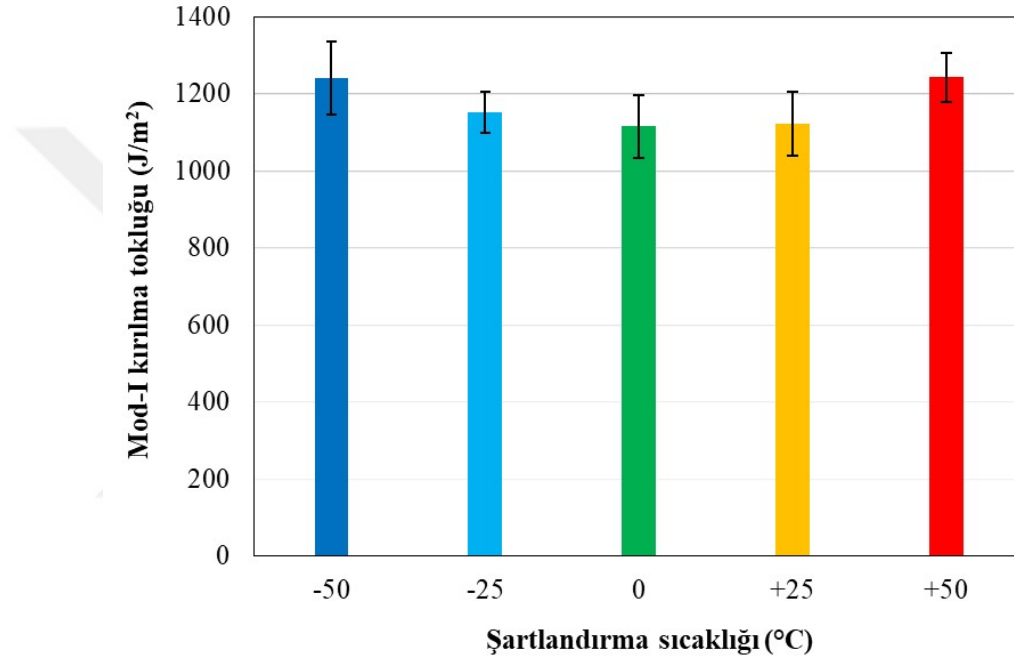
Numunelerin test sıcaklığına göre ortalama maksimum kuvvet ve Mod-I kırılma tokluğu değerleri sırasıyla Şekil 4.19 ve 4.20'de gösterilmiştir. Ortalama DCB testi sonuçları ise Tablo 4.6'da verilmiştir. Tablodaki değişim değerleri +25°C referans alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.19 Test sıcaklığına göre ortalama maksimum kuvvet değerleri

+25°C'de 153.97 N olan ortalama maksimum kuvvet, 0°C'de %8.17 artarak 166.55 N'ye, -25°C'de %0.86 daha artarak 167.88 N'ye ve -50°C'de %8.30 daha artarak 180.65 N'ye yükselmiştir. +50°C'de ise maksimum kuvvet, +25°C'e göre %10.49 azalarak 137.82 N olmuştur.

+25°C'de numunelerde 1123.39 J/m² olan Mod-I kırılma tokluğu, 0°C'de %0.71 azalarak 1115.45 J/m², -25°C'de %3.33 artarak 1152.86 J/m² ve -50°C'de %7.79 daha artarak 1240.30 J/m² olarak elde edilmiştir. +50°C'de Mod-I kırılma tokluğu, +25°C'e göre %10.61 artarak 1242.61 J/m² olmuştur.



Şekil 4.20 Test sıcaklığına göre ortalama Mod-I kırılma tokluğu değerleri

DCB testleri sonucunda, ortam sıcaklığının +25°C'den -50°C'ye azalması ile maksimum kuvvette %17.33 ve Mod-I kırılma tokluğunda %10.41'lik bir artış gözlenmiştir. En düşük maksimum kuvvet değeri +50°C test sıcaklığı sonucunda görülmesine rağmen, -50°C'deki ile neredeyse aynı olmakla birlikte en yüksek kırılma tokluğu değeri +50°C ortam sıcaklığında meydana gelmiştir. -50 ve +50°C'deki kırılma tokluklarının benzer değerler göstermesinin nedeni DCB testi sonrası hasar görüntüleri incelenerek değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın DCB testi sonuçları, literatürde yer alan oda sıcaklığında testleri gerçekleştirilmiş kırılma tokluğu araştırmaları ile karşılaştırılmıştır. Elium matrisli aramid/karbon hibrit fiber takviyeli kompozitlerin +25°C'deki Mod-I kırılma tokluğu 1123.39 J/m² olarak elde edilmiştir. Rajasekar ve ark. (2019) aramid/karbon fiber

takviyeli epoksi kompozitlerin kırılma davranışını araştırmıştır ve ilk çatlak uzunluğuna göre değişmekle birlikte Mod-I kırılma tokluğunu 1015.76 ve 1239.26 J/m² olarak bulmuştur. İlk çatlak uzunluğunun daha küçük olması durumunda kırılma tokluğunun daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Tablo 4.6. Test sıcaklığına göre ortalama DCB testi sonuçları

Test sıcaklığı	Maksimum kuvvet	Maksimum kuvvet değişimi	Mod-I Kırılma tokluğu	Mod-I Kırılma tokluğu değişimi
°C	N	%	J/m ²	%
- 50	180.65 ± 9.37	+ 17.33	1240.30 ± 95.35	+ 10.41
- 25	167.88 ± 14.61	+ 9.03	1152.86 ± 53.24	+ 2.62
0	166.55 ± 13.89	+ 8.17	1115.45 ± 82.57	- 0.71
+ 25	153.97 ± 9.67	-	1123.39 ± 83.17	-
+ 50	137.82 ± 5.36	- 10.49	1242.61 ± 64.41	+ 10.61

Alsaadi ve Erkliğ (2021) aramid fiber takviyeli epoksi kompozitlerde Mod-I kırılma tokluğunu 1093 J/m² olarak tespit etmiştir. Kim ve ark. (2011) epoksi matrisli karbon fiber takviyeli kompozitlerde Mod-I kırılma tokluğunu 942 J/m² olarak bulurken, Bhudolia ve ark. (2016) aynı değeri 970 J/m² olarak elde etmiştir. Bhudolia ve ark. (2018) diğer bir çalışmada ise Elium matrisli karbon fiber takviyeli kompozitleri incelemiştir ve kullanılan kumaş kalınlığına göre değişmekle birlikte Mod-I kırılma tokluğunu 1310 ve 1690 J/m² olarak bulmuştur. Daha ince kumaş kullanımının kırılma tokluğunu artırdığı belirtilmiştir.

Bunun yanında, farklı sıcaklıklarda kırılma özelliklerinin değişiminin araştırıldığı çalışmalar da incelenmiştir. Coronado ve ark. (2012) karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin Mod-I kırılma tokluğunda, test sıcaklığının +20°C'den +50°C'ye yükselmesi ile %20.88 ve -30°C'den -60°C'ye düşmesi ile %4.80 oranında artış tespit

etmiştir. Cadieu ve ark. (2021) Elium matrisli cam fiber takviyeli kompozitlerin farklı sıcaklıklarda DCB testlerini yapmıştır. Sonuçlara göre, ortam sıcaklığının $+20^{\circ}\text{C}$ 'den -10°C 'ye düşmesi maksimum kuvveti ve Mod-I kırılma tokluğunu sırasıyla %2.45 ve %14.58 artırmıştır. Sıcaklığın $+20^{\circ}\text{C}$ 'den $+50^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmesinin etkisi oldukça fazla olmuştur ve kuvvet ile kırılma tokluğu değerleri %24.9 ve %141.25 oranlarında artış göstermiştir. Bu önemli artış, matrisin sıcaklık artışı ile daha sünek hale gelmesine ve hasara uğramadan önce daha fazla kalıcı şekil değişimi göstermesine bağlanmıştır. Sünek davranış sayesinde çatlak oluşumu daha geç meydana gelmektedir ve bu durum da maksimum kuvvet değerlerini yükselterek, kırılmaya karşı dirençte daha üstün performansı sağlamaktadır.

Farklı Sıcaklıklardaki DCB Testi Hasar Görüntüleri

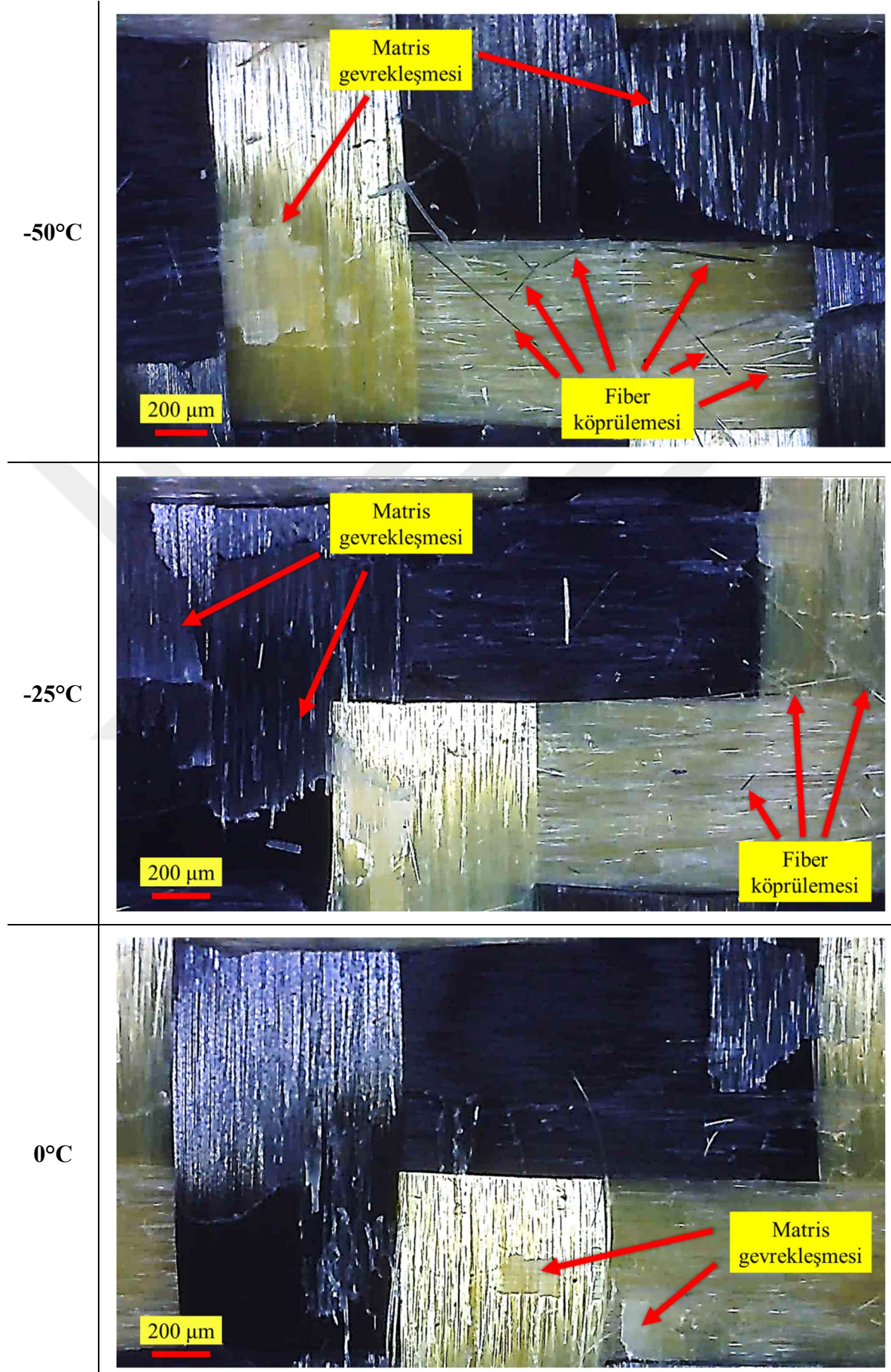
Şekil 4.21'de DCB özellikleri için test edilen numunelerin test sıcaklığına göre makro hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler, DCB testi sonrası ön çatlaktan ilerlemeye başlayan ve tamamen ayrılan numune yüzeylerinden alınmıştır.

Tabakalar arası ayrılma oluşurken, bazı fiberler tamamen kopmamış ve ayrılan yüzeyin iki tarafı arasında köprü gibi uzanarak çatlağın daha da ilerlemesini engellemeye çalışmıştır. Çatlak ilerlemesini yavaşlatan bu olay, fiber köprülemesi olarak bilinmektedir (Coronado ve ark., 2012). Çatlağın engellenmeye çalışılması ve daha yavaş ilerlemesi kırılma tokluğunu artıran bir mekanizma olarak değerlendirilmektedir.

DCB testi sonrası hasar görüntülerine bakıldığında ortam sıcaklığının artması ve azalması sonucu toklaştırma mekanizmalarında farklılıklar gözlenmiştir. Sıcaklığın azalması matrisin gevrek davranış göstermesine sebep olmuştur. Sıcaklık arttıkça matris sünekleşmiş ve daha fazla şekil değiştirerek fiberlere daha iyi tutunma sergilemiştir. Özellikle $+50^{\circ}\text{C}$ 'de matrisin sünek ayrılması görülmektedir.

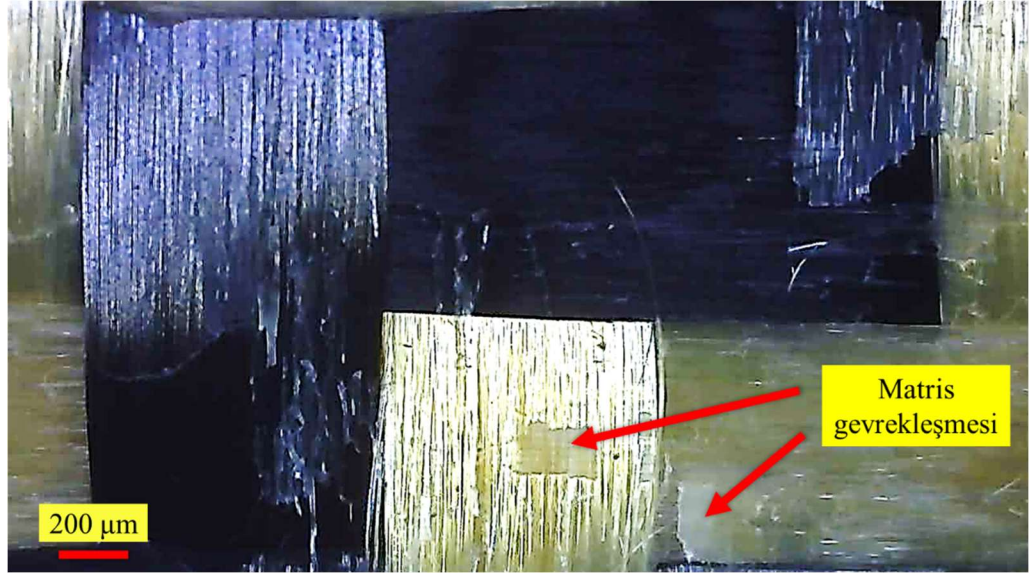
Test sıcaklığının azalmasının fiberler üzerindeki etkisi daha farklı olmuş ve fiber köprüleme davranışı gözlenmiştir. Görüntülerde kırılmış veya ayrılmış fiberler olarak tespit edilen fiber köprüleme mekanizması, -25 ve -50°C 'de görülmektedir. Bu mekanizmanın -50°C 'de daha fazla meydana geldiği de belirtilmelidir.

Hem matris sünekleşmesi hem de fiber köprülemesi mekanizmalarının gerçekleşmediği ya da çok az gerçekleştiği 0 ve $+25^{\circ}\text{C}$ 'de Mod-I kırılma tokluğu değerinin düşük olduğu tespit edilmiştir. -25 ve -50°C 'de fiber köprülemesi sonucu kırılma tokluğu artışı görülürken, $+50^{\circ}\text{C}$ 'de matrisin sünek davranışı kırılma performansını artırmıştır.

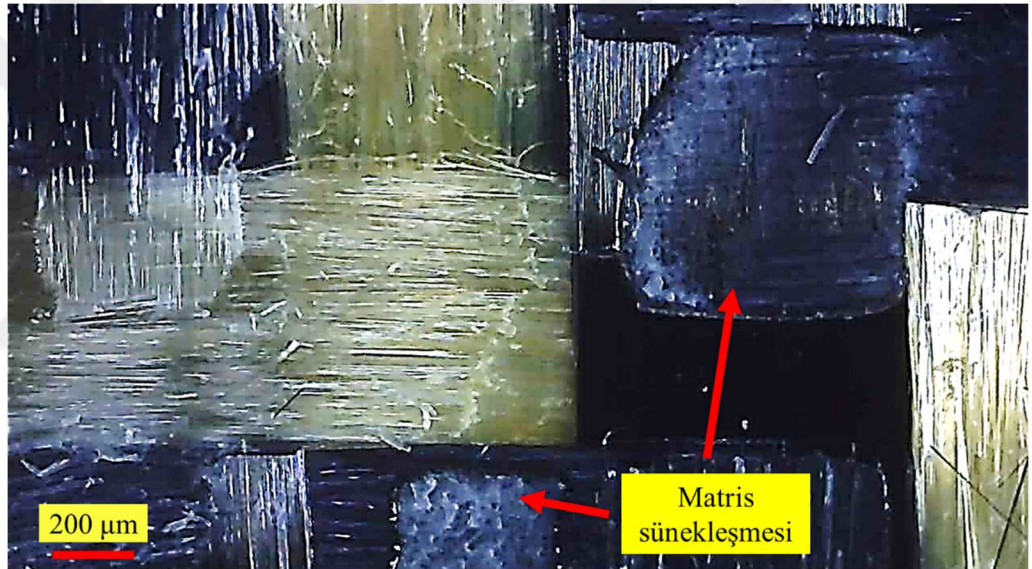


Şekil 4.21 Test sıcaklığına göre DCB testi sonrası makro hasar görüntüleri

+25°C



+50°C



Şekil 4.21 Test sıcaklığına göre DCB testi sonrası makro hasar görüntüleri (devamı)

4.2.1.5. Farklı Sıcaklıklardaki Sonuçların Değerlendirilmesi

Çekme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen çekme testlerinde, sıcaklık değişiminin matrisin polimerik yapısı ve fiber matris ara yüzey bağlanması üzerindeki etkisi nedeniyle numunelerin gerilme taşıma kapasitelerinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda matrisin sertleşmesi ve gevrekleşmesi, numunelerde rijitlik ve mukavemet artışı sağlarken, yüksek sıcaklıklarda matrisin yumuşaması ve sünekleşmesi gerilme taşıma kapasitesinde azalmaya sebep olmuştur. Düşük sıcaklıklar fiber ve matris arasındaki termal genleşme farkı nedeniyle, fiber matris ara yüzey bağlanmasını zayıflatırsa da matrisin gevrekleşmesi ile numunelerin rijitlik ve mukavemetindeki baskın

artış, toplam çekme performansının yükselmesini sağlamıştır (Zhang ve ark., 2016; Bang ve ark., 2022).

Çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre, en yüksek çekme performansının -50°C test sıcaklığında ortaya çıkması, Elium matrisli hibrit kompozitlerin düşük sıcaklık uygulamaları için umut vadeden bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Eğilme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen üç nokta eğilme testleri, Elium matrisli hibrit kompozitlerin eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülünde sıcaklığa bağlı önemli değişimler olduğunu göstermiştir. Eğilme testi, numunelerin üst tarafında basma ve alt tarafında çekme gerilmeleri oluşturması nedeniyle, çekme testine kıyasla daha karmaşık gerilme davranışını yansıtmaktadır.

Çekme testinde olduğu gibi eğilme testlerinde de düşük sıcaklıklar, matrisin gevrekleşmesine sebep olarak daha fazla gerilme taşıma kapasitesi değerlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Düşük sıcaklıklardaki eğilme testlerinde, çekmeye göre daha yüksek performans artışı gözlenmiştir. Eğilme testi, numunenin aynı anda hem basma hem de çekme gerilmelerine maruz kalmasını gerektirdiğinden, düşük sıcaklıklarda termoplastik Elium matrisinin rijitliğinde meydana gelen artış, eğilme performansındaki belirgin iyileşmenin temel nedeni olarak değerlendirilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda sünekleşen matris, hem basma hem de çekme bölgelerinde gerilmeleri transfer ederken daha düşük performans göstermiştir (Jia ve ark., 2018).

Eğilme testlerinden elde edilen sonuçlara göre, en yüksek eğilme performansı -50°C test sıcaklığında kaydedilmiştir. Bu durum, Elium matrisli hibrit kompozitlerin düşük sıcaklık ortamlarında eğilme gerilmelerine karşı yüksek direnç gösterdiğini ve bu tür koşullar için uygun bir malzeme olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda gözlemlenen performans düşüşü, bu kompozitlerin +50 °C ve üzerindeki eğilme uygulamalarında verimliliğinin azalabileceğini göstermektedir.

SENB Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SENB testleri, malzemedeki bir çatlakın ilerlemesine karşı gösterdiği direnci değerlendirmektedir. Kırılma tokluğu, hem matrisin hem de fiber matris ara yüzey bağlanmasının çatlak ilerlemesini engelleme performansını ölçen karmaşık bir özelliktir.

SENB testlerinden elde edilen sonuçlara göre, en yüksek çatlak ilerlemesi direnci ve maksimum kuvvet -50°C test sıcaklığında kaydedilmiştir. Bu durum, Elium matrisli

hibrit kompozitlerin düşük sıcaklık ortamlarında çatlak ilerlemesine karşı önemli bir dayanım sergilediğini ortaya koymaktadır. Düşük sıcaklıklarda Elium matrisinin artan rijitliği ve gevrekleşmesi, çatlak ilerlemeden önce daha yüksek kuvvetlerin taşınmasını ve dolayısıyla daha fazla enerji depolanmasını, yani yüksek kırılma tokluğu sergilenmesini sağlamıştır. Ancak, depolanan bu yüksek enerji, çatlak başladığında matrisin gevrekleşmesi nedeniyle daha az kontrollü, daha uzun ve keskin kenarlı bir yolla ilerleme eğiliminde olmuştur. Sıcaklık artışıyla birlikte gözlemlenen kırılma tokluğundaki düşüş ise matrisin yumuşaması ve sünekleşmesinin çatlak ilerleme mekanizmaları üzerindeki olumsuz etkisini yansıtmaktadır (Cadieu ve ark., 2021).

DCB Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

DCB testlerinde, Elium matrisli aramid/karbon hibrit kompozitlerin tabakalar arası ayrılma davranışını ve Mod-I kırılma tokluğunu farklı sıcaklıklar altında incelenmiştir. Diğer mekanik testlerin aksine, DCB testlerinde hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda Mod-I kırılma tokluğunda artış gözlenmiştir.

Diğer mekanik testlerde olduğu gibi düşük sıcaklıklar, DCB testlerinde de matrisin gevrekleşmesine sebep olmuştur ve tabakalar arası ara yüzeydeki çatlak ucunda biriken enerjinin daha yüksek olmasına olanak tanıyarak daha yüksek kuvvet taşıma kapasitesi sağlamıştır. Matrisin gevrekleşmesi, aynı zamanda çatlak ilerlemesi sırasında matristen ayrılan veya matris içinden geçen fiberlerin çatlak boyunca köprüleme yapma eğilimini artırmıştır. Fiber köprülemesi olarak adlandırılan bu olay, çatlak ilerlemesine karşı önemli bir direnç mekanizması olup, çatlak yüzeylerinin ayrılmasını geciktirerek ve yükü çatlak ilerleme bölgesine doğru yayarak enerji yutulmasını artırmaktadır. Bu durum, DCB testlerinde gözlemlenen Mod-I kırılma tokluğundaki artışı açıklamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise Elium matrisinin yumuşaması ve sünekleşmesi görülmektedir. Sünekleşen matris, çatlak ilerlemesi sırasında daha fazla kalıcı şekil değiştirme sergilemiştir. Bu da, daha az kuvvet taşınmasına rağmen numunelerin Mod-I kırılma tokluğunu artırmıştır (Coronado ve ark., 2012; Han ve ark., 2022).

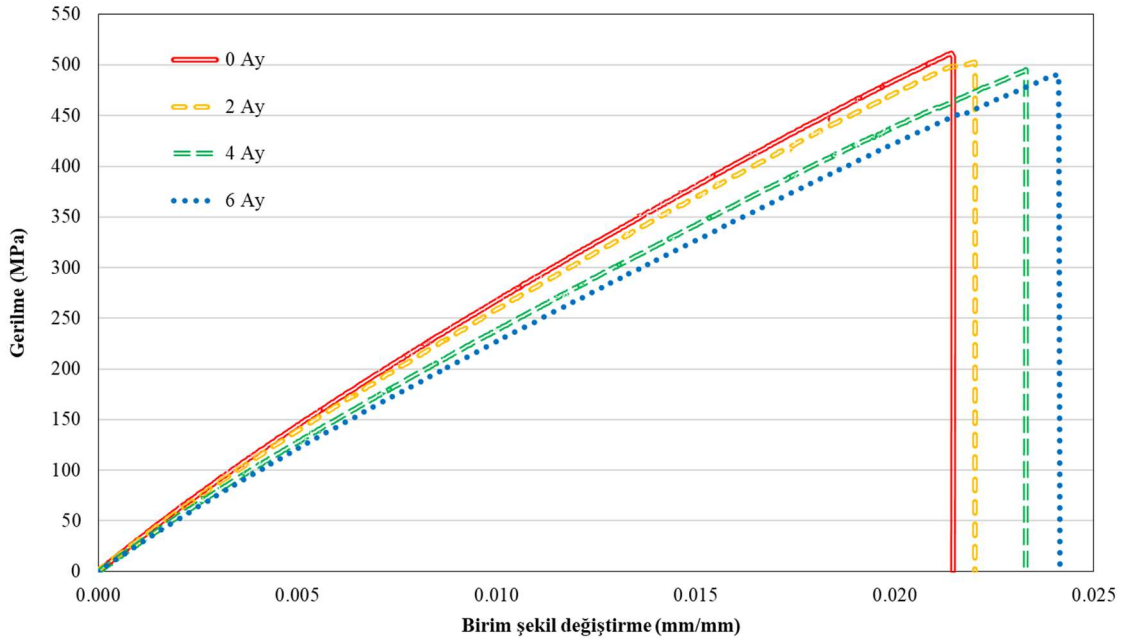
DCB testlerinden elde edilen sonuçlar, tabakalar arası ayrılma davranışının hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda olumlu etkilendiğini net bir şekilde göstermektedir. Bu davranış, Elium matrisli hibrit kompozitlerin sıcaklığa bağlı olarak farklı mekanizmalarla enerji yutma yeteneğinin değişmesiyle açıklanmıştır. Bu bulgu, Elium kompozitlerin geniş bir sıcaklık aralığında tabakalar arası bütünlük açısından güvenilir performans sergileyebileceğine işaret etmektedir.

4.2.2. Numunelere Uygulanan Saf Su Yaşlandırmasının Etkisi

Numunelerin su ortamında bekletilmesi sonucunda mekanik davranışlarını anlamak için numuneler saf su içerisine koyulmuştur. Önce, suda yaşlandırılmamış numunelere çekme, eğilme ve kırılma testleri uygulanmıştır. Yaşlandırılmamış numuneler test edildikten sonra aynı testler 2, 4 ve 6 ay boyunca suda yaşlandırılan numunelere uygulanmıştır. Yaşlandırılmamış numunelerin sonuçları ile yaşlandırılan numunelerin test sonuçları karşılaştırılmıştır. Aşağıda sunulan şekil ve tablolarda, yaşlandırılmamış numuneler suda beklemenin hiç olmaması anlamında ‘0 ay’ kodu ile ifade edilmiştir.

4.2.2.1. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Çekme Testi Sonuçları

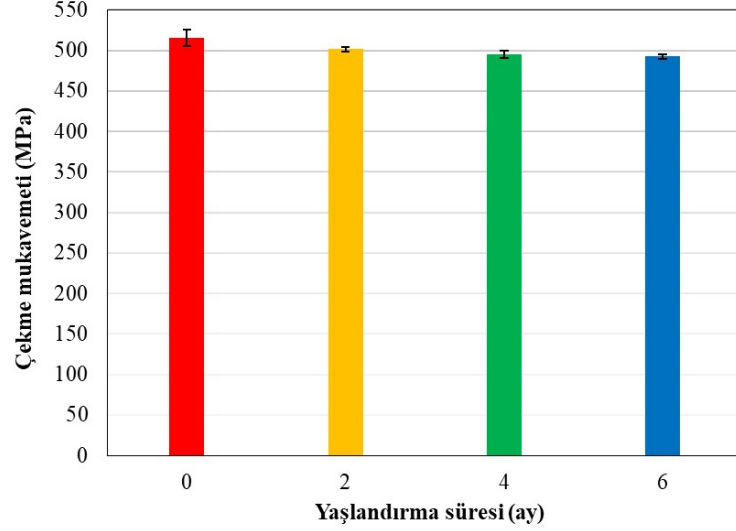
Çekme testleri, yaşlandırılmamış ve 2, 4, 6 ay yaşlandırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.22’de gösterilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri, her bir yaşlandırma süresi için ortalamaya en yakın sonuçları sunan belirli bir numuneye aittir. Bu eğrilerden, yaşlandırma süresi arttıkça çekme mukavemetinin azaldığı ve birim şekil değiştirmenin arttığı açıkça görülmektedir.



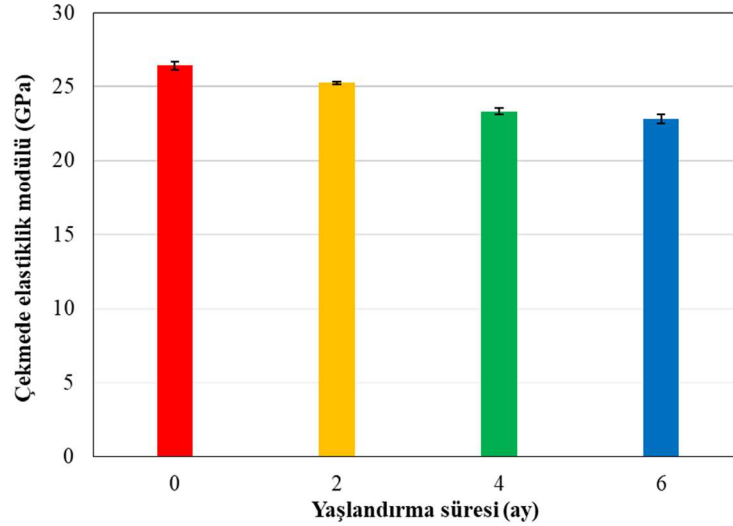
Şekil 4.22 Yaşlandırma süresine göre çekmede gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Numunelerin yaşlandırma süresine göre ortalama çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülü değerleri sırasıyla Şekil 4.23 ve 4.24’te gösterilmiştir. Yaşlandırılmamış numunelerde 515.37 MPa olan çekme mukavemeti, 2 ay yaşlandırma sonrası %2.68 azalarak 501.56 MPa’ya, 4 ay yaşlandırma sonrası %1.25 daha azalarak

495.12 MPa'ya ve 6 ay yaşlandırma sonrası %0.48 daha azalarak 492.68 MPa'ya düşmüştür. Benzer şekilde, yaşlandırılmamış numunelerde 26.42 GPa olan çekmede elastiklik modülü, 2 ay yaşlandırma sonrası %4.40 azalarak 25.26 GPa'ya, 4 ay yaşlandırma sonrası %7.29 daha azalarak 23.33 GPa'ya ve 6 ay yaşlandırma sonrası %1.91 daha azalarak 22.83 GPa'ya düşmüştür. Test edilen tüm yaşlandırma sürelerinde en düşük performans 6 ay sonunda gözlenmiştir.



Şekil 4.23 Yaşlandırma süresine göre ortalama çekme mukavemeti değerleri



Şekil 4.24 Yaşlandırma süresine göre ortalama çekmede elastiklik modülü değerleri

Numunelerin yaşlandırma süresine göre ortalama çekme testi sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir. Tablodaki değişim değerleri yaşlandırılmamış numuneler referans alınarak hesaplanmıştır. Yaşlandırılmamış numunelerde 0.0217 mm/mm olan maksimum birim şekil değiştirme, 6 ay yaşlandırma sonrası %9.63 artarak 0.0238 mm/mm'ye yükselmiştir. Ayrıca, 6 ay yaşlandırma sonrası çekme mukavemetinde %4.40 ve çekmede

elastiklik modülünde %13.60'lık bir azalma gözlenmiştir. Çekmede tokluk değerlerine bakılınca, yaşlandırmanın olumlu bir etki yaptığı görülmektedir. Yaşlandırılmamış numunelerde 5.82 N.mm/mm³ olan çekmede tokluk, 6 ay yaşlandırma sonrasında %5.73 artış göstererek 6.15 N.mm/mm³ değerine ulaşmıştır. Bu tokluk artışı, birim şekil değiştirmedeki belirgin artış ile ilişkilendirilmiştir. Yaşlandırma sonucunda çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülünde düşüşler yaşanmasına rağmen birim şekil değiştirmedeki %9.63'lük artış, çekmede tokluk artışını sağlamıştır.

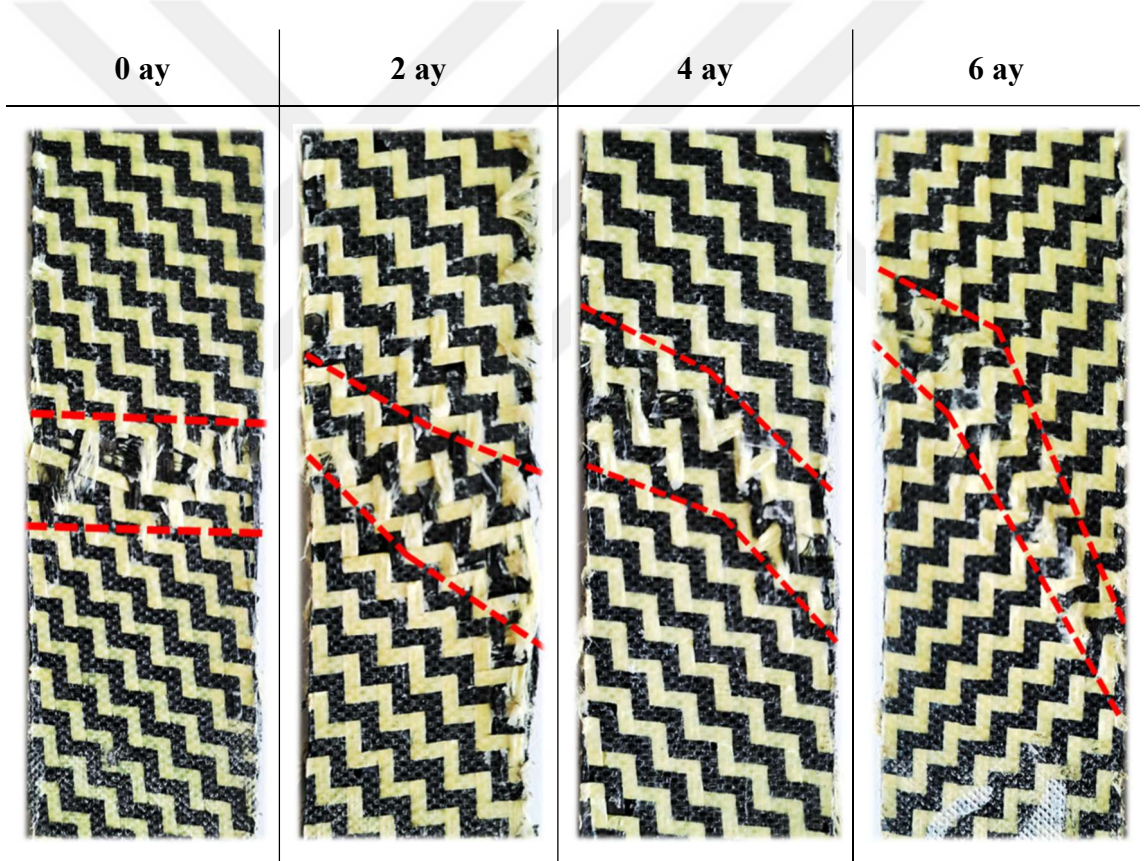
Tablo 4.7. Yaşlandırma süresine göre ortalama çekme testi sonuçları

Yaşlandırma süresi	Çekme mukavemeti	Çekme mukavemeti değişimi	Maksimum birim şekil değiştirme	Maksimum birim şekil değiştirme değişimi	Çekmede elastiklik modülü	Çekmede elastiklik modülü değişimi	Çekmede tokluk	Çekmede tokluk değişimi
Ay	MPa	%	mm/mm	%	GPa	%	N.mm/mm ³	%
0	515.37 ± 9.69	-	0.0217 ± 0.0005	-	26.42 ± 0.28	-	5.82 ± 0.19	-
2	501.56 ± 2.85	- 2.68	0.0220 ± 0.0003	+ 1.47	25.26 ± 0.11	- 4.40	5.97 ± 0.13	+ 2.60
4	495.12 ± 4.74	- 3.93	0.0235 ± 0.0001	+ 8.30	23.33 ± 0.21	- 11.70	6.08 ± 0.12	+ 4.47
6	492.68 ± 2.82	- 4.40	0.0238 ± 0.0003	+ 9.63	22.83 ± 0.30	- 13.60	6.15 ± 0.18	+ 5.73

Agarwal ve ark. (2023) 6 ay yaşlandırma sonrasında aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerde çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülünde %17.31 ve %16.28 oranında azalma tespit etmiştir. Uzun süreli su yaşlandırması sonucunda çekme mukavemetinin değişiminin incelendiği diğer araştırmalarda ise Devine ve ark. (2023) 5 ay yaşlandırma sonunda cam fiber takviyeli Elium kompozitlerde %11, Hussnain ve ark. (2024) 135 gün yaşlandırma sonunda cam fiber takviyeli Elium kompozitlerde %10.2 ve Frej ve ark. (2021b) 40 gün yaşlandırma sonunda karbon fiber takviyeli Elium kompozitlerde %10.84 oranında azalma tespit etmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, Elium matrisli aramid/karbon hibrit fiber takviyeli kompozitlerin yaşlandırma sonrasında çekme özelliklerini korumada üstün performans gösterdiği söylenebilir.

Yaşlandırma Sonrası Çekme Testi Hasar Görüntüleri

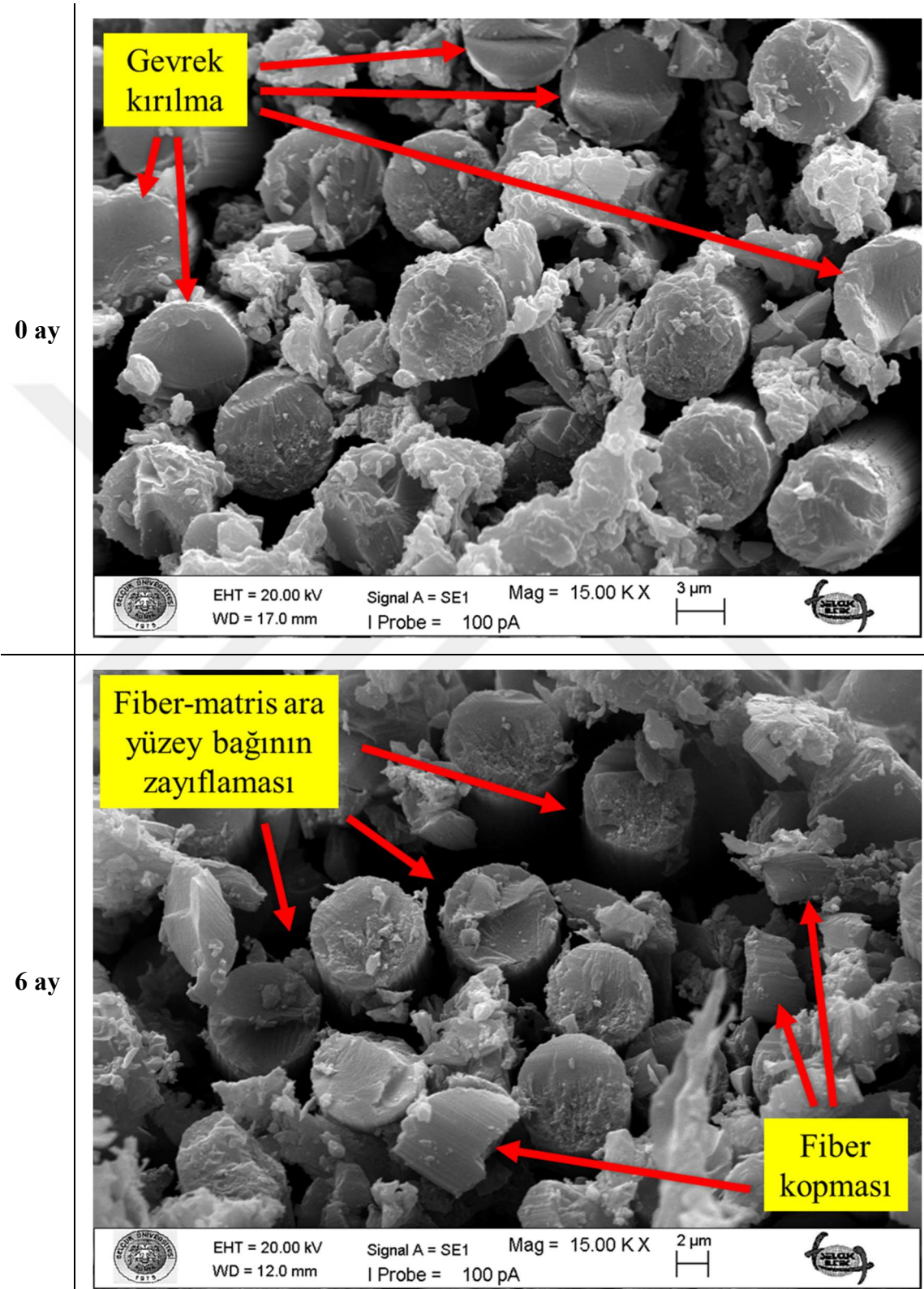
Şekil 4.25'te çekme özellikleri için test edilen numunelerin yaşlandırma süresine göre makro hasar görüntüleri verilmiştir. Hasar bölgeleri her numunede açıkça görülmektedir, ancak fiberler kopmuş olmasına rağmen kırılan yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmamıştır. Numunelerde farklı açılarda çatlaklar, ayrılmalar ve fiber kopmaları görülmektedir. ASTM D3039'da yer alan hasar tipi ve kodları açısından inceleme yapıldığında, yaşlandırılmamış numuneler yatay ayrılma gösterirken (LGM tipi: Lateral-Gage-Middle) 2, 4 ve 6 ay yaşlandırılmış numuneler açısallı ayrılmalar (AGM tipi: Angled-Gage-Middle) göstermiştir. Yaşlandırma süreci, numunelerin hasar davranışında değişikliğe neden olmuştur ve bu değişiklikle birlikte çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülünde azalma ve birim şekil değiştirmede artış gözlenmiştir.



Şekil 4.25 Yaşlandırma süresine göre çekme testi sonrası makro hasar görüntüleri

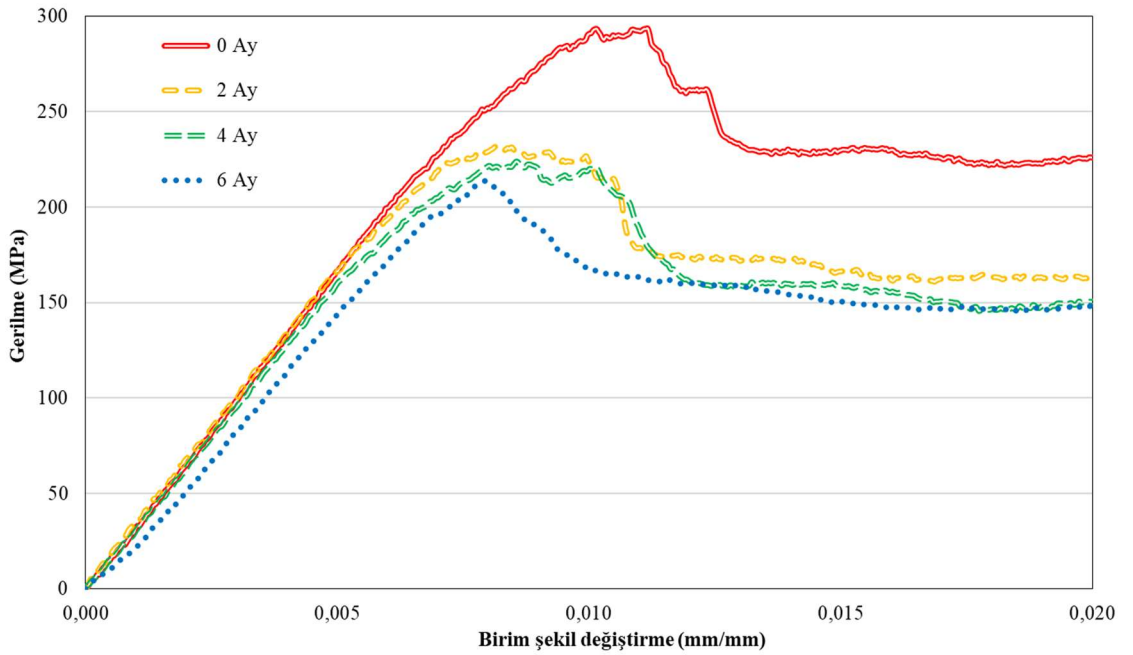
Hasar davranışındaki değişimin nedenini anlamak için yaşlandırılmamış ve 6 ay yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmıştır ve Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Her iki görüntüde de fiberlerin kopması açıkça görülmektedir. Yaşlandırılmamış kompozitlerin görüntüsü daha iyi fiber matris ara yüzey bağlanması ve keskin yüzeyle kırılan daha gevrek kırılma davranışı sergilemektedir (Medeiros ve ark., 2019; Alsaadi ve ark., 2020). 6 ay yaşlandırılmış numunede ise zayıf

fiber matris ara yüzey bağlanmasının bir sonucu olarak fiber kopmaları ve daha sünek kırılma davranışı görülmektedir (Agarwal ve ark., 2023; Priyanka ve ark., 2023).



4.2.2.2. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Eğilme Testi Sonuçları

Üç nokta eğilme testleri, yaşlandırılmamış ve 2, 4, 6 ay yaşlandırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.27'de gösterilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri, her bir yaşlandırma süresi için ortalama en yakın sonuçları sunan belirli bir numuneye aittir ve 0.020 mm/mm birim şekil değiştirme değerine kadar olan bölge dikkate alınmıştır. Bu eğrilerden, yaşlandırma süresi uzadıkça maksimum gerilme değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Özellikle, su emmenin en fazla gerçekleştiği periyot olan ilk 2 ay yaşlandırma sonrası önemli bir azalma dikkat çekmektedir.

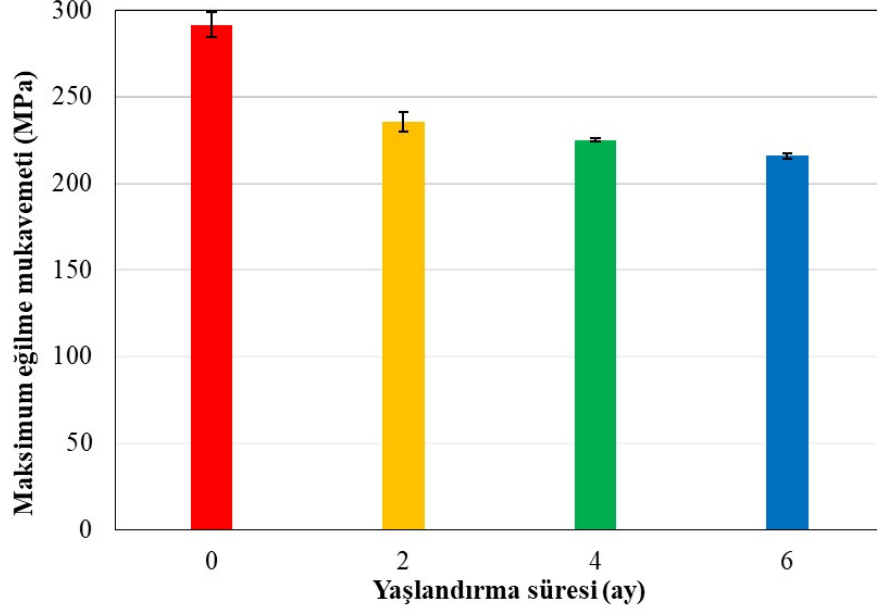


Şekil 4.27 Yaşlandırma süresine göre eğilmede gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

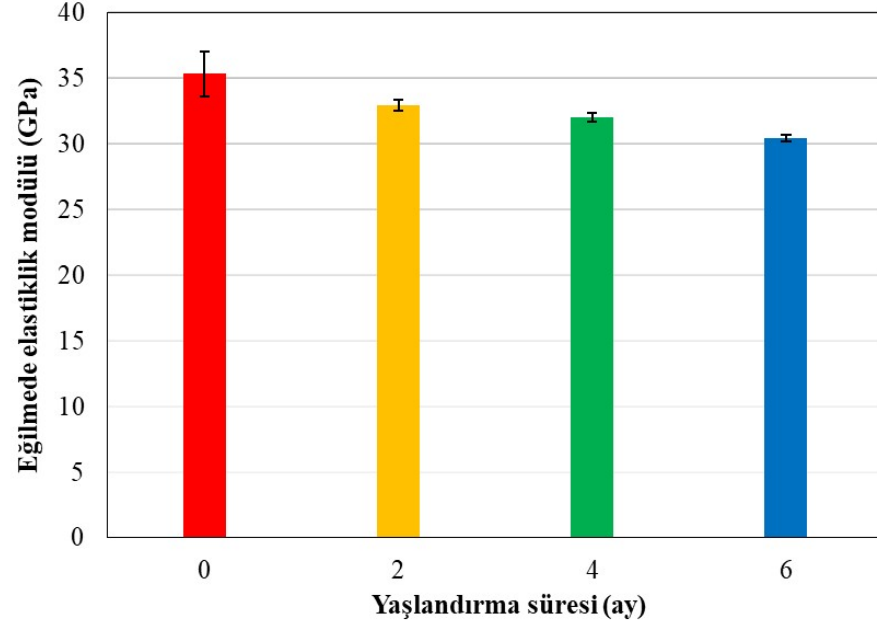
Numunelerin yaşlandırma süresine göre ortalama maksimum eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülü değerleri sırasıyla Şekil 4.28 ve 4.29'da gösterilmiştir. Ortalama eğilme testi sonuçları ise Tablo 4.8'te verilmiştir. Tablodaki değişim değerleri yaşlandırılmamış numuneler referans alınarak hesaplanmıştır.

Yaşlandırılmamış numunelerde 291.46 MPa olan maksimum eğilme mukavemeti, 2 ay yaşlandırma sonrası %19.18 azalarak 235.56 MPa'ya, 4 ay yaşlandırma sonrası %3.60 daha azalarak 225.06 MPa'ya ve 6 ay yaşlandırma sonrası %3.11 daha azalarak 216 MPa'ya düşmüştür. Yaşlandırılmamış numunelerde 35.34 GPa olan eğilmede elastiklik modülünde ise 2 ay yaşlandırma sonrası %6.81 azalarak 32.93 GPa'ya, 4 ay yaşlandırma sonrası %2.62 daha azalarak 32.01 GPa'ya ve 6 ay yaşlandırma sonrası

%4.49 daha azalarak 30.42 GPa'ya düşmüştür. Sonuç olarak, 6 ay yaşlandırma sonunda maksimum eğilme mukavemetinde %25.89 ve eğilmede modülünde %13.92'lik azalma gözlenmiştir



Şekil 4.28 Yaşlandırma süresine göre ortalama maksimum eğilme mukavemeti değerleri



Şekil 4.29 Yaşlandırma süresine göre ortalama eğilmede elastiklik modülü değerleri

Yaşlandırılmamış Elium matrisli aramid/karbon hibrit fiber takviyeli kompozitlerde elde edilen eğilme testi sonuçları, aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler ile karşılaştırıldığında yakın eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülü değerleri göstermektedir. Bu çalışmada, yaşlandırılmamış kompozitlerinde

eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülü 291.46 MPa ve 35.34 GPa olarak bulunmuştur. Aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerde ise, Sebaey ve Wagih (2019) 330.25 MPa, Rajasekar ve ark. (2018) 332.18 MPa, Priyanka ve ark. (2023) 335.72 MPa eğilme mukavemeti ve Samson ve ark. (2023) 30.9 GPa, Kim ve ark. (2023) 32.21 GPa, Girijappa ve ark. (2022) 37.12 GPa eğilmede elastiklik modülü değerleri tespit etmiştir.

Tablo 4.8. Yaşlandırma süresine göre ortalama eğilme testi sonuçları

Yaşlandırma süresi	Maksimum eğilme mukavemeti	Maksimum eğilme mukavemeti değişimi	Eğilmede elastiklik modül	Eğilmede elastiklik modülü değişimi
Ay	MPa	%	GPa	%
0	291.46 ± 7.15	-	35.34 ± 1.73	-
2	235.56 ± 5.83	- 19.18	32.93 ± 0.39	- 6.81
4	225.06 ± 1.10	- 22.78	32.01 ± 0.36	- 9.43
6	216.00 ± 1.58	- 25.89	30.42 ± 0.24	- 13.92

Su yaşlandırması sonrasında Elium matrisli aramid/karbon hibrit fiber takviyeli kompozitlerde eğilme mukavemetinde %25.89 ve eğilmede elastiklik modülünde %13.92 azalma gözlenirken, Agarwal ve ark. (2023) 6 ay yaşlandırma sonrasında aramid/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerde bu değerleri %20.85 ve %19.44 olarak bulmuştur. Bu iki çalışmadaki sonuçlara göre, Elium ve epoksi kompozitlerin eğilmede benzer performans sergilediği söylenebilir.

Uzun süreli su yaşlandırması sonucunda eğilme performansının incelendiği diğer araştırmalarda, Hussnain ve ark. (2024) 135 gün yaşlandırma sonunda cam fiber takviyeli Elium kompozitlerin eğilme mukavemetinde sadece %1.9 azalma bulurken ve Devine ve ark. (2023) 5 ay yaşlandırma sonunda cam fiber takviyeli Elium kompozitlerde bu azalmayı %16 olarak tespit etmiştir. Yaşlandırma sonrası eğilme özelliklerindeki azalma göz önüne alındığında, aramid/karbon hibrit fiberin cam fibere göre daha fazla su emmesi nedeniyle daha fazla etkilendiği görülmektedir.

Yaşlandırma Sonrası Eğilme Testi Hasar Görüntüleri

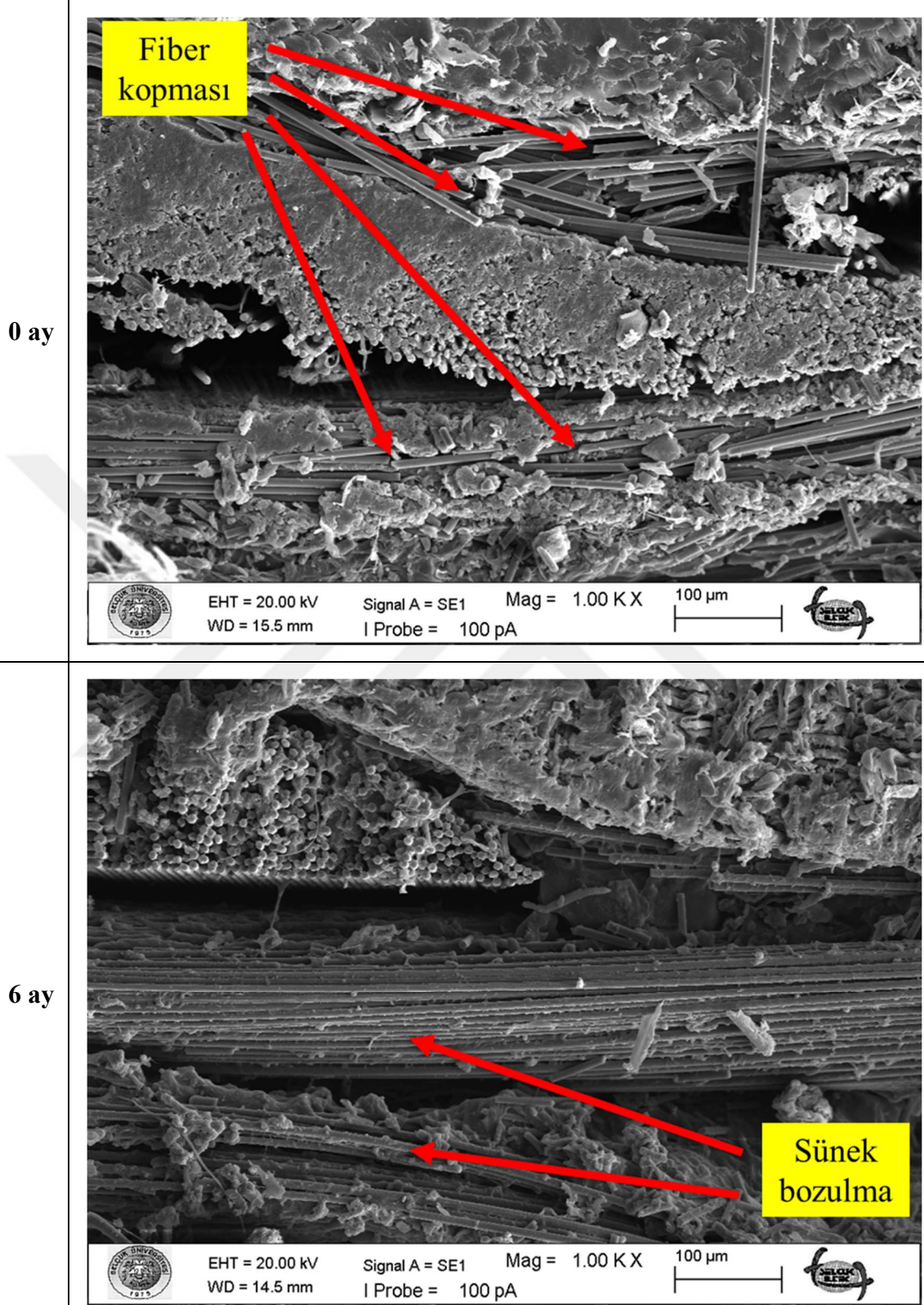
Şekil 4.30’da eğilme özellikleri için test edilen numunelerin yaşlandırma süresine göre makro hasar görüntüleri verilmiştir. Her bir yaşlandırma süresi için örnek bir makro görüntü verilmiştir. Tüm görüntülerde, üst taraf eğilme testi sırasında kuvvetin uygulandığı alanı temsil etmektedir. Buna göre, numunenin üst tarafında basma gerilmesi ve alt tarafında ise çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

Tüm numunelerin yükleme sonrası makro görüntüleri incelendiğinde, kalıcı şekil değiştirmenin oldukça düşük bir seviyede olduğu görülmektedir. Ancak, yaşlandırma süresi uzadıkça kalıcı şekil değiştirmenin arttığı da gözlenmiştir. Karbon fiber aramid fiberden daha kırılkan olduğu için geçici şekil değiştirme, aramid fiberin yapısına atfedilmiştir (Pincheira ve ark., 2018; Heitkamp ve ark., 2022). Ayrıca, numunelerin basma bölgesinde hasarın daha belirgin olduğu ve fiber kopması ile tabaka ayrılması olarak oluştuğu gözlenmiştir.

Eğilmede hasar davranışını incelemek için yaşlandırılmamış ve 6 ay yaşlandırılmış numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır ve Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Buna göre, yaşlandırılmamış numune fiber kopması ile daha gevrek bir davranış gösterirken, 6 ay yaşlandırılmış numuneler daha sünek bir hasar sergilemiştir (Priyanka ve ark., 2023). Bu sonuç, su yaşlandırmasının Elium matrisli aramid/karbon hibrit fiber takviyeli kompozitlerin sünekliğini arttırdığını göstermektedir.



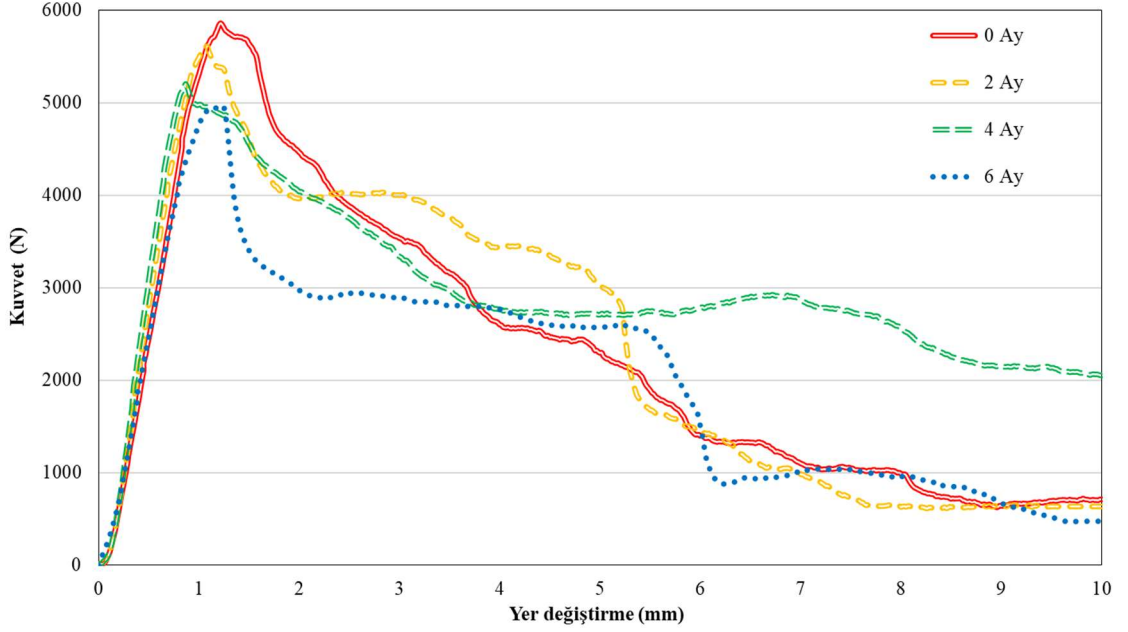
Şekil 4.30 Yaşlandırma süresine göre eğilme testi sonrası makro hasar görüntüleri



Şekil 4.31 Yaşlandırılmış numunelerin eğilme testi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri

4.2.2.3. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Tek Tarafı Çentikli Eğilme Testi Sonuçları

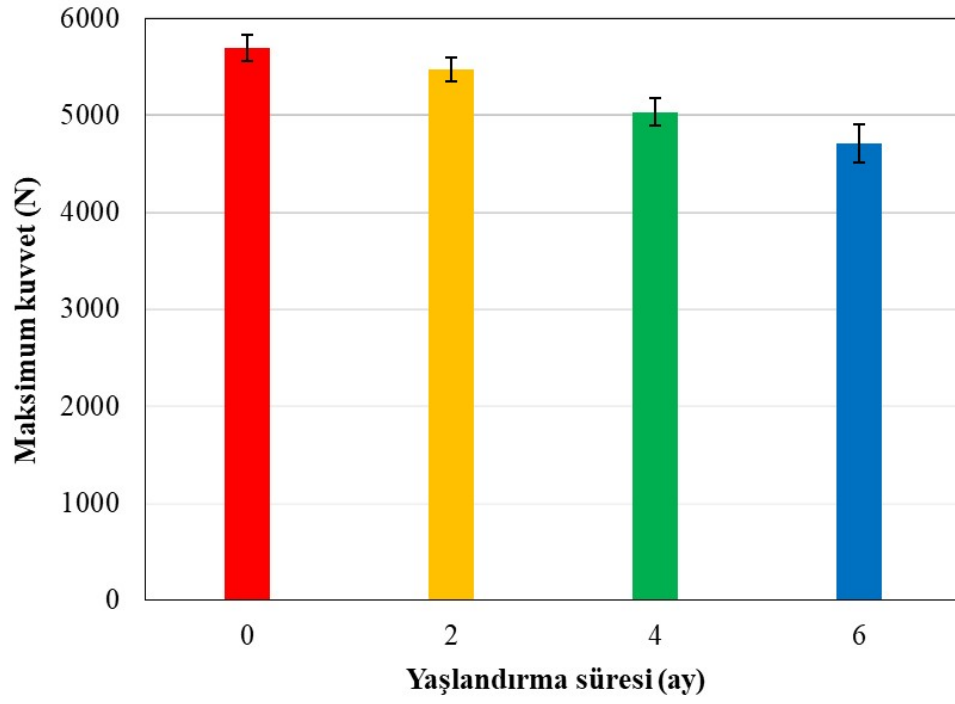
SENB testleri, yaşlandırılmamış ve 2, 4, 6 ay yaşlandırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir ve elde edilen kuvvet-çene yer değiştirmesi eğrileri Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Bu eğriler, her bir test sıcaklığı için ortalamaya en yakın ve benzer sonucu veren belirli bir numunenin değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre, yaşlandırma süresi arttıkça maksimum kuvvetin azaldığı açıkça görülmektedir.



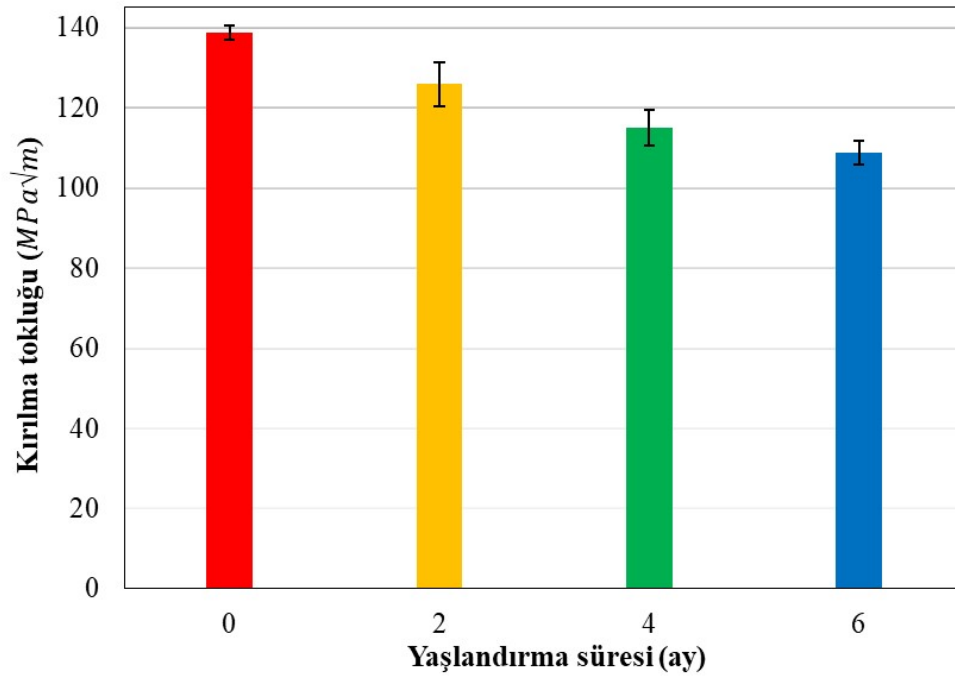
Şekil 4.32 Yaşlandırma süresine göre SENB testinde kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Numunelerin yaşlandırma süresine göre ortalama maksimum kuvvet ve kırılma tokluğu değerleri sırasıyla Şekil 4.33 ve 4.34'te gösterilmiştir. Ortalama SENB testi sonuçları ise Tablo 4.9'da verilmiştir. Tablodaki değişim değerleri yaşlandırılmamış numuneler referans alınarak hesaplanmıştır.

Yaşlandırılmamış numunelerde ortalama maksimum kuvvet 5694.55 N ve bu kuvvete göre hesaplanan ortalama kırılma tokluğu $138.83 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olmuştur. Maksimum kuvvet, 2 ay yaşlandırma sonrası %3.92 azalarak 5471.10 N'ye, 4 ay yaşlandırma sonrası %7.68 daha azalarak 5033.83 N'ye ve 6 ay yaşlandırma sonrası %5.59 daha azalarak 4715.55 N'ye düşmüştür. Kırılma tokluğu, 2 ay yaşlandırma sonrası %9.34 azalarak $125.86 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 'ye, 4 ay yaşlandırma sonrası %7.80 daha azalarak $115.03 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 'ye ve 6 ay yaşlandırma sonrası %4.42 daha azalarak $108.89 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 'ye düşmüştür. Sonuç olarak, 6 ay yaşlandırma sonunda maksimum kuvvet ve kırılma tokluğu sırasıyla %17.19 ve %21.56 azalmıştır.



Şekil 4.33 Yaşlandırma süresine göre ortalama maksimum kuvvet değerleri



Şekil 4.34 Yaşlandırma süresine göre ortalama kırılma tokluğu değerleri

Tablo 4.9. Yaşlandırma süresine göre ortalama SENB testi sonuçları

Yaşlandırma süresi	Maksimum kuvvet	Maksimum kuvvet değişimi	Kırılma tokluğu	Kırılma tokluğu değişimi
Ay	N	%	$MPa\sqrt{m}$	%
0	5694.55 ± 134.64	-	138.83 ± 1.74	-
2	5471.10 ± 126.45	- 3.92	125.86 ± 5.44	- 9.34
4	5033.83 ± 137.33	- 11.60	115.03 ± 4.33	- 17.14
6	4715.55 ± 196.80	- 17.19	108.89 ± 2.93	- 21.56

Wagih ve ark. (2024) aramid ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler üretmiştir. Üretim dış katmanlarda tek kat karbon fiber ve orta katmanlarda dört kat aramid fiber tabaka olacak şekilde yapılmıştır. Yoğunluğu 1.28 g/cm^3 ve fiber hacim oranı %42 olan numunelerin kalınlığı 3 mm'dir. Bu numunelere SENB testi uygulanmış ve $222 \text{ MPa}\sqrt{m}$ kırılma tokluğu elde edilmiştir. Bu kırılma tokluğu değeri, bu çalışmada aramid/karbon fiber takviyeli Elium kompozitlerden elde edilen kırılma tokluğundan oldukça yüksektir. Ancak, her iki çalışmadaki kompozitin hibrit katman yapısı ve fiziksel özellikleri farklıdır. Wagih ve ark. interply hibrit kompozitler üretirken bu çalışmada katman içi hibrit numuneler test edilmiştir. Bununla birlikte, sadece bu iki sonucu karşılaştırmanın doğru bir değerlendirme yapmak için yeterli olmadığı unutulmamalıdır, çünkü birçok çalışma Elium kompozitlerin kırılma davranışının epoksi kompozitlerden daha üstün olduğunu göstermiştir (Obande ve ark., 2019b; Han ve ark., 2022; Bhudolia ve ark., 2023).

Uzun süreli su yaşlandırması sonucunda kırılma performansını incelendiği diğer araştırmalarda, Bandaru ve ark. (2022) 60 gün yaşlandırma sonunda cam fiber takviyeli Elium kompozitlerin kırılma tokluğunda %36.95, Ulus ve ark. (2022) bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin 6 ay deniz suyu yaşlandırmasından sonra kırılma tokluğunda ise %36.2 azalma bulmuştur. Su yaşlandırması sonrası kırılma

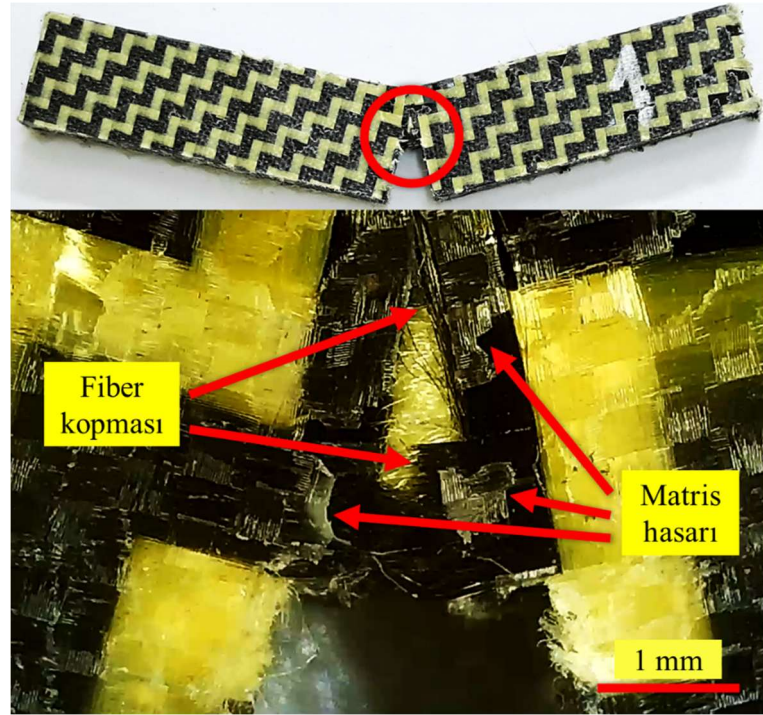
performansındaki azalma göz önüne alındığında önemli bir değişim gözlenmektedir ve dikkate alınması gereken bir nokta olarak değerlendirilmelidir.

Yaşlandırma Sonrası SENB Testi Hasar Görüntüleri

Şekil 4.35'te SENB özellikleri için test edilen numunelerin yaşlandırma süresine göre makro hasar görüntüleri verilmiştir. Her bir yaşlandırma süresi için önce makro görüntü verilmiştir. Sonra, makro görüntüde kırmızı ile işaretlenmiş hasar bölgesinin detay görüntüsü sunulmuştur. Detay görüntüler, hasar meydana gelirken matrisin bozulduğunu ve fiber kopmasının oluştuğunu göstermektedir. Ancak, yaşlandırma süresi arttıkça önemli bir değişiklik gözlenmediği de belirtilmelidir.

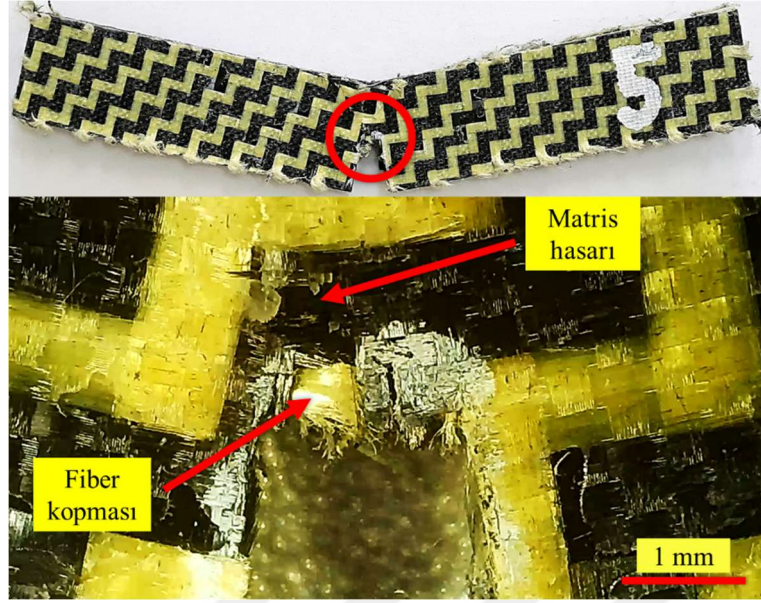
SENB testinde hasar davranışını incelemek için yaşlandırılmamış ve 6 ay yaşlandırılmış numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır ve Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Yaşlandırılmamış numune çoklu ve keskin uçlu gevrek çatlak ilerlemesi gösterirken, 6 ay yaşlandırmadan sonra tek ve geniş çatlak oluşmuştur (Zhou ve ark., 2017). Çekme ve eğilme testlerine benzer şekilde, bu durum kompozitlerin yaşlandırma sonrası daha sünek bir yapıya sahip olmasına bağlanmıştır. En büyük çatlak uzunlukları ölçüldüğünde ise yaşlandırılmamış ve 6 ay yaşlandırılmış numunelerde sırasıyla 4.5 mm ve 4.23 mm olarak elde edilmiştir.

0 ay



Şekil 4.34 Yaşlandırma süresine göre SENB testi sonrası makro hasar görüntüleri

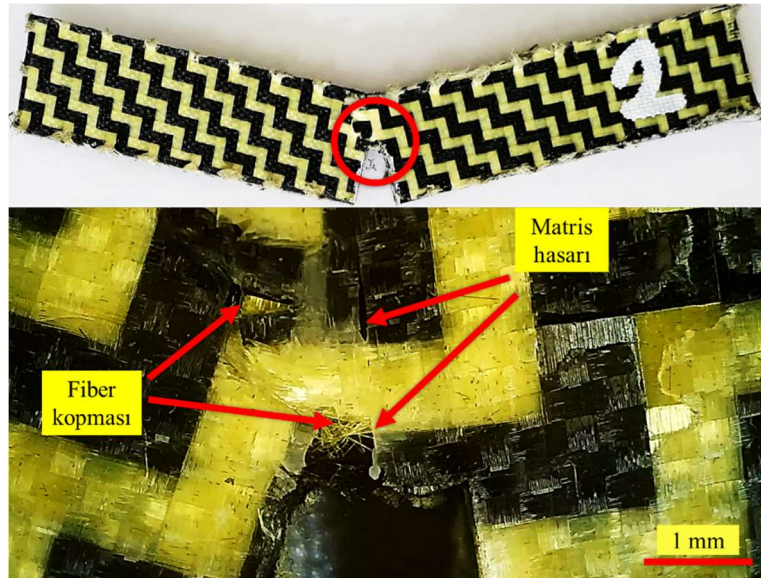
2 ay



4 ay

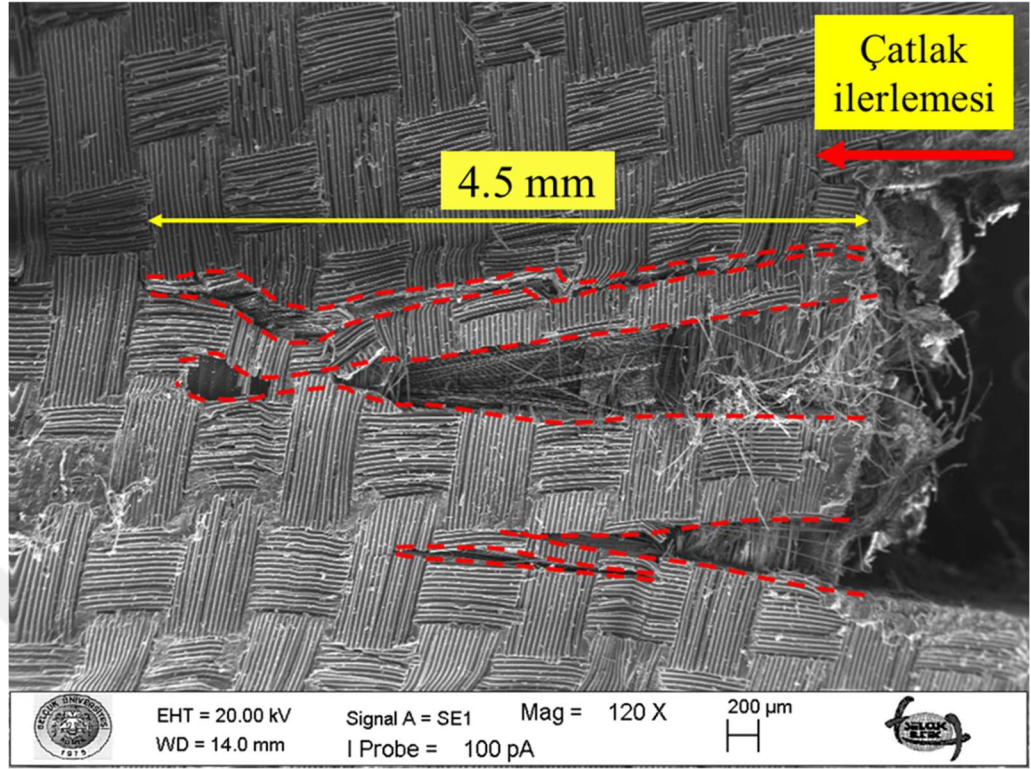


6 ay

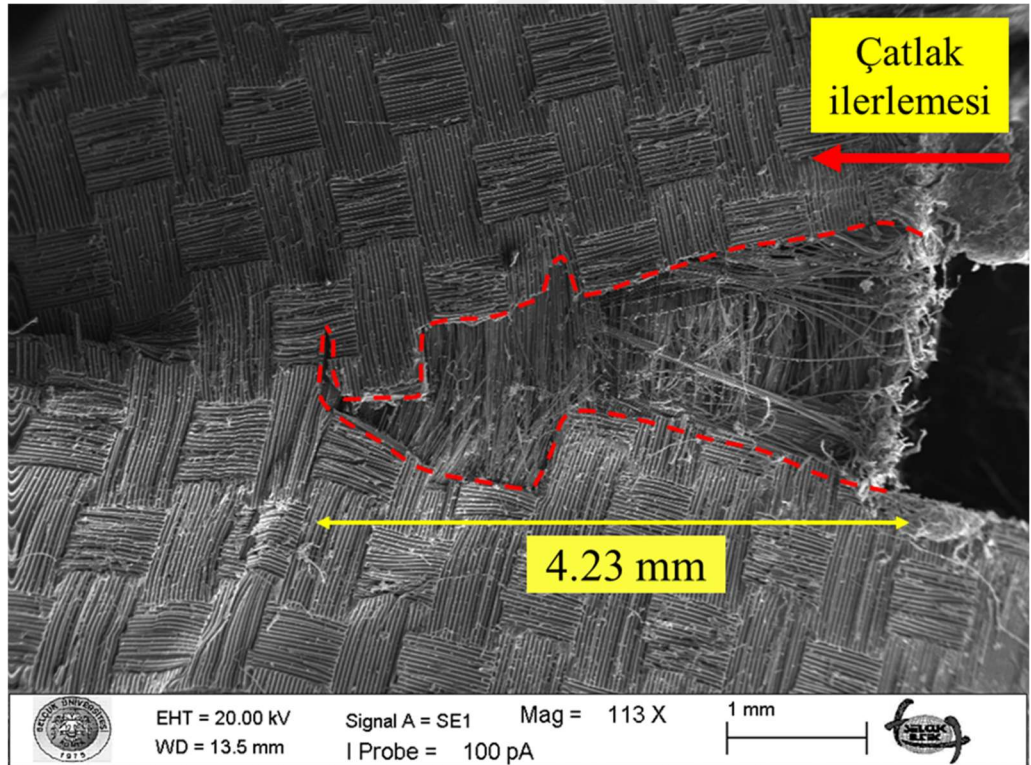


Şekil 4.35 Yaşlandırma süresine göre SENB testi sonrası makro hasar görüntüleri (devamı)

0 ay



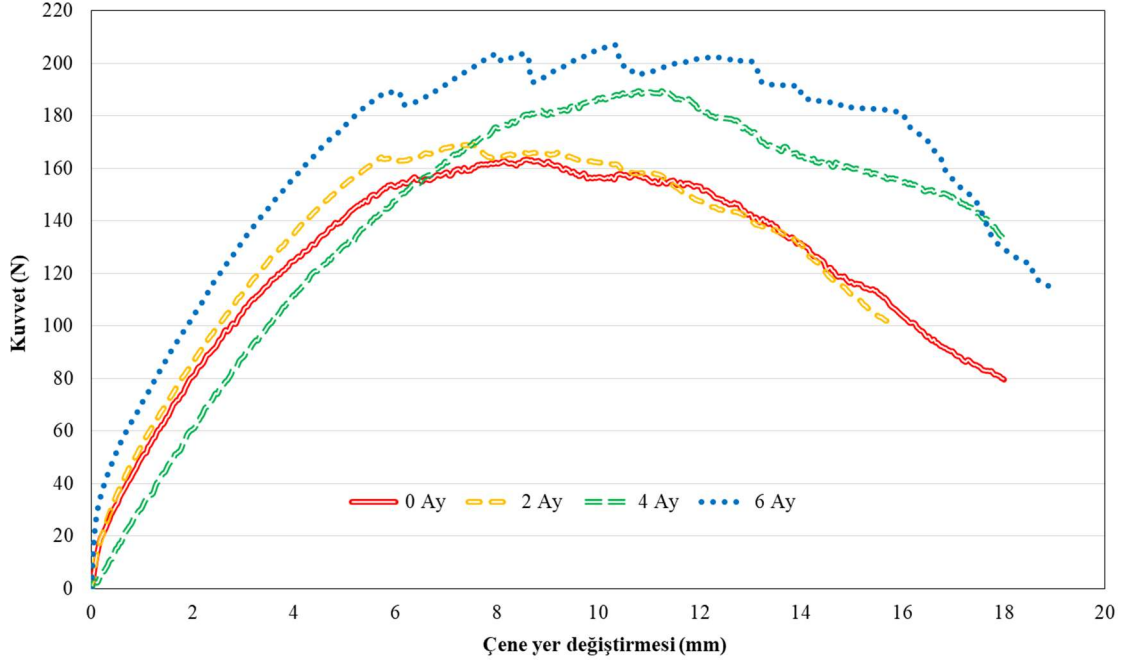
6 ay



Şekil 4.36 Yaşlandırılmış numunelerin SENB testi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri

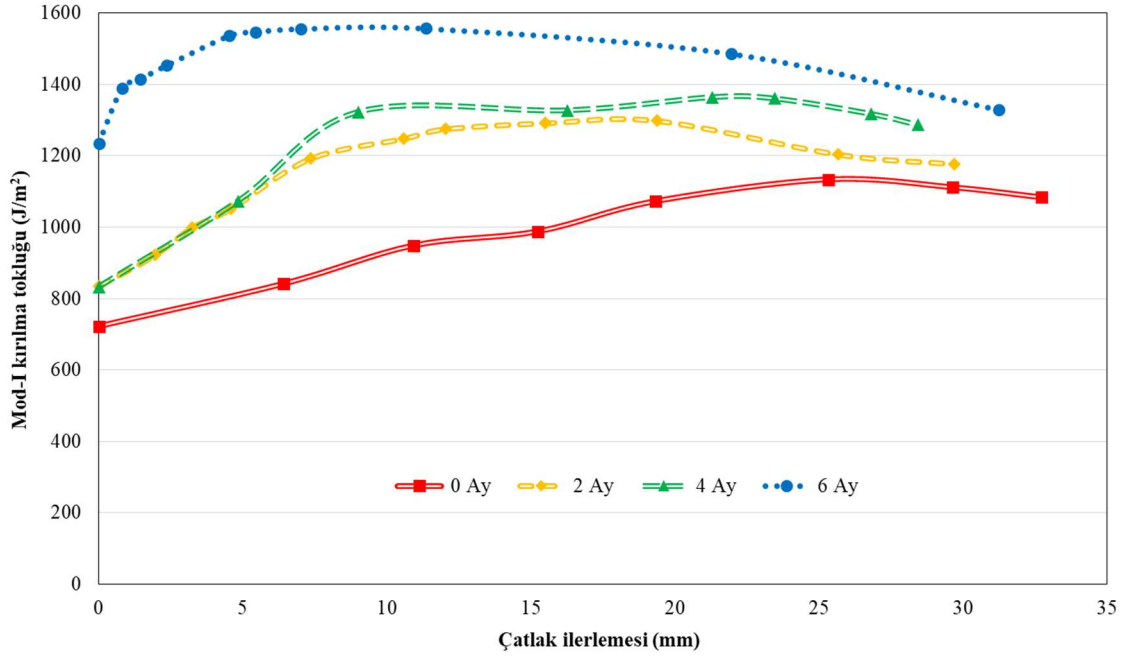
4.2.2.4. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Çift Ankastre Kiriş Testi Sonuçları

DCB testleri, yaşlandırılmamış ve 2, 4, 6 ay yaşlandırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir ve elde edilen kuvvet-çene yer değiştirmesi eğrileri Şekil 4.37'de gösterilmiştir. Bu eğriler, her bir yaşlandırma süresi için ortalamaya en yakın ve benzer sonucu veren belirli bir numunenin değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre, yaşlandırma süresi arttıkça kuvvet değerlerinin arttığı açıkça görülmektedir.



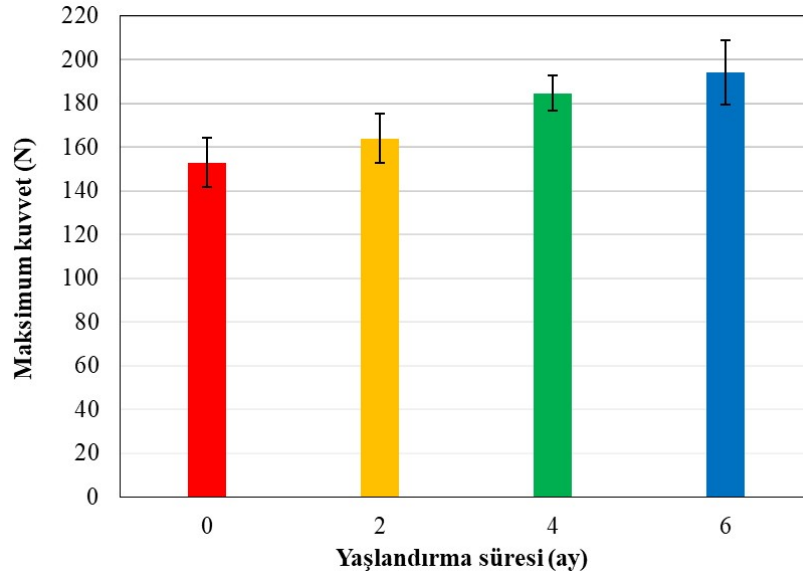
Şekil 4.37 Yaşlandırma süresine göre DCB testinde kuvvet-çene yer değiştirmesi eğrileri

Şekil 4.38'de yaşlandırma süresine göre Mod-I kırılma tokluğu-çatlak ilerlemesi eğrileri verilmiştir. Kuvvet-çene yer değiştirmesi eğrilerine benzer şekilde, bu eğrilerde de yaşlandırma süresinin kırılma tokluğu değerlerini artıracak bir etki gerçekleştirdiği görülmektedir. Yaşlandırılmamış numunelerde kırılma tokluğu, çatlak ilerlemesi arttıkça yükselirken, 2 ve 4 ay yaşlandırılmış numunelerde çatlak ilerlemeye başladıktan sonra artış görülmüştür ve sonrasında daha az değişkenlik gösteren bir davranış olmuştur. 6 ay yaşlandırılmış numunelerde ise çatlak ilerlemesi başlangıcında kırılma tokluğu artış göstermiştir ve çatlak ilerlemeye devam ederken azalma sergilemiştir.

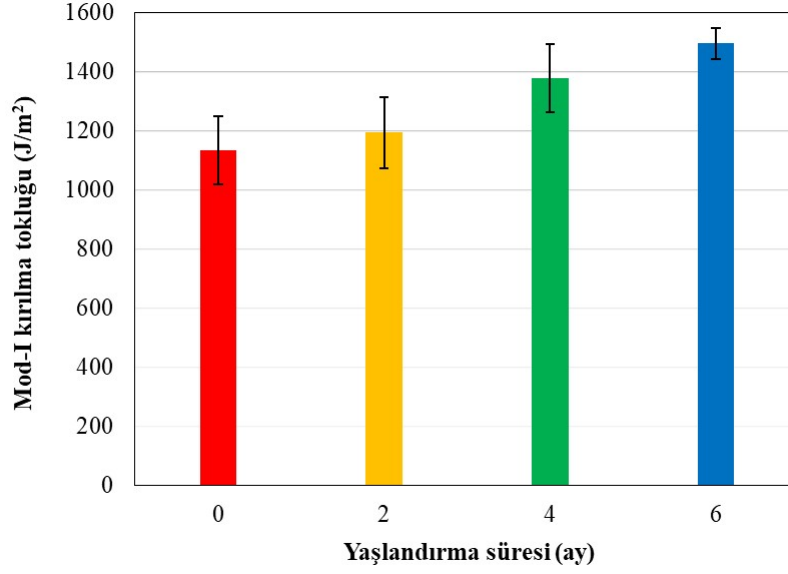


Şekil 4.38 Yaşlandırma süresine göre Mod-I kırılma tokluğu-çatlak ilerlemesi eğrileri

Numunelerin yaşlandırma süresine göre ortalama maksimum kuvvet ve Mod-I kırılma tokluğu değerleri sırasıyla Şekil 4.39 ve 4.40'ta verilmiştir. Ortalama DCB testi sonuçları ise Tablo 4.10'da verilmiştir. Tablodaki değişim değerleri yaşlandırılmamış numuneler referans alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.39 Yaşlandırma süresine göre ortalama maksimum kuvvet değerleri



Şekil 4.40 Yaşlandırma süresine göre ortalama Mod-I kırılma tokluğu değerleri

Yaşlandırılmamış numunelerde ortalama maksimum kuvvet 152.84 N ve Mod-I kırılma tokluğu 1131.43 J/m^2 olmuştur. Maksimum kuvvet, 2 ay yaşlandırma sonrası %7.22 artarak 163.87 N'ye, 4 ay yaşlandırma sonrası %13.65 daha artarak 184.73 N'ye ve 6 ay yaşlandırma sonrası %6.12 daha artarak 194.09 N'ye yükselmiştir. Mod-I kırılma tokluğu, 2 ay yaşlandırma sonrası %5.41 artarak 1192.67 J/m^2 'ye, 4 ay yaşlandırma sonrası %16.24 daha artarak 1376.37 J/m^2 'ye ve 6 ay yaşlandırma sonrası %10.49 daha artarak 1495.11 J/m^2 'ye yükselmiştir. Sonuç olarak, 6 ay yaşlandırma sonunda maksimum kuvvet ve Mod-I kırılma tokluğu sırasıyla %26.99 ve %32.14 artış göstermiştir.

Bu çalışmada elde edilen DCB testi sonuçlarının ilgili kısmı, literatürde yer alan ve herhangi bir ortam şartına veya yaşlandırmaya maruz bırakılmamış kompozitlere oda sıcaklığında uygulanan test sonuçları ile 'Farklı Sıcaklıklardaki Çift Ankastre Kiriş Testi Sonuçları' başlığı altında kıyaslanmıştır. Burada ise su yaşlandırması sonucu kırılma özelliklerinin değişimi değerlendirilmiştir.

Uzun süreli yaşlandırmanın kırılma performansına etkisini inceledikleri araştırmada Bandaru ve ark. (2022) 60 gün yaşlandırma sonunda cam fiber takviyeli Elium kompozitlerin 751 J/m^2 olan Mod-I kırılma tokluğu değerinin %90.15 artarak 1428 J/m^2 'ye ulaştığını bulmuştur. Bunun aksine, Xu ve ark. (2024) karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin 108 gün 75°C 'de suda bekletilmesi sonucunda Mod-I kırılma tokluğunda %16.67 oranında azalma ve Ulus ve ark. (2022) bazalt fiber takviyeli epoksi

kompozitlerin 6 ay deniz suyunda bekletilmesi ile 1190 J/m^2 olan Mod-I kırılma tokluğunun %39.7 azalarak 720 J/m^2 'ye düştüğünü bildirmiştir.

Sonuç olarak, epoksi kompozitlerin su yaşlandırması sonucunda kırılma özelliklerinde düşme görülürken Elium matrisli kompozitlerde yaşlandırmanın kırılma performansını artırdığı tespit edilmiştir. Bunun yanında, Su yaşlandırması sonrası tabakalar arası kırılma özellikleri ele alındığında, Elium matrisli aramid/karbon hibrit fiber takviyeli kompozitlerin güvenilir kullanım sunduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.10. Yaşlandırma süresine göre ortalama DCB testi sonuçları

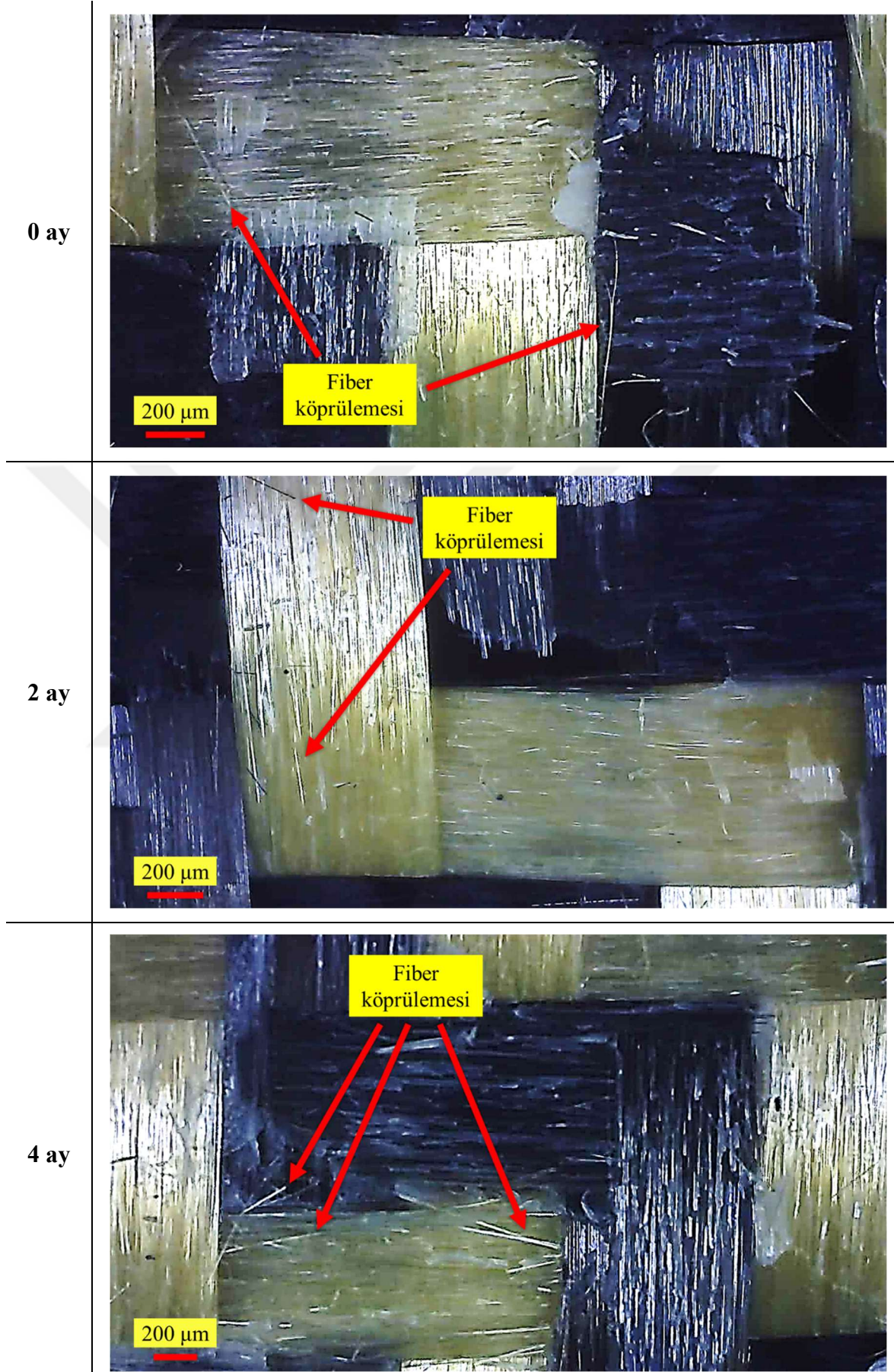
Yaşlandırma süresi	Maksimum kuvvet	Maksimum kuvvet değişimi	Mod-I Kırılma tokluğu	Mod-I Kırılma tokluğu değişimi
Ay	N	%	J/m^2	%
0	152.84 ± 11.22	-	1131.43 ± 115.03	-
2	163.87 ± 11.26	+ 7.22	1192.67 ± 120.46	+ 5.41
4	184.73 ± 8.00	+ 20.87	1376.37 ± 114.78	+ 21.65
6	194.09 ± 14.62	+ 26.99	1495.11 ± 52.45	+ 32.14

Yaşlandırma Sonrası DCB Testi Hasar Görüntüleri

Şekil 4.41’de kırılma özellikleri için test edilen numunelerin yaşlandırma süresine göre makro hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler, DCB testi sonrası ön çatlaktan ilerlemeye başlayan ve tamamen ayrılan numune yüzeylerinden alınmıştır.

DCB testi sonrası hasar görüntülerine bakıldığında suda yaşlandırma süresi arttıkça fiber köprüleme mekanizmasının daha fazla olduğu görülmektedir. Fiber köprülemenin fazla olması Mod-I kırılma tokluğunda artışın sebebi olarak görülmüştür.

Yaşlandırılmış numunelerde fiber matris ara yüzey bağlanması zayıflamış ve fiberler matristen kolayca koparak uzaklaşmıştır. Bu durum da yoğun fiber köprüleme ile sonuçlanmıştır. Bu sayede çatlak ilerlemesi zorlaşmış ve kırılma tokluğunda artışa sebep olmuştur (Bandaru ve ark., 2022).



Şekil 4.41 Yaşlandırma süresine göre DCB testi sonrası makro hasar görüntüleri

6 ay



Şekil 4.41 Yaşlandırma süresine göre DCB testi sonrası makro hasar görüntüleri (devamı)

4.2.2.5. Saf Su Yaşlandırması Sonrası Sonuçların Değerlendirilmesi

Çekme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Su yaşlandırması sonrası çekme testlerinde, su emiliminin matrisin polimerik yapısı ve fiber matris ara yüzey bağlanması üzerindeki etkisi nedeniyle numunelerin gerilme taşıma kapasitelerinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Ortamdaki suyun Elium matrisini plastikleştirerek yumuşatması, numunelerin rijitlik ve mukavemetinin azalmasına yol açarken, polimer zincirlerinin hareketliliğini kolaylaştırması kopma uzamasında artışa sebep olmuştur (Frej ve ark., 2021b; Hussnain ve ark., 2024).

Su yaşlandırma testleri, artan yaşlandırma süresiyle çekme mukavemetinde gözlemlenen sınırlı düşüşe karşın uzamada meydana gelen artışın, Elium matrisli hibrit kompozitlerin sulu ortamlarda uzun süreli uygulamalar için değerli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Eğilme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Eğilme test sonuçları, çekme testine benzer şekilde, su yaşlandırmasının Elium matrisli hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Ancak, eğilmede gözlemlenen düşüşlerin çekmeye göre daha belirgin olduğu görülmektedir. Fiber takviyeli kompozitlerin eğilme performansı, matrisin rijitliğinden ve kuvveti fiberlere transfer etme yeteneğinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Yaşlandırmanın etkisiyle matrisin plastikleşmesi ve yumuşaması, eğilme yüklemesi altında şekil değiştirmeye karşı direnci düşürerek eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülün azalmasına neden olmuştur. Ortamdaki su moleküllerinin

fiber matris arayüzeyine nüfuz etmesi ile bu bağlanmanın zayıflamasının da eğilme özelliklerinin düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir (Agarwal ve ark., 2023; Devine ve ark., 2023).

Yapılan eğilme testi sonuçları, yaşlandırma süresi arttıkça eğilme mukavemeti ve rijitliğindeki kayda değer azalmalar, bu kompozitlerin nemli veya sulu ortamlara uzun süreli maruz kaldıklarında beklenen performansı sergileme yeteneklerinin önemli ölçüde düşebileceğine işaret etmektedir.

SENB Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SENB testleri, bir malzemenin çatlak varlığında yük taşıma kapasitesini ve çatlağın ilerlemesine karşı direncini ölçmektedir. Elde edilen tüm sonuçlar, su yaşlandırmasının Elium matrisli hibrit kompozitlerin kırılma tokluğunu olumsuz etkilediğini göstermektedir. Elium'un su emilimi sonucu plastikleşmesi ve rijitliğinin azalması, daha az enerji ile çatlağın ilerlemesine yol açarak hem kuvvet taşıma kapasitesinde hem de kırılma tokluğunda düşüşe yol açmıştır (Ulus ve ark., 2022; Bhudolia ve ark., 2023).

Su yaşlandırması, Elium matrisli hibrit kompozitlerin bir çatlak veya kusur varlığında yük taşıma yeteneğinin ve çatlağın ilerlemesine karşı direncinin azalmasına neden olmuştur. Bu nedenle, bu kompozitlerin nemli veya sulu ortamlarda kullanıldığı uygulamalardaki SENB performansına dikkat edilmesi gerekmektedir.

DCB Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

DCB test sonuçları, diğer mekanik testlerinin aksine su yaşlandırmasının Elium matrisli hibrit kompozitlerde kuvvet taşıma kapasitesini ve Mod-I tabakalar arası kırılma tokluğunu artırdığını açıkça göstermektedir. Elium matrisinin su yaşlandırması sonucu sünekleşmesi, çatlak ilerlemesi sırasında matrisin daha fazla enerji absorbe etmesine olanak tanıyarak numunelerin kırılma tokluğunda artış sağlamıştır. Çekme, eğilme ve SENB testlerinde genel performans düşüşüne yol açan matrisin sünekleşmesi, DCB testlerinde daha yüksek performans gözlenmesine katkıda bulunmuştur.

Diğer mekanik testlerde olumsuz bir özellik olarak görünen su yaşlandırmasının fiber matris arayüzey bağlanmasını zayıflatması da DCB testlerinde performansın yükselmesine katkı sağlamıştır. Arayüzeydeki bu zayıflama, fiberlerin matristen daha kolay ayrılmasına ve bunun neticesinde de daha fazla fiber köprülemesi mekanizmasının oluşmasına neden olmuştur. Fiber köprülemesinin artması ile çatlak ilerlerken daha fazla

enerji emilimi meydana gelmiştir ve kırılma tokluğu yükselmiştir (Obande ve ark., 2019a; Bandaru ve ark., 2022; Han ve ark., 2022; Liu ve ark., 2025).

Su yaşlandırması, tabakaların ayrılmaya başlaması veya ilerlemesi için gereken kuvveti ve Mod-I tabakalar arası kırılma tokluğunu artırmıştır. Bu durum, Elium matrisli hibrit kompozitlerin tabakalar arası ayrılmaya karşı direncinin yaşlandırma süreciyle birlikte belirgin bir artış gösterdiğini ortaya koymaktadır ki, bu da belirli uygulamalar açısından beklenmedik avantajlı bir özellik olarak değerlendirilmiştir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, katman içi aramid/karbon hibrit fiber takviyeli termoplastik Elium matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, farklı sıcaklıkların ve su yaşlandırmasının mekanik performans üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Bu tez çalışması, termoplastik Elium matrisin geri dönüştürülebilirlik ve sürdürülebilirlik potansiyeliyle birlikte, aramid/karbon hibrit fiber takviyeli kompozitlerdeki performansını sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Elium matrisli kompozitlerin zorlu çevresel koşullar altında da üstün performans sergileyebileceğini göstermiştir. Özellikle düşük sıcaklıklarda (-50°C 'ye kadar) artan mekanik özellikler ve su yaşlandırmasına rağmen Mod-I kırılma tokluğundaki dikkate değer artış, bu malzemelerin havacılık, uzay ve denizcilik gibi kritik sektörlerde uygulama potansiyeline işaret etmektedir. Bu deneysel sonuçlar, akademik bir katkı sunmakla kalmayıp, Elium kompozitlerin geleceğin güvenilir, dayanıklı ve çevreci mühendislik çözümlerinde yer alabileceğini düşündürmektedir.

5.1 Sonuçlar

5.1.1. Farklı Sıcaklıklardaki Sonuçlar

Farklı sıcaklıklardaki testlerde -50 , -25 , 0 , $+25$ ve $+50^{\circ}\text{C}$ 'de numunelere çekme, üç nokta eğilme, SENB ve DCB testleri yapılmıştır. Elde edilen test sonuçları, $+25^{\circ}\text{C}$ 'de test edilmiş numunelerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Farklı sıcaklıklardaki testler sonucunda elde edilen bulgular şunlardır:

- 25 derece sıcaklık farkı etkilerinin incelenmesi sonucunda, en önemli değişikliğin $+25^{\circ}\text{C}$ ile $+50^{\circ}\text{C}$ arasında kaydedildiği gözlenmiştir. Bu etki mekanik testlerin tamamında gözlenmiş olup çekme, eğilme ve SENB testlerinde mekanik özelliklerin azalması yönünde olmuştur. Sıcaklık artışı, çekme mukavemetinde $\%9.00$, eğilme mukavemetinde $\%19.52$ ve kırılma tokluğunda $\%9.04$ 'lük bir azalmaya yol açmıştır. Aynı sıcaklık değişiminin etkisi DCB testlerinde farklı meydana gelmiştir ve mekanik performans artış göstermiştir. $+50^{\circ}\text{C}$ 'deki Mod-I kırılma tokluğu, $+25^{\circ}\text{C}$ 'dekine göre $\%10.61$ artmıştır.
- Çekme testlerinde, $+25^{\circ}\text{C}$ 'de çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülü sırasıyla 513.19 MPa ve 26.35 GPa olarak elde edilmiştir. Bu değerler, -50°C 'de $+25^{\circ}\text{C}$ 'ye göre $\%4.93$ ve $\%2.24$ artış göstererek 538.50 MPa ve

26.94 GPa bulunmuştur. +50°C'de ise 467.02 MPa ve 25.49 GPa'ya düşmüştür.

- Eğilme testlerinde, +25°C'de eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülü 291.55 MPa ve 35.14 GPa olmuştur. Eğilme mukavemeti, -50°C'de 389.90 MPa ve +50°C'de 234.66 MPa olurken, eğilmede elastiklik modülü -50°C'de 33.41 GPa ve +50°C'de 32.52 GPa olarak elde edilmiştir.
- SENB testlerinde, +25°C'de kırılma tokluğu $138.83 \text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, -50°C ve +50°C'de yapılan testler sonucunda sırasıyla $151.04 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ve $126.27 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olmuştur.
- Çekme, eğilme ve SENB testlerinde elde edilen sonuçlara göre, en yüksek mekanik performans -50°C test sıcaklığı sonucu ortaya çıkmıştır.
- DCB testlerinde, +25°C'de elde edilen Mod-I kırılma tokluğu 1123.39 J/m^2 olurken, -50°C ve +50°C'deki testler sonucunda sırasıyla 1240.30 J/m^2 ve 1242.61 J/m^2 bulunmuştur. Diğer üç mekanik testin aksine, tabakalar arası ayrılma davranışı, referans alınan +25°C'den hem daha düşük hem de daha yüksek sıcaklıklarda olumlu etkilenmiştir.
- Elium matrisli hibrit kompozitlerin mekanik davranışları sıcaklığa bağlı olarak belirgin farklılıklar göstermektedir. Çekme, eğilme ve SENB testlerinde, düşük sıcaklıklar matrisin gevrekleşmesiyle rijitlik, mukavemet ve çatlak ilerleme direncinde artış sağlarken, yüksek sıcaklıklar matrisin sünekleşmesiyle performans düşüşüne neden olmuştur. Özellikle -50°C'de tüm bu testlerde en yüksek performansa ulaşılmıştır. Diğer mekanik testlerin aksine, DCB testlerinde tabakalar arası kırılma tokluğu hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda artış göstermiştir. Düşük sıcaklıklarda artan matris rijitliği ve fiber köprülemesi, yüksek sıcaklıklarda ise matrisin sünekliği bu artışı sağlamıştır. Bu sonuçlar, Elium kompozitlerin geniş bir sıcaklık aralığında, özellikle düşük sıcaklıklarda üstün genel mekanik özellikler sergilerken, tabakalar arası ayrılma direncini farklı sıcaklık aralıklarında da etkin bir şekilde koruduğunu ve belirli uygulamalar için umut vadeden bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

5.1.2. Su Yaşlandırması Sonrası Sonuçlar

Su yaşlandırması testlerinde, yaşlandırılmamış numuneler ile 2, 4 ve 6 ay boyunca saf suda yaşlandırılmış numunelere çekme, üç nokta eğilme, SENB ve DCB testleri yapılmıştır. Elde edilen test sonuçları, yaşlandırılmamış numunelerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Su yaşlandırması testleri sonucunda elde edilen bulgular şunlardır:

- Su emme sonuçlarına göre, en yüksek kütle artışı yaşlandırmanın erken aşamalarında meydana gelmiş ve ilk ayın sonunda %6.93'e ulaşmıştır. Büyük ölçüde aramid fibere atfedilen bu kütle artışı, 6 ayın sonunda %7.29 olmuştur.
- Mekanik özellikler, en fazla yaşlandırmanın ilk 2 ayında etkilenmiştir. İkinci aydan sonra su emme çok az olmuştur, ancak mekanik performans olumsuz etkilenmeye devam etmiştir.
- Çekme testlerinde, yaşlandırılmamış numunelerin çekme mukavemeti ve çekmede elastiklik modülü sırasıyla 515.37 MPa ve 26.42 GPa olarak elde edilmiştir. 6 ay yaşlandırmanın ardından bu değerler 492.68 MPa ve 22.83 GPa'ya düşmüştür.
- Eğilme testlerinde, yaşlandırılmamış numunelerden elde edilen eğilme mukavemeti ve eğilmede elastiklik modülü sırasıyla 291.46 MPa ve 35.34 GPa olurken, su yaşlandırması sonrasında 216.00 MPa ve 30.42 GPa'ya düşmüştür.
- SENB testlerinde, yaşlandırılmamış numunelerde elde edilen maksimum kuvvet ve kırılma tokluğu değerleri 5694.55 N ve $138.83 \text{ MPa}\sqrt{m}$ elde edilirken, yaşlandırma sonucunda sırasıyla %17.19 ve %21.56 oranında azalarak 4715.55 N ve $108.89 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olmuştur.
- DCB testlerinde, yaşlandırılmamış numunelerde elde edilen maksimum kuvvet ve Mod-I kırılma tokluğu değerleri 152.84 N ve 1131.43 J/m^2 olurken, yaşlandırma sonucunda sırasıyla %26.99 ve %32.14 oranında artarak 194.09 N ve 1495.11 J/m^2 olarak elde edilmiştir. Tabakalar arası ayrılma davranışı, su yaşlandırmasının olumlu etkilediği tek mekanik özellik olarak dikkat çekmiştir.

- Suda yaşlandırma, eğilme özelliklerini çekme özelliklerinden daha fazla etkilemiştir. Yaşlandırma sonunda eğilme mukavemeti %25.89 azalırken çekme mukavemeti sadece %4.40 azalmıştır, eğilmede elastiklik modülü %13.92 azalırken çekmede elastiklik modülü %13.60 azalmıştır. Sonuç olarak, uzun süre suya maruz kalması ihtimali olan aramid/karbon fiber takviyeli Elium kompozitlerin tasarımında ve kullanımında eğilme davranışlarının önemli ölçüde etkilendiğinin göz önünde bulundurulması gerektiği söylenebilir.
- Yapılan çekme, eğilme ve SENB testleri, su yaşlandırmasının Elium matrisli hibrit kompozitlerin rijitlik, mukavemet ve çatlak ilerlemesine karşı direncini genel olarak olumsuz etkileyerek performans düşüşlerine yol açtığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu düşüşlerin temelinde, Elium matrisinin su emilimi sonucu plastikleşmesi ve fiber matris arayüzey bağlanmasının zayıflaması yatmaktadır. Matrisin sünekleşmesi, bu testlerde mukavemet kaybına yol açarken, kopma uzamasında bir artış gözlenmiştir. Ancak, DCB test sonuçları, aynı sünekleşen matrisin ve zayıflayan arayüzeyin tabakalar arası kırılma tokluğunu artırdığını göstermiştir. Bu sonuç, Elium matrisli hibrit kompozitlerin nemli ortamlardaki performansının uygulama türüne göre detaylıca değerlendirilmesi gerektiğini, özellikle tabakalar arası ayrılma direnci açısından potansiyel avantajlar sunabileceğini vurgulamaktadır.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında, katman içi aramid/karbon hibrit fiber takviyeli termoplastik Elium matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri, çekme, üç nokta eğilme, SENB ve DCB testleri yapılarak incelenmiştir. Bu tez kapsamında değerlendirilmemiş olan şu hususlar araştırılabilir:

- Aramid/karbon Elium kompozitlerin diğer mekanik özellikleri belirlenebilir. Bunlar basma, burkulma, darbe, aşınma, yorulma vb. olabilir. Bu özelliklerin belirlenmesi ile adı geçen kompozitin özellikleri daha belirgin hale getirilmiş olacaktır.
- Farklı sıcaklıklarda yapılan testler sonucunda düşük sıcaklıklarda mekanik özelliklerde artış tespit edilmiştir. Ancak, bu çalışmada ele alınan en düşük sıcaklık -50°C'dir. Bundan daha düşük sıcaklıklarda da testler yapılabilir.

- Bu çalışmada, sadece saf su yaşlandırması yapılmıştır. Deiyonize su, deniz suyu vb. farklı ortamlarda da yaşlandırma yapılabilir.
- Bu çalışmada, su yaşlandırması yapılırken ortam sıcaklığının kontrolü yapılmamıştır. Su yaşlandırması yapılırken sıcaklık belirli bir değerde sabit tutulabilir.
- Mekanik özelliklerin artırılması amacıyla Elium reçineye nano katkıları eklenebilir.
- Aramid/karbon Elium interply hibrit kompozitler üretilip mekanik performans karşılaştırması yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Agarwal, S., Pai, Y., Pai, D. ve Mahesha, G., 2023, Assessment of ageing effect on the mechanical and damping characteristics of thin quasi-isotropic hybrid carbon-Kevlar/epoxy intraply composites, *Cogent Engineering*, 10 (1), 2235111.
- Allagui, S., El Mahi, A., Rebiere, J.-L., Beyaoui, M., Bouguecha, A. ve Haddar, M., 2021, Effect of recycling cycles on the mechanical and damping properties of flax fibre reinforced elium composite: experimental and numerical studies, *Journal of Renewable Materials*, 9 (4), 695.
- Alsaadi, M., Erklığ, A. ve Alrawi, H., 2017, Effect of S-glass fabric on the mechanical characteristics of a hybrid carbon/aramid fabric reinforced epoxy composites, *Materials Research Express*, 4 (5), 055304.
- Alsaadi, M., Bulut, M., Erklığ, A. ve Jabbar, A., 2018, Nano-silica inclusion effects on mechanical and dynamic behavior of fiber reinforced carbon/Kevlar with epoxy resin hybrid composites, *Composites Part B: Engineering*, 152, 169-179.
- Alsaadi, M., Erklığ, A. ve Abbas, M., 2020, Effect of clay nanoparticles on the mechanical and vibration characteristics of intraply aramid/carbon fiber reinforced epoxy composite, *Polymer Composites*, 41 (7), 2704-2712.
- Alsaadi, M. ve Erklığ, A., 2021, Mode-I interlaminar fracture of aramid and carbon fibers reinforced epoxy matrix composites at various SiC particle contents, *Materials Testing*, 63 (10), 913-918.
- Ayatollahi, M., Bahrami, B., Mirzaei, A. ve Yahya, M. Y., 2019, Effects of support friction on mode I stress intensity factor and fracture toughness in SENB testing, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103, 102288.
- Bakkal, M., Kayihan, M., Timur, A., Parlar, Z., Güleriyüz Parasız, C. G., Yücel, A. H., Palabıyık, İ. M. ve Gülmez, T., 2023, Fatigue behavior and self-heating mechanism of novel glass fiber reinforced thermoplastic composite, *Advanced Composite Materials*, 1-17.
- Baley, C., Lan, M., Bourmaud, A. ve Le Duigou, A., 2018, Compressive and tensile behaviour of unidirectional composites reinforced by natural fibres: Influence of fibres (flax and jute), matrix and fibre volume fraction, *Materials Today Communications*, 16, 300-306.
- Bandaru, A. K., Hickey, S., Singh, D., Gujjala, R. ve Pichandi, S., 2022, Influence of hygrothermal ageing on the novel infusible thermoplastic resin reinforced with quadriaxial non-crimp glass fabrics, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 08927057221137805.
- Bandaru, A. K., Gobikannan, T., Pawar, S. J. ve Pichandi, S., 2024a, Investigations on the influence of thickness and preform structure on the mechanical performance of novel textile composites with woven Kevlar® fabric reinforcement and poly methylmethacrylate (Elium®) matrix, *Functional Composites and Structures*, 6 (4), 045003.
- Bandaru, A. K., Pothnis, J. R., Portela, A., Gujjala, R., Ma, H. ve O'Higgins, R. M., 2024b, Flexural and interlaminar shear response of novel methylmethacrylate composites reinforced with high-performance fibres, *Polymer Testing*, 140, 108578.
- Bang, S.-G., Yeom, D.-J., Jeong, Y.-J., Kim, H.-T., Kim, J.-D., Kim, S.-K., Kim, J.-H. ve Lee, J.-M., 2022, Effect of Aramid Fiber on the Properties of Glass Fiber-Reinforced Composite for Cryogenic Applications, *Applied Composite Materials*, 29 (4), 1431-1448.
- Barbosa, L. C. M., Bortoluzzi, D. B. ve Ancelotti Jr, A. C., 2019a, Analysis of fracture toughness in mode II and fractographic study of composites based on Elium® 150 thermoplastic matrix, *Composites Part B: Engineering*, 175, 107082.

- Barbosa, L. C. M., Santos, M., Oliveira, T. L. L., Gomes, G. F. ve Ancelotti Junior, A. C., 2019b, Effects of moisture absorption on mechanical and viscoelastic properties in liquid thermoplastic resin/carbon fiber composites, *Polymer Engineering & Science*, 59 (11), 2185-2194.
- Barbosa, L. C. M., Duque, G. R. V. ve Ancelotti Junior, A. C., 2020, Temperature-frequency-dependent properties analysis of a bio-composite based on a new liquid thermoplastic resin reinforced with jute fibers, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1-21.
- Bhudolia, S. K., Perrotey, P. ve Joshi, S. C., 2016, Experimental investigation on suitability of carbon fibre thin plies for racquets, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 230 (2), 64-72.
- Bhudolia, S. K., Perrotey, P. ve Joshi, S. C., 2017, Optimizing polymer infusion process for thin ply textile composites with novel matrix system, *Materials*, 10 (3), 293.
- Bhudolia, S. K. ve Joshi, S. C., 2018, Low-velocity impact response of carbon fibre composites with novel liquid Methylmethacrylate thermoplastic matrix, *Composite Structures*, 203, 696-708.
- Bhudolia, S. K., Perrotey, P. ve Joshi, S. C., 2018, Mode I fracture toughness and fractographic investigation of carbon fibre composites with liquid Methylmethacrylate thermoplastic matrix, *Composites Part B: Engineering*, 134, 246-253.
- Bhudolia, S. K., Joshi, S. C., Bert, A., Di, B. Y., Makam, R. ve Gohel, G., 2019a, Flexural characteristics of novel carbon methylmethacrylate composites, *Composites Communications*, 13, 129-133.
- Bhudolia, S. K., Joshi, S. C., Bert, A., Gohel, G. R. ve Raama, M., 2019b, Energy characteristics and failure mechanisms for textile spread tow thin ply thermoplastic composites under low-velocity impact, *Fibers and Polymers*, 20, 1716-1725.
- Bhudolia, S. K., Joshi, S. C. ve Boon, Y. D., 2019c, Experimental and microscopic investigation on mechanical performance of textile spread-tow thin ply composites, *Fibers and Polymers*, 20 (5), 1036-1045.
- Bhudolia, S. K., Gohel, G., Vasudevan, D., Leong, K. F. ve Gerard, P., 2022, On the mode I and mode II delamination characteristics and surface morphological aspects of composites with carbon-thermoplastic hybrid fabrics and innovative liquid thermoplastic resin, *Polymers*, 14 (19), 4155.
- Bhudolia, S. K., Gohel, G., Vasudevan, D., Leong, K. F. ve Gerard, P., 2023, Delamination behaviour and surface morphology of wholly thermoplastic composites using different ultra-high molecular weight thermoplastic fabrics with pristine and toughened Elium resin under mode I loading, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 164, 107273.
- Bican, İ. E., 2019, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tabakalı kompozitlerde arayüzey kırılma tokluğunun analizi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Borazan, K. S., 2019, Partikül takviyeli kompozitlerin kırılma tokluğunun belirlenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Boufaïda, Z., Farge, L., André, S. ve Meshaka, Y., 2015, Influence of the fiber/matrix strength on the mechanical properties of a glass fiber/thermoplastic-matrix plain weave fabric composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 75, 28-38.
- Boumbimba, R. M., Coulibaly, M., Khabouchi, A., Kinvi-Dossou, a., Bonfoh, N. ve Gerard, P., 2017, Glass fibres reinforced acrylic thermoplastic resin-based tri-

- block copolymers composites: Low velocity impact response at various temperatures, *Composite Structures*, 160, 939-951.
- Bulut, M., Alsaadi, M. ve Erkliğ, A., 2020, The effects of nanosilica and nanoclay particles inclusions on mode II delamination, thermal and water absorption of intraply woven carbon/aramid hybrid composites, *International Polymer Processing*, 35 (4), 367-375.
- Cadieu, L., Kopp, J., Jumel, J., Bega, J. ve Froustey, C., 2020, Temperature effect on the mechanical properties and damage mechanisms of a glass/thermoplastic laminate, *Journal of Composite Materials*, 54 (17), 2271-2282.
- Cadieu, L., Kopp, J., Jumel, J., Bega, J. ve Froustey, C., 2021, A fracture behaviour evaluation of Glass/Elium150 thermoplastic laminate with the DCB test: Influence of loading rate and temperature, *Composite Structures*, 255, 112907.
- Cao, D., 2024, Mechanical enhancement of natural-fiber-reinforced composites modified with recycled thermoset composite fillers, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 07316844241247896.
- Castanié, B., Bouvet, C. ve Ginot, M., 2020, Review of composite sandwich structure in aeronautic applications, *Composites Part C: Open Access*, 1, 100004.
- Chen, Y., Prasad, V., Yasar, M., Murphy, N. ve Ivankovic, A., 2024, Enhancing interfacial performance and fracture toughness of carbon fibre reinforced thermoplastic composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 187, 108434.
- Chilali, A., Zouari, W., Assarar, M., Kebir, H. ve Ayad, R., 2016, Analysis of the mechanical behaviour of flax and glass fabrics-reinforced thermoplastic and thermoset resins, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35 (16), 1217-1232.
- Chilali, A., Assarar, M., Zouari, W., Kebir, H. ve Ayad, R., 2017, Effect of geometric dimensions and fibre orientation on 3D moisture diffusion in flax fibre reinforced thermoplastic and thermosetting composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95, 75-86.
- Chilali, A., Zouari, W., Assarar, M., Kebir, H. ve Ayad, R., 2018, Effect of water ageing on the load-unload cyclic behaviour of flax fibre-reinforced thermoplastic and thermosetting composites, *Composite Structures*, 183, 309-319.
- Ciardiello, R., Fiumarella, D. ve Belingardi, G., 2023, Enhancement of the Mechanical Performance of Glass-Fibre-Reinforced Composites through the Infusion Process of a Thermoplastic Recyclable Resin, *Polymers*, 15 (15), 3160.
- Coronado, P., Argüelles, A., Viña, J., Mollón, V. ve Viña, I., 2012, Influence of temperature on a carbon-fibre epoxy composite subjected to static and fatigue loading under mode-I delamination, *International Journal of Solids and Structures*, 49 (21), 2934-2940.
- Cousins, D. S., Suzuki, Y., Murray, R. E., Samaniuk, J. R. ve Stebner, A. P., 2019, Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades, *Journal of cleaner production*, 209, 1252-1263.
- Czech, K., Oliwa, R., Krajewski, D., Bulanda, K., Oleksy, M., Budzik, G. ve Mazurkow, A., 2021, Hybrid polymer composites used in the arms industry: A review, *Materials*, 14 (11), 3047.
- Darıçık, F. ve Çelebi, K., 2017, Karbon Lifi/Epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin Farklı Ortam Şartlarındaki Mod I Kırılma Davranışı, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32 (1), 223-234.

- Das, S. C., Srivastava, C., Goutianos, S., La Rosa, A. D. ve Grammatikos, S., 2023, On the Response to Hygrothermal Ageing of Fully Recyclable Flax and Glass Fibre Reinforced Polymer Composites, *Materials*, 16 (17), 5848.
- Demski, S., Dydek, K., Bartnicka, K., Majchrowicz, K., Kozera, R. ve Boczkowska, A., 2023, Introduction of SWCNTs as a Method of Improvement of Electrical and Mechanical Properties of CFRPs Based on Thermoplastic Acrylic Resin, *Polymers*, 15 (3), 506.
- Devine, M., Bajpai, A., Obande, W., Brádaigh, C. M. Ó. ve Ray, D., 2023, Seawater ageing of thermoplastic acrylic hybrid matrix composites for marine applications, *Composites Part B: Engineering*, 263, 110879.
- Djele, A. ve Karakuzu, R., 2021, An experimental study on quasi-static indentation, low-velocity impact and damage behaviors of laminated composites at high temperatures, *Polymers and Polymer Composites*, 29 (9_suppl), S969-S977.
- Drouhet, Q., Touchard, F. ve Chocinski-Arnault, L., 2022, Influence of Hygrothermal Aging on Mechanical Properties and Damage Mechanisms of Hemp-Reinforced Biocomposites, *Journal of Natural Fibers*, 19 (17), 15404-15421.
- Eskizeybek, V., 2012, Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Frej, H. B. H., Léger, R., Perrin, D. ve Ienny, P., 2021a, Effect of aging temperature on a thermoset-like novel acrylic thermoplastic composite for marine vessels, *Journal of Composite Materials*, 55 (19), 2673-2691.
- Frej, H. B. H., Léger, R., Perrin, D. ve Ienny, P., 2021b, A Novel Thermoplastic Composite for Marine Applications: Comparison of the Effects of Aging on Mechanical Properties and Diffusion Mechanisms, *Applied Composite Materials*, 28 (4), 899-922.
- Frej, H. B. H., Léger, R., Perrin, D., Ienny, P., Gérard, P. ve Devaux, J.-F., 2021c, Recovery and reuse of carbon fibre and acrylic resin from thermoplastic composites used in marine application, *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105705.
- Gebhardt, M., Manolakis, I., Chatterjee, A., Kalinka, G., Deubener, J., Pfnür, H., Chakraborty, S. ve Meiners, D., 2021, Reducing the raw material usage for room temperature infusible and polymerisable thermoplastic CFRPs through reuse of recycled waste matrix material, *Composites Part B: Engineering*, 216, 108877.
- Ghorbani, B., Arulrajah, A., Narsilio, G. ve Horpibulsuk, S., 2020, Experimental and ANN analysis of temperature effects on the permanent deformation properties of demolition wastes, *Transportation Geotechnics*, 24, 100365.
- Girijappa, Y. G. T., Mavinkere Rangappa, S., Siengchin, S. ve Jawaid, M., 2022, Mechanical and thermal properties of flax/carbon/kevlar based epoxy hybrid composites, *Polymer Composites*, 43 (8), 5649-5662.
- Gohel, G., Bhudolia, S. K., Leong, K. F. ve Gerard, P., 2023, Understanding the impact properties and damage phenomenon of ultra-lightweight all-thermoplastic composite structures, *International Journal of Impact Engineering*, 172, 104405.
- Han, N., Yuksel, O., Zanjani, J. S. M., An, L., Akkerman, R. ve Baran, I., 2022, Experimental Investigation of the Interlaminar Failure of Glass/Elum® Thermoplastic Composites Manufactured With Different Processing Temperatures, *Applied Composite Materials*, 1-22.
- Heitkamp, T., Girnth, S., Kuschmitz, S., Klawitter, G., Waldt, N. ve Vietor, T., 2022, Continuous fiber-reinforced material extrusion with hybrid composites of carbon and aramid fibers, *Applied Sciences*, 12 (17), 8830.

- Hesseler, S., Stapleton, S. E., Appel, L., Schöfer, S. ve Manin, B., 2021, Modeling of reinforcement fibers and textiles, In: *Advances in Modeling and Simulation in Textile Engineering*, Eds: Elsevier, p. 267-299.
- Hussnain, S., Shah, S., Megat-Yusoff, P., Choudhry, R. ve Hussain, M., 2024, Hygrothermal effects on the durability of resin-infused thermoplastic E-glass fiber-reinforced composites in marine environment, *Polymer Composites*, 45 (15), 13901-13923.
- Jia, Z., Li, T., Chiang, F.-p. ve Wang, L., 2018, An experimental investigation of the temperature effect on the mechanics of carbon fiber reinforced polymer composites, *Composites Science and Technology*, 154, 53-63.
- Karacor, B. ve Özcanlı, M., 2022, Evaluation of mechanical properties of intraply hybrid carbon/aramid composite materials, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27 (2), 537-556.
- Karakuzu, R., Djele, A. ve Dogan, A., 2021, High temperature effect on quasi-static and low velocity impact behaviors of advanced composite materials, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235 (23), 7110-7119.
- Kazemi, M., Shanmugam, L., Lu, D., Wang, X., Wang, B. ve Yang, J., 2019, Mechanical properties and failure modes of hybrid fiber reinforced polymer composites with a novel liquid thermoplastic resin, Elium®, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105523.
- Kazemi, M. E., Shanmugam, L., Li, Z., Ma, R., Yang, L. ve Yang, J., 2020, Low-velocity impact behaviors of a fully thermoplastic composite laminate fabricated with an innovative acrylic resin, *Composite Structures*, 250, 112604.
- Kazemi, M. E., Shanmugam, L., Dadashi, A., Shakouri, M., Lu, D., Du, Z., Hu, Y., Wang, J., Zhang, W. ve Yang, L., 2021, Investigating the roles of fiber, resin, and stacking sequence on the low-velocity impact response of novel hybrid thermoplastic composites, *Composites Part B: Engineering*, 207, 108554.
- Khalili, P., Blinzler, B., Kádár, R., Bisschop, R., Försth, M. ve Blomqvist, P., 2019, Flammability, smoke, mechanical behaviours and morphology of flame retarded natural fibre/Elium® composite, *Materials*, 12 (17), 2648.
- Khalili, P., Blinzler, B., Kádár, R., Blomqvist, P., Sandinge, A., Bisschop, R. ve Liu, X., 2020, Ramie fabric Elium® composites with flame retardant coating: Flammability, smoke, viscoelastic and mechanical properties, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 105986.
- Khalili, P., Skrifvars, M. ve Ertürk, A. S., 2021, Fabrication, mechanical testing and structural simulation of regenerated cellulose fabric Elium® thermoplastic composite system, *Polymers*, 13 (17), 2969.
- Khan, T., Ali, M. A., Irfan, M. S., Cantwell, W. J. ve Rehan, U., 2022a, Visualizing pseudo-ductility in carbon/glass fiber hybrid composites manufactured using infusible thermoplastic Elium® resin, *Polymer Composites*.
- Khan, T., Ali, M. A., Irfan, M. S., Cantwell, W. J. ve Umer, R., 2022b, Visualization and investigation of healing mechanism in carbon fiber reinforced Elium® composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 08927057221145551.
- Khan, T., Irfan, M., Cantwell, W. ve Umer, R., 2022c, Crack healing in infusible thermoplastic composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 156, 106896.
- Khan, T., Khalid, M., Andrew, J., Ali, M., Zheng, L. ve Umer, R., 2023, Co-cured GNP films with liquid thermoplastic/glass fiber composites for superior EMI shielding

- and impact properties for space applications, *Composites Communications*, 44, 101767.
- Kim, J. H., Song, B. K., Song, J. H. ve Min, K. J., 2023, Control of Mechanical Properties of FRP (Fiber-Reinforced Plastic) via Arrangement of High-Strength/High-Ductility Fiber in a Blended Fabric, *Materials*, 16 (14), 5001.
- Kim, S.-C., Kim, J. S. ve Yoon, H.-J., 2011, Experimental and numerical investigations of mode I delamination behaviors of woven fabric composites with carbon, Kevlar and their hybrid fibers, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 321-329.
- Kinvi-Dossou, G., Boumbimba, R. M., Bonfoh, N., Garzon-Hernandez, S., Garcia-Gonzalez, D., Gerard, P. ve Arias, A., 2019, Innovative acrylic thermoplastic composites versus conventional composites: Improving the impact performances, *Composite Structures*, 217, 1-13.
- Kumar, V., Elen, M., Sushmita, K., Overman, N. R., Nickerson, E., Murdy, P., Presuel-Moreno, F. ve Fifield, L. S., 2024, Hygrothermal aging and recycling effects on mechanical and thermal properties of recyclable thermoplastic glass fiber composites, *Polymer Composites*.
- Liu, C., He, C., Zou, Z. ve Li, Y., 2025, Study on Mode I interlaminar fracture behavior of automated fiber placement in situ consolidation thermoplastic composite considering the influence of roller compaction pressure, *Polymer Composites*, 46 (2), 1454-1468.
- Lorriot, T., El Yagoubi, J., Fourel, J. ve Tison, F., 2015, Non-conventional Glass fiber NCF composites with thermoset and thermoplastic matrices, *Proceedings of the International Conference on Composite Materials (ICCM 2015)*.
- Manaii, R., Terekhina, S., Chandreshah, L., Shafiq, N., Duriatti, D. ve Guillaumat, L., 2023, Influence of fibre orientation, moisture absorption and repairing performance on the low-velocity impact response of woven flax/Elum® thermoplastic bio-composites, *Journal of Composite Materials*, 57 (23), 3601-3618.
- Medeiros, R. J. d., Nóbrega, S. H. S. d. ve Aquino, E. M. F. d., 2019, Failure theories on carbon/kevlar hybrid fabric based composite laminate: notch and anisotropy effects, *Materials Research*, 22, e20180099.
- Meyer zu Reckendorf, I., Sahki, A., Perrin, D., Lacoste, C., Bergeret, A., Ohayon, A. ve Morand, K., 2022, Chemical Recycling of Vacuum-Infused Thermoplastic Acrylate-Based Composites Reinforced by Basalt Fabrics, *Polymers*, 14 (6), 1083.
- Monti, A., El Mahi, A., Jendli, Z. ve Guillaumat, L., 2016, Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 100-110.
- Obande, W., Mamalis, D., Ray, D., Yang, L. ve Brádaigh, C. M. Ó., 2019a, Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic-and thermoset-based composites, *Materials & Design*, 175, 107828.
- Obande, W., Ray, D. ve Brádaigh, C. M. Ó., 2019b, Viscoelastic and drop-weight impact properties of an acrylic-matrix composite and a conventional thermoset composite—a comparative study, *Materials Letters*, 238, 38-41.
- Pincheira, G., Canales, C., Medina, C., Fernández, E. ve Flores, P., 2018, Influence of aramid fibers on the mechanical behavior of a hybrid carbon–aramid–reinforced epoxy composite, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 232 (1), 58-66.

- Pini, T., Caimmi, F., Briatico-Vangosa, F., Frassine, R. ve Rink, M., 2017, Fracture initiation and propagation in unidirectional CF composites based on thermoplastic acrylic resins, *Engineering Fracture Mechanics*, 184, 51-58.
- Pini, T., Briatico-Vangosa, F., Frassine, R. ve Rink, M., 2018a, Matrix toughness transfer and fibre bridging laws in acrylic resin based CF composites, *Engineering Fracture Mechanics*, 203, 115-125.
- Pini, T., Briatico-Vangosa, F., Frassine, R. ve Rink, M., 2018b, Fracture toughness of acrylic resins: viscoelastic effects and deformation mechanisms, *Polymer Engineering & Science*, 58 (3), 369-376.
- Pinto, T. H. L., Gul, W., Torres, L. A. G., Cimini, C. A. ve Ha, S. K., 2021, Experimental and Numerical Comparison of Impact Behavior between Thermoplastic and Thermoset Composite for Wind Turbine Blades, *Materials*, 14 (21), 6377.
- Priyanka, P., Mali, H. S. ve Dixit, A., 2021, Dynamic mechanical behaviour of kevlar and carbon-kevlar hybrid fibre reinforced polymer composites, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235 (19), 4181-4193.
- Priyanka, P., Mali, H. S. ve Dixit, A., 2023, Carbon-Kevlar intraply hybrid fabric polymer composites: mechanical performance, *Iranian Polymer Journal*, 32 (5), 633-645.
- Qi, Z., Cai, D. a., Zhang, N., Long, L. ve Zhou, G., 2023, Experimental and numerical study on the mechanical properties of carbon/aramid intralayer hybrid composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 07316844231172705.
- Quanjin, M., Salim, M., Rejab, M., Bernhardt, O.-E. ve Nasution, A. Y., 2020, Quasi-static crushing response of square hybrid carbon/aramid tube for automotive crash box application, *Materials Today: Proceedings*, 27, 683-690.
- Rajasekar, B. R., Asokan, R., Senbagan, M. ve Karthika, R., 2018, Evaluation on mechanical properties of intra-ply hybrid carbon-aramid/epoxy composite laminates, *Materials Today: Proceedings*, 5 (11), 25323-25330.
- Rajasekar, R., Asokan, R., Santulli, C., Pavlovic, A. ve Fragassa, C., 2019, The effect of fibre bridging on Mode I interlaminar fracture toughness of carbon-aramid/epoxy intra-ply hybrid laminates, *Tribology in Industry*, 41 (1), 64-75.
- Samson, P. E., Kumaran, S. S., Shanmugam, V. ve Das, O., 2023, The effect of fiber orientation and stacking sequence on carbon/Kevlar/epoxy intraply hybrid composites under dynamic loading conditions, *Polymers for Advanced Technologies*, 34 (5), 1585-1598.
- Sebaey, T. ve Wagih, A., 2019, Flexural properties of notched carbon-aramid hybrid composite laminates, *Journal of Composite Materials*, 53 (28-30), 4137-4148.
- Shah, S., Megat-Yusoff, P., Karuppanan, S., Choudhry, R., Ahmad, F., Sajid, Z., Gerard, P. ve Sharp, K., 2021a, Performance comparison of resin-infused thermoplastic and thermoset 3D fabric composites under impact loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, 189, 105984.
- Shah, S., Megat-Yusoff, P., Karuppanan, S., Choudhry, R. S., Din, I. U., Othman, A., Sharp, K. ve Gerard, P., 2021b, Compression and buckling after impact response of resin-infused thermoplastic and thermoset 3D woven composites, *Composites Part B: Engineering*, 207, 108592.
- Shah, S. Z. H., Megat-Yusoff, P. S. M., Karuppanan, S., Choudhry, R. S., Ahmad, F. ve Sajid, Z., 2021c, Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Novel Resin-infused Thermoplastic and Conventional Thermoset 3D Fabric Composites, *Applied Composite Materials*, 1-31.

- Shah, S. Z. H., Megat-Yusoff, P. S., Karuppanan, S., Choudhry, R. S. ve Sajid, Z., 2022, Off-Axis and On-Axis Performance of Novel Acrylic Thermoplastic (Elium®) 3D Fibre-Reinforced Composites under Flexure Load, *Polymers*, 14 (11), 2225.
- Shanmugam, L., Feng, X. ve Yang, J., 2019a, Enhanced interphase between thermoplastic matrix and UHMWPE fiber sized with CNT-modified polydopamine coating, *Composites Science and Technology*, 174, 212-220.
- Shanmugam, L., Kazemi, M., Rao, Z., Lu, D., Wang, X., Wang, B., Yang, L. ve Yang, J., 2019b, Enhanced mode I fracture toughness of UHMWPE fabric/thermoplastic laminates with combined surface treatments of polydopamine and functionalized carbon nanotubes, *Composites Part B: Engineering*, 178, 107450.
- Shanmugam, L., Kazemi, M. E., Li, Z., Luo, W., Xiang, Y., Yang, L. ve Yang, J., 2020, Low-velocity impact behavior of UHMWPE fabric/thermoplastic laminates with combined surface treatments of polydopamine and functionalized carbon nanotubes, *Composites Communications*, 22, 100527.
- Shonar, M. ve Chalivendra, V., 2023, Piezoresistive damage sensing and mechanical characteristics of carbon/glass hybrid thermoplastic composites, *Journal of Composite Materials*, 57 (11), 1909-1926.
- Stanley, W. F., Bandaru, A. K., Rana, S., Parveen, S. ve Pichandi, S., 2021, Mechanical, dynamic-mechanical and wear performance of novel non-crimp glass fabric-reinforced liquid thermoplastic composites filled with cellulose microcrystals, *Materials & Design*, 212, 110276.
- Taheri, F. ve Llanos, J. R., 2024, Comparative Performance of Kevlar, Glass and Basalt Epoxy-and Elium-Based Composites under Static-, Low-and High-Velocity Loading Scenarios—Introduction to an Effective Recyclable and Eco-Friendly Composite, *Polymers*, 16 (11), 1494.
- Ulus, H., Kaybal, H. B., Cacık, F., Eskizeybek, V. ve Avcı, A., 2022, Fracture and dynamic mechanical analysis of seawater aged aluminum-BFRP hybrid adhesive joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 268, 108507.
- Wagih, A., Junaedi, H., Mahmoud, H. A., Lubineau, G., Kumar, A. ve Sebaey, T. A., 2024, Enhanced damage tolerance and fracture toughness of lightweight carbon-Kevlar fiber hybrid laminate, *Journal of Composite Materials*, 58 (9), 1109-1121.
- Xu, K., Liu, L., Zhi, J., Chen, W. ve Tay, T., 2024, Hygrothermal effects on ballistic behavior of toughened CFRP laminates, *International Journal of Mechanical Sciences*, 280, 109531.
- Yaghoobi, H. ve Taheri, F., 2021, Mechanical performance of a novel environmentally friendly basalt-elium® thermoplastic composite and its stainless steel-based fiber metal laminate, *Polymer Composites*, 42 (9), 4660-4672.
- Yin, H.-f., Zhou, W., Zhang, P.-f. ve Ma, L.-H., 2021, Flexural progressive damage and failure behavior of carbon-aramid/epoxy hybrid woven composites, *Journal of Composite Materials*, 55 (7), 937-948.
- Ying, S., Mengyun, T., Zhijun, R., Baohui, S. ve Li, C., 2017, An experimental investigation on the low-velocity impact response of carbon-aramid/epoxy hybrid composite laminates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36 (6), 422-434.
- Zhang, H., Yao, Y., Zhu, D., Mobasher, B. ve Huang, L., 2016, Tensile mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer composite under varying strain rates and temperatures, *Polymer Testing*, 51, 29-39.
- Zhou, H., Du, X., Liu, H.-Y., Zhou, H., Zhang, Y. ve Mai, Y.-W., 2017, Delamination toughening of carbon fiber/epoxy laminates by hierarchical carbon nanotube-short carbon fiber interleaves, *Composites Science and Technology*, 140, 46-53.