



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DENİZ ARAÇLARINDAKİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN TEK BİNDİRMELİ
YAPIŞTIRMALI BAĞLANTILARI ÜZERİNE
DENİZ SUYU ETKİSİNİN VE HASAR
OLUŞUMUNUN İNCELENMESİ**

DUDU MERTGENÇ YOLDAŞ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği (Tr) Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Gürcan ATAKÖK

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Eyup BAĞCI

İSTANBUL, 2025



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DENİZ ARAÇLARINDAKİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN TEK BİNDİRMELİ
YAPIŞTIRMALI BAĞLANTILARI ÜZERİNE
DENİZ SUYU ETKİSİNİN VE HASAR
OLUŞUMUNUN İNCELENMESİ**

DUDU MERTGENÇ YOLDAŞ
(723218010)

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği (Tr) Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Gürcan ATAÖK

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Eyup BAĞCI

İSTANBUL, 2025

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmam sürecinde çalışmamın her aşamasında yardımcı olan tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gürcan ATAÖK ve eş danışmanım Sayın Prof. Dr. Eyup BAĞCI hocama teşekkürlerimi sunarım.

Marmara Üniversitesi Rektörü ve Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof.Dr. Mustafa KURT, Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ, Doç.Dr. Menderes KAM, Dr. Öğr. Üyesi Bilçen MUTLU MİTİL ve Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince katkılarından dolayı DEÜ Makine ve Metal Bölüm Başkanı Prof. Dr.Nurcan BAYKUŞ SAVAŞANERİL, DEÜ Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr.Mehmet ÇAKMAKÇI, DEÜ Makine Mühendisliği Bölümü'nden Prof.Dr. Yusuf ARMAN, Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr.Yeliz PEKBEY, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Mehmet ÇEVİK, Prof.Dr. Buket OKUTAN BABA'ya ve Atılım Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Dr. Öğr. Üyesi Halis KANDAŞ'a teşekkür ederim.

Deneylerimde yardımını esirgemeyen Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Dr. Hasan Yavuz ÜNAL'a, deney malzemelerinin hazırlanmasında yardımcı olan FİBERMAK Mühendislik Makina Kalıp Kompozit San. Tic.Ltd. Şti'den Dr. Tolga DOĞAN'a ve DEÜ Makine Mühendisliği teknikeri Canip DURAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam boyunca sürekli destek ve sabır gösterdikleri için sevgili eşim Makine Yüksek Mühendisi Fatih YOLDAŞ, çocuklarım Özgür YOLDAŞ ve Mert YOLDAŞ'a, yaşamım boyunca her alanda olduğu gibi bana sınırsız maddi ve manevi destek veren Anne ve Babama sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Dudu MERTGENÇ YOLDAŞ

Ocak 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
YENİLİK BEYANI.....	ix
SEMBOLLER	xi
KISALTMALAR	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
TABLO LİSTESİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması.....	3
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
2.1. Kompozit Malzemeler ve Tarihsel Süreci	29
2.2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri	29
2.3 Kompozitlerin Sınıflandırılması	32
2.4. Deniz Uygulamalarında En Çok Kullanılan Kompozitler	39
2.4.1. Cam Fiber Takviyeli Polimerler (GFRP).....	39
2.4.2. Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP)	40
2.4.3. Matrisler (Reçineler).....	41
2.5. Çevresel Parametrelerin Etkileri	42
2.5.1. Nem ve Sıcaklık.....	42
2.5.2. Ultraviyole Radyasyon (UV) ve Çözeltiler	45
2.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Süreçleri	46
2.6.1. En Çok Kullanılan Üretim Yöntemleri	47
2.7. Denizcilik Endüstrisinde Kompozit Malzemelerin Uygulanması	47
2.8. Yapıştırılarak Birleştirilen Kompozit Bağlantılar.....	47

2.9. Denizcilik Endüstrisinde Kompozit Malzemelerin Uygulanması	50
2.10. Askeri Uygulamalar İçin Yapılan Çalışmalar	51
2.11. Sivil Uygulamalar İçin Yapılan Çalışmalar.....	51
2.12. Kompozit Malzemelerin Mekaniği.....	52
2.12.1. Bir Laminanın Makromekanik Analizi.....	52
2.12.2. Anizotropik Malzemelerin Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkileri.....	54
2.12.3. Anizotropik Malzeme	56
2.12.4. Monoklinik Malzeme	56
2.12.5. Ortotropik Malzeme	58
2.13. İki Boyutlu Tek Yönlü Lamina İçin Hooke Kanunu.....	60
2.13.1. Düzlem Gerilme Kabulü	60
2.13.2. Üç Boyutlu Hooke Kanunun İki Boyuta İndirgenmesi.....	61
2.14. Kompozit Malzemenin Mukavemet Değeri	62
2.14.1. Termal ve Genleşme Katsayıları	62
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	64
3.1. Kompozit Malzemelerin Üretimi.....	64
3.1.1 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	66
3.2. Numunelerin Hazırlanması	67
3.2.1. Deniz Suyu Emilimi.....	72
3.3. Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	80
3.3.1. Eksenel Darbe Deneyi	80
3.3.2. Üç Nokta Eğilme Deneyleri.....	90
3.3.3. Kuru Ortam Numunelerinin Üç Nokta Eğilme Deneyleri	94
3.3.4. GFRP ve CFRP Kuru Ortam Numuneleri	95
3.3.5. Deniz Suyunda Bekletilen GFRP ve CFRP Numuneler	96
3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntü Analizi.....	105

3.4.1. Eksenel Darbe Deneyi Sonrası GFRP Numunelerinin SEM Görüntüleri	105
3.4.2. Üç Nokta Eğilme Deneyi Sonrası GFRP Numunelerinin SEM Görüntüleri..	110
3.4.3. Eksenel Darbe Deneyi Sonrası CFRP Numunelerinin SEM Görüntüleri.....	113
3.4.4. Üç Nokta Eğilme Deneyi Sonrası CFRP Numunelerinin SEM Görüntüleri ..	117
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	122
KAYNAKLAR	124

ÖZGEÇMİŞ



ÖZET

DENİZ ARAÇLARINDAKİ KOMPOZİT MALZEMELERİN TEK BİNDİRMELİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI ÜZERİNE DENİZ SUYU ETKİSİNİN VE HASAR OLUŞUMUNUN İNCELENMESİ

Kompozit, en az iki malzemeden oluşan makroskopik yapılardır. Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre avantajları olan ağırlık, mukavemet, rijitlik, korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik özelliği bu malzemelerin kullanımını giderek arttırmaktadır. Kompozit malzemelerin bu özellikleri denizcilik uygulamalarında kullanılabilecek en iyi malzeme olduğunu göstermektedir.

Kompozit malzemeler elyaflarla güçlendirilmiş bir matristen oluşmaktadır. Cam elyaf takviyeli polimerler (GFRP) ve karbon elyaf takviyeli polimerler (CFRP) denizcilik uygulamaları için yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerdir. CFRP yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine sahipken GFRP daha düşük bir mukavemet ve sertliği vardır. Kompozit malzemeler üst yapılarda (güverteler, perdeler, direk sistemleri, pervaneler, tahrik milleri, dümenler, borular, valfler), eğlence alanında (sürat tekneleri, yarış yelkenlileri, kanolar) ve ticari alanda (cankurtaran botları, şamandıralar, yolcu feribotları, derin deniz dalgıçları, balıkçı gemileri) gibi geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Deniz ortamlarında nem ve sıcaklığa, UV (Ultraviyole Radyasyon) ve çözeltilere maruz kalma denizcilik uygulamalarında kompozitler için en büyük zorluktur. Bu çevresel koşullar kompozit malzemeler için en önemli yaşlandırma faktörleridir. Bu faktörler, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirebilir. Bu çalışmada, tek bindirmeli yapıştırılmış GFRP ve CFRP numunelerinin deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra malzeme üzerindeki etkilerini araştırmaktır. 0/90 oryantasyonlu twill örgülü yedi katlı GFRP ve sekiz katlı CFRP kompozit malzemeler elle yatırma yöntemi kullanılmış daha sonra sıcak pres yöntemi ile imalatı gerçekleştirilmiştir. Ege Denizi, İzmir ili (Selçuk/Pamucak) bölgesinden Eylül ayında 23.5°C'den deniz suyu alınmıştır. Bu deniz suyu farklı kaplarda GFRP ve CFRP kompozit numuneler için ayrı ayrı 1 ay (30 gün), 2 ay (60 gün) ve 3 ay (90 gün) deniz suyunda bekletilmiştir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları için numuneler ASTM D5868- 01'e göre kesilmişlerdir. Öncelikle eksenel darbe deneyleri, daha sonra ASTM D790'a göre üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. Malzemedeki hasar, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ZEISS GEMINESEM 560 ile incelenmiştir.

Daha sonra GFRP ve CFRP kompozit numunelerinin bekleme süresi boyunca deniz suyu dayanıklılığı, nem tutma oranı (%), hasar görüntüleri ve mekanik özellikleri ayrı ayrı karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar tek bindirmeli yapıştırırmalı GFRP ve CFRP bağlantıların farklı sürelerde deniz suyunda bekletilmesi sonucunda en iyi bağlantının karşılaştırılarak belirlenmesi malzeme seçimi ve bağlantı yöntemi için büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bu önerilen bağlantıda kullanılan yapıştırıcı ara yüzünde başlayacak hasarın bilinmesi, kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde oluşan değişikliklerin deniz suyunun etkisiyle hangi aşamada olduğunun gözlemlenebilmesine de olanak tanımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deniz suyu emilimi, eksenel darbe testi, kompozit malzemeler, mekanik özellikler, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı, üç nokta eğilme testi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SEA WATER EFFECT AND DAMAGE FORMATION ON SINGLE LAP ADHESIVE JOINTS OF COMPOSITE MATERIALS IN MARINE VEHICLES

Composites are macroscopic structures consisting of at least two materials. The advantages of composite materials over traditional materials such as weight, strength, stiffness, corrosion resistance and formability increase the use of these materials. These properties of composite materials show that it is the best material that can be used in marine applications. Composite materials consist of a matrix reinforced with fibres. Glass fibre reinforced polymers (GFRP) and carbon fibre reinforced polymers (CFRP) are widely used composite materials for marine applications. CFRP has high strength and stiffness values while GFRP has a lower strength and stiffness. Composite materials are used in a wide range of applications such as superstructures (decks, bulkheads, mast systems, propellers, drive shafts, rudders, pipes, valves), recreational (speed boats, racing sailboats, canoes) and commercial (lifeboats, buoys, passenger ferries, deep-sea divers, fishing vessels). Exposure to humidity and temperature, UV (Ultraviolet Radiation) and solutions in marine environments is the biggest challenge for composites in marine applications. These environmental conditions are the most important ageing factors for composite materials. These factors can change the mechanical properties of composite materials. The aim of this study is to investigate the effects of single lap bonded GFRP and CFRP specimens on the material after exposure to seawater. Seven-ply GFRP and eight-ply CFRP composite materials with 0/90 orientation twill weave were fabricated by hand lay-up method and then hot press method. Sea water was taken from the Aegean Sea, Izmir province (Selçuk/Pamucak) in September at 23.5°C. This seawater was kept in seawater for 1 month (30 days), 2 months (60 days) and 3 months (90 days) separately for GFRP and CFRP composite samples in different containers. The specimens for single lap bonded joints were cut according to ASTM D5868- 01. Three-point bending tests were then performed according to ASTM D790. The damage in the material was examined by scanning electron microscopy (SEM) ZEISS GEMINESEM 560. Then, the seawater resistance, moisture retention rate (%), damage images and mechanical properties of GFRP and CFRP composite specimens formed by single lap adhesive bonding were compared and evaluated separately. The results show that the determination

of the best connection by comparing the single lap adhesive bonded GFRP and CFRP joints in seawater for different durations provides a great advantage for material selection and connection method. In addition, knowing the damage that will start at the adhesive interface used in this proposed connection allows the changes in the mechanical properties of the composite material to be observed at which stage due to the effect of seawater.

Keywords: Axial impact test, bonding connection, composite materials, mechanical properties, seawater absorption, three-point bending test



YENİLİK BEYANI

Dünya petrol rezervlerinin azalması ve mevcut enerji ve üretim kaynaklarının çevre kirliliği, geri dönüşüm yöntemlerinin kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir. Kompozit malzemeler arasında termosetlerin geri dönüşümü için mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm yöntemleri bulunmaktadır. Termoset kompozit malzemelerin geri dönüşümü, takviye ve matris malzemelerinin üretiminde ekonomik olarak kaynak ve enerji tasarrufu sağlar. Epoksi/vinilester/polyester-elyaf oluşumlu kompozit malzemelerin termoset reçine ile birleştirilmesiyle elde edilen sertlik, mukavemet, hafiflik, korozyon direnci, tasarım genişliği ve esneklik gibi üstün özellikler nedeniyle, makro düzeyde, denizcilik sektörü, uzay teknolojisi, rüzgar enerjisi, tıbbi cihaz üretimi, robot teknolojisi, kimya endüstrisi, elektrik-elektronik teknolojisi, inşaat ve yapı sektörü, otomotiv sektörü, savunma sanayi ve havacılık sektörü, gıda ve tarım sektörü, spor ekipmanları üretimi gibi birçok alanda kompozit malzemelerin kullanımının artmasıyla çevre dostu sürdürülebilir bir gelişme gerçekleşmektedir.

Deniz ortamlarında nem, sıcaklık, UV (Ultraviyole Radyasyon) ve çözeltilere maruz kalma denizcilik uygulamalarında kullanılan kompozitler için en büyük zorluktur. Bu faktörler, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirebilir. Bu çalışmada, tek bindirmeli yapıştırılmış GFRP ve CFRP numunelerinin deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra malzeme üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. 0/90 oryantasyonlu twill örgülü yedi katlı GFRP ve sekiz katlı CFRP kompozit malzemeler elle yatırma yöntemi kullanılmış daha sonra sıcak pres yöntemi ile imalatı gerçekleştirilmiştir. Ege Denizi, İzmir ili (Selçuk/Pamucak) bölgesinden Eylül ayında 23.5°C'den deniz suyu alınmıştır. Bu deniz suyu farklı kaplarda 0,2 mm yapıştırma kalınlığına sahip GFRP ve CFRP kompozit numuneler için ayrı ayrı 1 ay (30 gün), 2 ay (60 gün) ve 3 ay (90 gün) deniz suyunda bekletilmiştir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları için numuneler ASTM D5868- 01'e göre kesilmişlerdir. Daha sonra ASTM D790'a göre üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Malzemedeki hasar, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ZEISS GEMINESEM 560 ile incelenmiştir. Ardından GFRP ve CFRP kompozit numunelerinin bekleme süresi boyunca deniz suyu dayanıklılığı, nem tutma oranı (%), hasar görüntüleri ve mekanik özellikleri ayrı ayrı karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar tek bindirmeli yapıştırmalı GFRP ve CFRP bağlantıların farklı sürelerde deniz suyunda bekletilmesi sonucunda en iyi bağlantının karşılaştırılarak belirlenmesi malzeme seçimi

ve bağlantı yöntemi için büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bu önerilen bağlantıda kullanılan yapıştırıcıda başlayacak hasarın bilinmesi, kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde oluşan değişikliklerin deniz suyunun etkisiyle hangi aşamada olduğunun gözlemlenebilmesine de olanak tanımaktadır.

Kompozit malzemelerde bağlantı çalışmaları genellikle tek kompozit malzeme düzeyinde incelenmiştir. Tek bindirmeli yapıştırılmalı bağlantılardaki farklı kompozit malzeme ve çevresel faktörlerin uzun süreli etkilerinin belirsizliği uygulamalarda önemli bir engeldir. Tek bindirmeli bağlantılarda daha önce yapılan araştırmaların çoğu farklı kompozit malzemeler ve deniz suyu tarafından oluşturulan eğilme gerilimini ilişkilendirmemiştir. Genellikle kompozit bağlantılara bağlanan malzemenin eğilme mukavemeti ile ilişkilidir. CFRP tek bindirmeli yapıştırma bağlantılı numunelerin deniz suyunda GFRP'den daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Bu çalışmadaki yöntemler ve kompozit malzemelerle yapıştırma bağlantılarının kullanımı, deniz ortamında geleneksel bağlantıların yerini alabilecek potansiyele sahiptir. Böylece yüksek mukavemetli, hafif ağırlıklı ve düşük yakıt tüketimli karbon ayak izi azalması ortaya çıkmaktadır.

SEMBOLLER

ε	: Birim Şekil Değişirme
ρ	: Yoğunluk (g/cm ³)
γ	: Birim Kayma Şekil Değiştirmesi
β	: Çarpma sonrası yükselme açısı (°)
α	: Çekiç serbest bırakma açısı (°)
τ	: Kayma Gerilmesi (MPa)
σ	: Normal Gerilme (MPa)
ε_f	: Dış yüzeyin gerinimi (mm/mm)
β_f	: Nem Genleşme Katsayısı (m/m/kg/kg)
σ_f	: Orta noktada kiriş yüzeyindeki gerilme (MPa)
α_f	: Termal Genleşme Katsayısı (m/m/°C)
[C]	: Sertlik Matrisi
[S]	: Uyumluluk Matrisi
B	: Test edilen kirişin genişliği (mm)
C	: Konsantrasyon (mol/m ³)
D	: Difüzyon katsayısı (m ² /s)
D	: Test edilen kirişin derinliği (mm)
D _m	: Kiriş merkezinin maksimum sehim (mm)
E	: Elastisite Modülü (GPa)
G	: Kayma Modülü (MPa)
G	: Yerçekimi ivmesi (m / s ²)
h	: Kompozit malzemenin kalınlığı (mm)
J	: Difüzyon akış miktarı, mol (m ⁻² s ⁻¹)
L	: İki destek arası mesafe (mm)
L _m	: Kompozit malzemenin uzunluğu (mm)
M	: Çekicinin kütlesi (kg)
P	: Yük-sehim eğrisinin belirli bir noktasındaki yük (N)
R	: Sarkaç kolu (m)
T	: Zaman (s)

V : Hacim Oranı (cm^3)

W : Kompozit malzemenin genişliği (mm)

Wa : Çekicinin serbest bırakılmadan önceki potansiyel enerjisi (m)

Wb : Numune kırıldıktan sonra belirli bir yüksekliğe kadar yükselen çekicinin potansiyel enerjisi (m).

X : Konum (m)



KISALTMALAR

AE: Akustik Emisyon

ASTM: Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (American Society for Testing and Materials)

CCC: Karbon-Karbon Kompozitler

CFRP: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Epoxy)

CFTE: Cam Fiber Takviyeli Epoksi

CFVE: Karbon Fiber-Vinil Ester

CMC: Seramik Matris Kompozitler

CZM: Yapışkan Bölge Modeli

DIC: Dijital Görüntü Korelasyonu

DNS: Çift Çentikli Kesme Kayma Testi

DSC: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri

FOS: Fiber Optik Sensör

FRP: Fiber Takviyeli Polimer (Fiber Reinforced Polymer)

GFRP: Cam Elyaf Takviyeli Polimer (Glass Fiber Reinforced Epoxy)

ILSS: Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti

ISO: Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)

KFTE: Karbon Fiber Takviyeli Epoksi

MMC: Metal Matris Kompozitler

PAN: Polimer Elyaf Poliakrilonitril

PMC: Polimer Matris Kompozitler

PVC: Polivinil Klorür

RTM: Reçine Transfer Yöntemi

SBS: Kısa Kirişli Kesme Testi

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)

SIF: Kritik Gerilim Yoğunluk Faktörü

TSE: Türk Standartları Enstitüsü

UD: Tek Yönlü Prepreg

UV: Ultraviyole Radyasyon

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. FRP kompozit yapıların en yaygın kullanım şeması: (a) tek yönlü laminat (b) çift yönlü laminat (dokuma kat) ve (c) çok yönlü laminat, yarı-izotropik oryantasyon dizisi $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{6S}$	31
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	32
Şekil 2.3. Kompozitlerin içerdikleri takviye malzemeye göre sınıflandırılması	33
Şekil 2.4. Partikülata takviyeli kompozit	33
Şekil 2.5. Flake takviyeli kompozit	34
Şekil 2.6. a) Sürekli fiberler (uzun fiberler) ve b) kısa fiberler (rastgele fiberler) takviyeli kompozitler	35
Şekil 2. 7.Twill örgü	35
Şekil 2.8. Plain örgü	35
Şekil 2. 9. Prepreg üretim şeması	37
Şekil 2.10. Kompozit nem emilim mekanizması	42
Şekil 2.11. Kompozitlerde üretim yöntemleri	46
Şekil 2.12. Tek bindirmeli yapıştırırmalı birleştirme	48
Şekil 2.13. Mekanik bağlantılar (a) yapıştırılmış bağlantılar (b) için yük dağılımı karşılaştırması.....	50
Şekil 2.14. Tabakalı kompozitlerin analiz şeması	53
Şekil 2.15.Üç laminadan oluşmuş laminat	53
Şekil 2.16. Bir monoklinik malzemede 1-2 simetri düzlemi için koordinat eksenlerinin dönüşümü	56
Şekil 2.17. Monoklinik malzemeden yapılmış kübik elemanın deformasyonu	57
Şekil 2.18. Ortotropik bir malzemeye örnek olarak verilebilecek dikdörtgen dizilişli fiberleri bulunan tek yönlü lamina	59
Şekil 2.19. Ortotropik malzemeden yapılmış kübik elemanın deformasyonu	59
Şekil 2.20. İnce bir plaka için düzlem gerilme şartları	61
Şekil 3.1. GFRP kompozit plakaların(a) ve CFRP kompozit plakaların üretimi(b)	64
Şekil 3.2. GFRP numunelerin kesimi (a) ve CFRP numunelerin kesimi (b)	65
Şekil 3.3. GFRP ve CFRP kesilmiş numuneler.....	66
Şekil 3.4. Test numunelerinin geometri modeli	67
Şekil 3.5. Numunelerin işaretlenmesi GFRP (a) ve CFRP (b).....	68
Şekil 3.6. Yapıştırma öncesi numunelerin hazırlanması	68
Şekil 3.7. Çift Kartuşlu manuel uygulama tabancası ve Loctite Hysol-9466	69
Şekil 3.8. Numunelere Loctite Hysol-9466 yapıştırıcının uygulanması	69
Şekil 3.9. Dijital kumpasla GFRP (a) ve CFRP (b) yapıştırma numunelerinin kalınlık kontrolü.....	70
Şekil 3.10. Karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) numunelerin kodlanmış örnekleri	71
Şekil 3.11. Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) numunelerin kodlanmış örnekleri.....	71
Şekil 3.12. GFRP ve CFRP numunelerin üst görünüş (a) ve yan görünüş (b) örnekleri	71
Şekil 3.13. GFRP ve CFRP numunelerinin deniz suyunda bekletilmesi	72
Şekil 3.14. Daihan Biomedical hassas terazi cihazı	73
Şekil 3.15. Kuru ortam, 1.- 2.-3. ay GFRP numunelerinin nem tutma oranı	74

Şekil 3.16. Kuru ortam, 1.- 2.-3. ay CFRP numunelerinin nem tutma oranı	75
Şekil 3.17. Kuru ortam, 1.- 2.-3. ay GFRP ve CFRP Numunelerinin nem tutma oranının karşılaştırılması	76
Şekil 3.18. Eksenel darbe deneyi cihazı	81
Şekil 3.19. Eksenel darbeye maruz kalan kuru ortam GFRP numuneleri	83
Şekil 3.20. Eksenel darbeye maruz kalan 1 ay deniz suyunda bekletilen	83
Şekil 3.21. Eksenel darbeye maruz kalan 2 ay deniz suyunda bekletilen	84
Şekil 3.22. Eksenel darbeye maruz kalan 3 ay deniz suyunda bekletilen	84
Şekil 3.23. Kuru ortam ve deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletilen GFRP numunelerinin absorbe edilen enerji miktarı grafiği.....	85
Şekil 3.24. Eksenel darbeye maruz kalan kuru ortam CFRP numuneler	86
Şekil 3.25. Eksenel darbeye maruz kalan 1 ay deniz suyunda bekletilen CFRP numuneleri	86
Şekil 3.26. Eksenel darbeye maruz kalan 2 ay deniz suyunda bekletilen CFRP numuneleri	87
Şekil 3.27. Eksenel darbeye maruz kalan 3 ay deniz suyunda bekletilen CFRP numuneleri	87
Şekil 3.28. Kuru ortam ve deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletilen CFRP Numunelerinin absorbe edilen enerji miktarı grafiği.....	88
Şekil 3.29. GFRP ve CFRP kompozit numunelerin absorbe edilen enerji miktarının karşılaştırılması grafiği	89
Şekil 3.30. Üç nokta eğilme deneyi şematik görünümü.....	92
Şekil 3.31. Üç nokta eğilme deney cihazı	94
Şekil 3.32. Üç nokta eğilme deney cihazında numunenin konumlandırılması	94
Şekil 3.33. G-7-K-1, G-7-K-2 ve G-7-K-3 deney sonrası görüntüleri	95
Şekil 3.34. C-8-K-1, C-8-K-2 ve C-8-K-3 deney sonrası görüntüleri.....	96
Şekil 3.35. G-7-1A-1, G-7-1A-2 VE G-7-1A-3 deney sonrası görüntüleri	97
Şekil 3.36. C-8-1A-1, C-8-1A-2 ve C-8-1A-3 deney sonrası görüntüleri.....	97
Şekil 3.37. G-7-2A-1, G-7-2A-2 VE G-7-2A-3 deney sonrası görüntüleri	98
Şekil 3.38. C-8-2A-1, C-8-2A-2 ve C-8-2A-3 deney sonrası görüntüleri.....	99
Şekil 3.39. G-7-3A-1, G-7-3A-2 ve G-7-3A-3 deney sonrası görüntüleri	99
Şekil 3.40. C-8-3A-1, C-8-3A-2 ve C-8-3A-3 deney sonrası görüntüleri.....	100
Şekil 3.41. 1, 2 ve 3 ay deniz suyunda bekletilen GFRP numunelerinin gerilim-gerinim grafiği	101
Şekil 3.42. 1, 2 ve 3 ay deniz suyunda bekletilen CFRP numunelerinin gerilim-gerinim grafiği	103
Şekil 3.43. (a)-(b) ZEISS GEMINESEM 560 taramalı elektron mikroskobu (SEM) .	105
Şekil 3.44. G-7-K numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri.....	106
Şekil 3.45. G-7-1A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri.....	107
Şekil 3.46. G-7-2A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri.....	108
Şekil 3.47. G-7-3A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri.....	109
Şekil 3.48. G-7-K numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri	110
Şekil 3.49. G-7-1A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri ...	111
Şekil 3.50. G-7-2A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri ...	112
Şekil 3.51. G-7-2A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri ...	113

Şekil 3.52. C-8-K numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri	114
Şekil 3.53. C-8-1A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri	115
Şekil 3.54. C-8-2A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri	116
Şekil 3.55. C-8-3A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri	117
Şekil 3.56. C-8-K numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri	118
Şekil 3.57. C-8-1A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri ...	119
Şekil 3.58. C-8-2A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri ...	120
Şekil 3.59. C-8-3A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri ...	121



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Termoset ve termoplastik arasındaki farklar	37
Tablo 2.2. Açık kalıplama ve kapalı kalıplama	47
Tablo 3.1. F-RES 21 Reçine özellikleri	64
Tablo 3.2. F-Hard 22 Sertleştirici Özellikleri	65
Tablo 3.3. Karışım özellikleri	65
Tablo 3.4. Kürleşme sonrası özellikler	65
Tablo 3.5. Loctite Hysol-9466 Yapıştırıcı Malzemenin Özellikleri	67
Tablo 3.6. Karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) ve Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) numunelerin kod oluşturulması.....	70
Tablo 3.7. Kuru Ortam ve Deniz Suyunda 1, 2 ve 3 Ay Bekletilen GFRP Numunelerinin Nem Tutma Oranı (%).....	73
Tablo 3.8. Kuru Ortam ve Deniz Suyunda 1, 2 ve 3 Ay Bekletilen CFRP Numunelerinin Nem Tutma Oranı (%).....	75
Tablo 3.9. GFRP numunelerinin eksenel darbe testi ölçümleri	85
Tablo 3.10. CFRP numunelerinin eksenel darbe testi ölçümleri	88
Tablo 3.11. GFRP tek bindirmeli bağlantı numuneleri için young modülü (E)	101
Tablo 3.12. CFRP tek bindirmeli bağlantı numuneleri için young modülü (E)	104

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, ilk uygarlıklara ev sahipliği yapmaktan gelecekteki yeniliklere olanak sağlamaya kadar insanlık tarihi boyunca önemli bir rol oynamıştır. Kompozit malzemeler, geleneksel malzemenin yerini giderek değiştirerek ve daha popüler hale gelmektedir. Kompozitlerin pek çok faydası vardır; bunların arasında en önemlileri korozyon direnci, tasarım esnekliği, dayanıklılık, hafiflik ve sağlamlıktır. Kompozitler hava, kara ve su taşımacılığı, inşaat endüstrisi, oyuncaklar, enstrümantasyon, tıp dahil tüm uygulamalarda ve daha birçok alanda kullanılan ürünler gibi günlük yaşamımıza nüfuz etmiştir. Kompozit malzemeler birbirinden oldukça farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Bunlar birbirine karışmaz ve çözünmez. Kompozitteki farklı malzemeler, kompozite benzersiz özellikler kazandırmak için birlikte çalışır. Kompozit malzemelerin denizcilik sektöründe bilinir hale gelmesinin en önemli nedeni çelik, alüminyum ve ahşapta karşılaşılan korozyon sorununu çözebilmesidir. Ayrıca yüksek çekme dayanımı, düşük ısı genleşme ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı gibi üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler geleneksel malzemelerin yerini almaya başlamıştır. İlk kompozit ticari gövde 1946 yılında yapılmıştır. Özellikle ticari gemilerde bulunan üst ağırlık için ağırlık azaltımı çok önemlidir. Bu durum dökme kalıplama ve sıkıştırma kalıplama gibi çeşitli yeni yöntemlerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. 1950'lerin başında filament sarma, pultrüzyon ve vakum torbalı kalıplama gibi üretim yöntemleri geliştirilmiştir. 1960'larda denizcilik sektörü kompozit malzemelerin en büyük tüketicisi haline gelmiştir. Denizcilik sektöründe şaft, boru, ızgara, kanal, boru, gövde gibi elemanlar kompozit malzemelerden üretilmiştir. Ayrıca, her türlü gemi, vana ve diğer deniz altı yapıları için pervaneler, yataklar, ambar kapakları, egzozlar, üst yapı, radome, sonar kubbeleri ve korkuluklarda da kullanılırlar. Kompozit malzemeler deniz ortamlarında sert çevresel etkilere (nem emilimi, sıcaklık değişimi ve UV radyasyonu) maruz kalır ve özellikleri zamanla değişir. [1]. Deniz uygulamalarında kompozit malzemelerin kullanımı, deniz yapılarının dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü önemli ölçüde etkiler. Deniz araçlarının ağırlığını ve üretim süresini azaltmak için, son zamanlarda yapılandırılmış birleştirme yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit yapılar, mekanik olarak tutturulmuş veya yapıştırıcı ile yapılandırılmış bağlantılar kullanılarak birleştirilebilir. Tek bindirmeli yapıştırıcı bağlama,

maliyet, yüksek mukavemet ve sönümlleme gibi diğer geleneksel birleştirme tekniklerine göre avantajlar sağlar. Birleştirme verimliliği, üretim, test, bakım maliyetleri ve diğer bağlantılara kıyasla yük taşıma kapasitesini kontrol etmenin kolaylığı nedeniyle, yapıştırıcı ile bağlanmış bağlantılar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Deniz araçlarında kullanılan cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ve karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin yapıştırma bağlantı tiplerinden tek bindirmeli yapıştırmalı bağlantısının deniz ortamında çevresel koşulların (nem, sıcaklık, UV ışınları ve alkali çözeltinin) etkisinde karıştırılmasıyla ilgili yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasında GFRP ve CFRP kompozitlerde tek bindirmeli yapıştırmalı bağlantısının deniz uygulamalarında maruz kaldığı çevresel etkilerin mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi ve darbe sonrası hasar tiplerinin bulunarak karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Başlangıçta GFRP ve CFRP tek bindirmeli yapıştırmalı bağlantılı kompozit numuneler ayrı ayrı kaplarda 1,2 ve 3 aylık deniz suyunda tutularak bağlantıların yük taşıma altındaki davranışları üç nokta eğilme deneyi ile incelenmiştir. Deniz suyunda 1,2 ve 3 ay bekletilmiş tek bindirmeli yapıştırmalı GFRP ve CFRP kompozit malzemeler üzerindeki seçilen bağlama yönteminin etkisi ve yapıştırıcının, GFRP ve CFRP kompozit malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmesi amaçlanmıştır. Daha sonra sırasıyla nem emilimi (%), eksenel darbe deneyi ve üç nokta eğilme deneyi ile incelenmiştir. GFRP ve CFRP kompozit malzemelerdeki hasar taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Son olarak deniz suyu ortamına bırakılan GFRP ve CFRP yapıştırmalı kompozit bağlantıların mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak deniz suyu ortamında kullanılacak tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantısı için en uygun GFRP ve CFRP kompozit malzemelerin seçilmesi kolaylaştırılmıştır.

1.1. Literatür Araştırması

İnsanlık tarihi boyunca, ilk uygarlıklardan gelecekteki yeniliklerin sağlanmasına kadar kompozit malzemeler önemli bir rol oynamıştır. Kompozitler geleneksel malzemelere (alüminyum ve çelik) göre yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci, hafiflik, sönümlleme ve ısı yalıtım özelliği gibi olağanüstü özellikler sergiler. Bu özellikler sayesinde kompozit malzemelerin sertliği, dayanıklılığı ve yük taşıma kapasitesi geliştirebilir [2].

Denizcilik endüstrisinde kompozit malzemelerin kullanımı 1980'lerin ortasından itibaren artmıştır. Yüksek tuzluluk, değişken sıcaklık, UV (Ultraviyole Radyasyon) ve nem alımı nedeniyle deniz ortamında dayanıklı ve korozyondan etkilenmeyen malzemelere ihtiyaç bulunmaktadır. Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitler üstün mekanik özellikleri nedeniyle uzun yıllardan beri denizcilik alanlarındaki uygulamalarda kullanılmaktadır [3].

Kompozit, en az iki malzemedan oluşan makroskopik yapılardır. Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre avantajları olan ağırlık, mukavemet, rijitlik, korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik özelliği bu malzemelerin kullanımını giderek arttırmaktadır [4].

Aşağıdaki koşulları sağlayan bir malzemeye kompozit malzeme denilmektedir;

1. Üretilmiştir (ahşap gibi doğal olarak oluşan kompozitler hariç).
2. Fiziksel ve/veya kimyasal olarak farklı, uygun şekilde düzenlenmiş, dağıtılmış iki veya daha fazla fazdan oluşur ve bunları ayıran bir arayüz vardır.
3. Hiçbir bileşen tarafından tek başına tanımlanamayan özelliklere sahiptir.

Kompozit malzemeler genellikle geleceğin malzemeleri olarak sunulur. Ömürlerine, güvenliklerine ve tasarım kolaylığına göre gruplandırılabilen çeşitli mekanik fonksiyonlar sağlarlar. Bununla birlikte, bu malzemelerin kullanımı, hem statik hem de dinamik koşullar altında mekanik davranışlarının bilinmesine bağlıdır [5].

Kompozit malzemelerde arayüz, yükün matrizen elyaflara gerinim uyumluluğuna bağlı olarak aktarılabilceğı ortak sınırdır. Arayüz bozulması durumunda, matrisin deformasyonu elyafın deformasyonu ile uyumlu olmadığı için yük aktarılamaz. Kompozit malzemelerinin bütünlüğü, arayüzdeki gerilim uyumluluğu ile garanti edilir [6].

Kompozitler, yükleme yönünde kendilerine yüksek mukavemet ve sertlik sağlayan liflerin varlığı nedeniyle esnektir. FRP kompozitlerde mukavemet kompoziti meydana getiren bileşenlerin dışında arayüz kuvvetine yani yüklerin matrizen liflere aktarılmasına bağlıdır. Ayrıca yükleme yönüne göre lif oryantasyonları yük taşıyan liflerin enine kesit alanını belirler [7].

Literatür iki bölümden oluşmuştur. Öncelikle 8-32 arası araştırma sıvı çözeltiler (deniz suyu, damıtılmış su, musluk suyu ve deiyonize su) ve sıcaklığı içeren çevresel maruz kalmaların fiber takviyeli polimer kompozitler (FRP) üzerindeki etkilerinin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişiklikleri, daha sonraki 33-45 arası araştırma ise yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların birleştirme yöntemleri, yüzey hazırlığı, yapıştırıcı ve yapışan özellikler, yapıştırıcı kalınlığı, bindirme uzunluğu, oryantasyon sırası, kat açısı, dolgu gibi performansını etkileyen parametreler gözden geçirilmiştir.

Muthirakkal ve ark. [8] yaptıkları çalışmada deniz uygulamaları için karbon/vinilester, cam/vinilester, karbon/epoksi ve cam/epoksi kompozitlerin higrotermik yaşlanmasını incelemişlerdir. Epoksi Ciba-Geigy, Araldite-LY 556 ve reçine Amine Sertleştirici HY 951 - ve vinilester olarak Ecmalon 9911, Ecmas Haydarabad, olarak iki reçine türü kullanılmıştır. Numuneler elle yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Numunelerde dokuma mat 2-D lifler [0/90] oryantasyonunu kullanmışlardır. Üretilen numuneler ASTM D 638 çekme testleri için 216×19×3 mm, ASTMD 790 eğilme testleri için 127×12,5×3 mm ve ASTM D2344 katmanlar arası kayma mukavemeti testleri için 24×6,35×3 mm boyutlarında numuneler hazırlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Numuneler sıcaklığı 20°C ila 200°C arasında nem oranı %0-95 bağıl nem ve tuz spreyi ortam koşullarına tutulmuşlardır. Testler 170 gün süre ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler düzenli aralıklarla alınarak yüzey nemi silindi ve ardından kütle değişim davranışını veya nem difüzyonunu izlemek için bir elektronik terazi ile tartılmıştır.

Numunelerin eğilme dayanımları, farklı higrotermik maruz kalma sürelerinde 10 ton kapasiteli ve 90 mm uzunluğunda UTM kullanılarak belirlendi. Katmanlar arası kayma mukavemeti (ILSS) belirlemek için ASTM D2344'e göre üç nokta eğilme testi yapılmıştır. Çekme testleri, 1 mm/dk hızlarında gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (Jeol, JSM 840A, Japonya) kullanılarak kuru ortam ve higrotermik ortama maruz bıraktıktan sonraki numuneleri karakterize etmişlerdir. Nem difüzyonu sıcaklık ve zamanın arayüz bölgesi üzerindeki etkisi SEM kullanılarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda maksimum nem alımının vinilester/karbon numunelerde 50°C, ağırlıkça %0.42, 60°C %0.44 ve 70°C'de ve %0.45 olduğu görülmüştür. Aynı parametre epoksi/cam kompozit numuneler için 50°C, ağırlıkça %0.87, ağırlıkça 60°C %0.90, 70°C'de %0.95 nem emiliminin arttığı yani epoksi/cam kompozit numunelerde daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Vinilester/karbon numuneleri, gerilme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve tabakalar arası kayma mukavemetinde daha düşük bozunma görülmesi nedeniyle epoksi/karbon numunelerinden daha iyi olduğunu bulunmuştur. SEM ile incelenen hasar modlarındaysa elyaf kırılmasının, daha çok olduğu fakat matris bozunması, tüm kompozit numunelerde sıcaklık ve maruz kalma süresi ile artmıştır. 70°C'de şartlandırılmış numunelerde ise daha fazla lif çekme gözlemlenmiştir. Üç sıcaklıktada, epoksi/camın diğer numune türleri olan vinilester/cam ve epoksi/karbon kompozitlere kıyasla daha yüksek matris bozulması göstermiştir.

Li ve ark. [9] Hidrofobik kaplamalı bir kompozitin nasıl oluşturulduğunu, hidrofobik modifikasyonun deniz ortamındaki uzun vadeli davranışını nasıl etkilediğini ve hidrofobik kaplamalı kompozitin nasıl bozulduğunu incelemektedir. Hidrofobik kaplamalı elyaf takviyeli kompozitin su emilimi ve mekanik özellikleri üzerindeki uzun vadeli etkilerini belirlemek için hızlandırılmış yaşlandırma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler, çeşitli çevre sıcaklıklarına ve maruz kalma sürelerine göre yürütülmüştür.

Standard GB/T 30447-2013'e uygun olarak, hidrofobik kaplamalı FRP levhaların ve bozulmamış FRP levhaların yüzey temas açıları, CA200 otomatik tip temas açısı test cihazı (DSA 100) kullanılarak ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan FRP levhalar ve çubuklar, hacim oranları ve lif bileşimleri açısından benzer şekilde seçilmiştir. Hidrofobik kaplamalı FRP levhalar ve FPR çubuklar, aynı çoklu püskürtme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Her grupta üç numune ve her birinin yüzey temas açısını beş farklı noktada

deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak ortalama değer kullanıldı. Hidrofobik kaplamalı elyaf takviyeli kompozitin yüzey yapısı ve morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) teknikleri kullanılarak incelendi. Hidrofobik kaplamalı kompozit üstün uzun vadeli mekanik özellikler ve su direnci sergilediği görülmüştür. Hidrofobik reçine ve elyaf arasındaki hidrojen bağlarının türü ve sayısı bol miktarda olup, su moleküllerine ve aşındırıcı iyonlara karşı arayüz direncini artıran güçlü bir hidrojen bağlama ağı oluşturmuştuğu görülmüştür.

Arun ve ark. [10] normal koşullar ve deniz suyu altında cam/tekstil kumaş takviyeli hibrit kompozitler için gerilim yoğunluk faktörü, tabakalar arası kayma mukavemeti ve darbe tokluğunu deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada normal su, deniz suyu ve asidik ortamı ile karşılaştırılmıştır. Matris malzemesi olarak alkalilere karşı iyi direnç ve iyi yapışma özellikleri sağlayan orta viskoziteli bir epoksi reçinesi LAPOX L-12 kullanmışlardır. Hibrit kompozit malzeme takviyesi olarak 12 ile 16 µm fiber çapına sahip düz dokuma E-cam kumaş ve 10 µm ile 12 µm fiber çapına sahip ipek bazlı tekstil kumaşdan oluşturulmuştur. Laminatlar, [0/90]_s oryantasyonunda elle yatırma tekniği kullanılarak imal edilmiştir. Epoksi yüzde hacmi % 40 ve cam kumaş ise %15'ten %45'e kadar değişecek şekilde tek kenar çentikli olacak şekilde EGT I, EGT II ve EGT III olmak üzere üç farklı malzeme bileşimi yapılmıştır. Üretilen numuneler kenar çentikli çekme testi için ASTM E1922, kısa kiriş eğilme testi için ASTM D2344 ve darbe testleri için ASTM D256'ya göre hazırlanmıştır. Deneyler, bilgisayarlı bir evrensel test makinesinde (UTM) 1,3 ve 1,5 mm/dk hızlarında gerçekleştirilmiştir. Numuneler %2.95 tuzlulukta ve 28°C sıcaklıkta doğal deniz suyu içeren bir tankta 8, 16 ve 24 gün olmak üzere bekletilmişlerdir. Tanktaki deniz suyu ise 3 günde bir yenilenmiştir. Numunelerin kırılma yüzeylerindeki bölgeler taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla taranmıştır. Deneylerde, çekme deneyinde numunede görülen çatlak uzunluğunun sadece çekmeden kaynaklanmadığı hem çekme hemde eğilme yüklerinin birarada bulunmasından oluştuğu belirtilmiştir. Kritik gerilim yoğunluk faktörü (SIF) hem normal hem de deniz suyu ortamlarında EGT I tipi numuneler için maksimum bulunmuştur. EGT I tipi numunelerin deniz suyu ortamında kalma süresi arttıkça tabakalar arası kayma mukavemetinin (ILSS) azaldığı tespit edilmiştir. EGT I ve EGT II numunelerinde, hem matris hemde takviye malzemelerinde kırılma EGT III numunelerindeyse lif çekme gözlenmiştir.

Deniz suyuna daldırıldıktan sonra yapılan taramalarda kırılma yüzeylerinde çatlak büyümesinin tek bir düzlemde ilerlediği görülmüştür. Bu durum su emme nedeniyle polimerik matrisin bozulduğu ve kritik gerilim yoğunluk faktörü (SIF) üzerinde daha derin bir etkisi olduğunu ortaya çıkarmıştır. Üç nokta eğilme testinde EGT II ve EGT III numunelerinde matris ile kumaş arasında yüksek basma gerilmeleri oluşmuştur. EGT I ve EGT III numuneleri ile karşılaştırıldığında, EGT II numuneleri daha az delaminasyon ve lif kırılması göstermiş, bu nedenle eğilme yükleri altında yüksek mukavemete sahip olduğu bulunmuştur. Darbe yükleri altında numunelerde lifler düz kırılmıştır. Tek kenar çentiğın darbe yüklerini önemli ölçüde taşıdığı ve EGT I numunelerinde %45 cam elyaf bulunması diğer iki numuneye kıyasla deniz ortamındaki dayanıklılığının daha iyi olduğunu göstermiştir.

Li ve ark. [11] Çalışmada FRP'nin görünür katmanlar arası tokluğuna ve FRP yapıların delaminasyon tepkisine ekstrinsik dağılımın katkısını nicelemek için birleşik bir araç geliştirmişlerdir. Yerel olmayan ekstrinsik dağılımı etkileyen faktörlerini kırılma yönü, delaminasyon ön genişliği ve FPZ (kırılma süreci bölgesinin) derinliği olmak üzere üçe ayırmışlardır. Yayılan delaminasyon önünün konfigürasyonu, arayüz noktalarının arıza durumunun belirli bir değere ayarlandığı seviye-set yöntemi kullanılarak bir B-spline eğrisi oluşturularak belirlenir. Delaminasyon önünün belirlenmesiyle, POI (ilgi noktası) ile delaminasyonun global kinematiği arasındaki geometrik ilişkiyi değerlendirerek yerel olmayan etki eden faktörleri incelemişlerdir. Hasara yatkın malzeme noktaları için, malzeme noktasını ve delaminasyon önünü kesen ortogonal yolu belirleyerek çatlak yönünü belirlemişlerdir. Ayrıca, çatlak önünün teğet/ortogonal değişimi belirli bir aralıkta düşen çizgi parçasının uzunluğunu hesaplayarak delaminasyon ön genişliğini ölçmek için karakteristik bir durum sunmuşlardır. Karakteristik delaminasyon genişliğinin dışsal enerji dağılımı üzerindeki etkisini ölçmek için üstel formu bir ölçekleme fonksiyonu formüle etmişlerdir. Benzer bir form, FPZ derinliğinin etkisini karakterize etmek için de uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

Afshar ve ark. [12] karbon fiber vinilester kompozitinin deniz ortamındaki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde 0.56 fiber hacim ,1.4 mm kalınlık ve 8 kattan oluşan tek yönlü karbon vinilester laminatlar kullanmışlardır. Laminatın ana yönleri lifler boyunca ve liflere dik iki takım olacak şekilde ıslak elmas testere 12,5 mm x 77 mm numuneler

halinde kesilerek üretilmiştir. UV (Ultraviyole Radyasyon) ve nemdeki değişiklikleri gözlemek için numuneleri laboratuvarıda önceden şartlandırmışlardır. 1000 saat UV radyasyonu ve neme etkilerini üç aşamada araştırmışlardır. İlk olarak yalnızca UV'ye maruz kalma bunu 0,6 W/m, 340 nm dalga boyundaki UVA ışığı ile yapmışlardır. İkincisi için, hazne sıcaklığı 60 °C'de bulunan numuneler art arda UV ve neme maruz kalarak üzerlerine yoğunlaşma buharı 50 °C'de olacak şekilde bırakılmıştır. Üçüncü aşamada ise ASTM G53 standartların göre hazırlanarak yine UV radyasyonu ve yoğunlaşma koşulları aynı olacak şekilde 3 saatte bir döngüsel UV ve bırakılmışlardır. Numuneleri laboratuvarıda önceden şartlandırmış ve şartlandırılmamış olarak ASTM D790 standardına göre üç nokta eğilme testi ile numunelerin eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda deniz ortamında karbon fiber vinilester laminatlarda eğilme mukavemetinin lifler boyunca ve %10'a liflere dik yönde ise %40'lık bir düşme gerçekleştiğini bulmuşlardır.

Meng ve ark. [13] Deniz ortamında kullanılan CFRP kompozitlerin nem difüzyonunun etkilerini deneysel ve sayısal yaklaşımlarla araştırmışlardır. Karbon fiber/epoksi prepreg Cytac 977-2-12kHTS kullanılmıştır. $[0]_{16}, [90]_{16}, [+45/-45]_{4s}$ üç oryantasyonda seçilmiş ve epoksi reçine 212 °C cam geçiş sıcaklığına sahip, yüksek 180 °C sıcaklıkta kürlenerek otoklav yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen numunelerdeki özelliklerin değişimini karşılaştırmak için tatlı su (musluk suyu) ve deniz suyu tuzluluğu %3,4-3,5 olan Manş Denizi'nden kullanılmış deniz suyu her ay yenilenmiştir. Numuneler suya daldırılmadan önce 70 °C'de 48 saat sürede kurutulmuş ve hızlandırılmış nem difüzyonu için 50 °C'de tatlı su ve deniz suyuna daldırılmıştır. ASTM-D5229M standardına göre hazırlanarak her beş numunenin nem içeriği, 0.01 mg ağırlık ölçer ile ölçülürken, boyutlar, 0.01 mm'lik bir kumpas ile ölçülmüştür. Numuneler suya daldırmanın ilk haftasında çok hızlı bir şekilde ağırlıklarında artış gözlemlenirken üç ay sonra bu durum yavaşlayarak numunelerin doygunluk gösterdiğini gözlemlemişlerdir. ISO14125 standartlarına göre numunelerde eğilme testlerinde sonuçlar kuru numunelerde eğilme mukavemeti 117 ± 5 MPa doymuş numunelerde ise 102 ± 4 MPa olduğunu bulmuşlardır. Numunelerdeki nem difüzyonunu incelemek için iki boyutlu model oluşturulmuş fakat burada higrotermal etki dikkate alınmamıştır. Üç boyutlu modelde ise nem difüzyonu ve kayma gerilmelerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar hem mikro hem de makro modelde difüzyon hızının yavaş olduğu ve farklı oryantasyonlarda da farklı bir nem

yoğunluğuna sahip olduğunu fakat sonunda düzgün bir dağılım sergilediğini göstermiştir. Bu durum eğilme testlerindeki elde edilen sonuçlar ve hem mikro hem de makro modelden çıkarılan sonuçlarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca neme doymuş CFRP kompozit numunelerde kayma mukavemetinde katlar arasında %15'lik düşme olduğu görülmüştür. Fiber/matris arayüzünde oluşan hasarlar da SEM analizinde gözlemlenmiştir.

Meng ve ark. [14] CFRP kompozit yapıların tatlı su (musluk suyu) ve deniz suyuna daldırma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın amacı, higrotermal gerilmenin CFRP üzerindeki kusur (bozukluk) mekanizmalarının değerlendirilmesinin önemini vurgulamışlardır. Karbon fiber/epoksi prepreg Cytec 977-2-12kHTS kullanılmıştır. Otoklav yöntemi ile kompozit malzeme üretilmiştir.

Kürleme işlemi 3 °C/dk'lık bir ısıtma ve ardından 180 °C'de 2 saat bekletme süresiyle gerçekleştirilmiştir. Kompozit laminatlar 16 katmanlı $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[90/0]_{4s}$ ve $[\pm 45]_{4s}$ oryantasyonunda 2 mm kalınlığında üretilmişlerdir. Üretilen numuneler su emilimini hızlandırmak için 50 °C sabit sıcaklıkta bir fırına yerleştirildi. 70 bar hidrostatik basınçta tatlı su (musluk suyu), deniz suyu ve deniz suyu içeren üç hazne kullanılmıştır. Deniz tuzluluğu %3,4-3,5 tuzluluk aralığındadır. Kompozit laminatların nem içeriği ve higrotermal genleşmeyi ölçme ASTM D5229'a göre yapılmıştır. Nem içeriği, 0.01 mg hassasiyetine sahip ağırlık ölçeği ile ölçülürken, boyut 0.01 mm nominal kumpas ile ölçülmüştür. Hazırlanan numuneler 1 ve 3 aylık daldırma sonrası ISO 14130 'a göre üç nokta eğilme ve katmanlar arası kayma testleri yapılmıştır. Katmanlar arası kayma mukavemetinin kademeli olarak bozulduğunu belirtmişlerdir. Hidrotermal yaşlanma ortamına bağlı olarak, CFRP'nin içine yayılan suyun, fiber/matris arayüzünün ayrılmasına ve suyu emerek çatlakların genişlemesine yol açmıştır. Bu durum CFRP'nin mekanik özelliklerinde (elastik modülü, kayma modülü ve poisson oranı) azalma gözlemlenmiştir.

Mansouri ve ark. [15] laminatlar (kısa elyaf/dokuma) için bir yıl boyunca tuzlu ve tatlı suda higrotermal yaşlanma ve bunun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelenmiştir. Bunun için mat ve kumaş formunda mat 300g/m², mat 450g/m², tafta 800g/m² 4 katmanlı olacak şekilde E-cam elyafından oluşan bir laminat ve doymamış polyester ısıyla sertleşen reçine kullanmışlardır. 450×450mm² boyutlarında jel kaplamasız ve jel kaplamalı iki çeşit lamine levhalar fiziko-kimyasal testlere ve üç noktalı

eğilme testleri için üretmişlerdir. Numuneler, AFNOR NF T57-105 standardına göre uzunluğu $l=20h+20$ (± 1) mm, genişliği $b=10<b\leq 15$ mm ve kalınlığı $h\leq 5$ mm olarak hazırlanmıştır. 40 °C sıcaklıkta hem deniz suyu ve hem de damıtılmış suya daldırılan numunelerin farklı ortamlarda yaşlanma etkisi altında NF T57-105 standardına göre IBERTEST modeline sahip, yükleme kapasitesi 100 kN, 10 mm/dk ve 500 mm/dk hızlarında üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Karşılaştırılan numunelerde damıtılmış suda ilk ay elastik modülü %37 ve kopma gerilmesi %22 olarak bulmuşlardır. İkinci aydan sonra deniz suyunda elastik modülü %24 ve kopma gerilmesi %22 damıtılmış suda ise elastik modülü %14 ve maksimum gerilme %25'e kadar düşmüştür. Mekanik özelliklerin zamanla bozulması hızlanmıştır. Bunun, zamanla artan su miktarının penetrasyonundan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Farklı ortamlardaki yaşlandırma sonuçlarında damıtılmış suyun emilim hızının, deniz suyunun emilme hızıyla aynı olduğunu gözlemlemişlerdir. Emilim eğrisinin ortaya çıkma hızının her iki numune için de aynı olduğunu yani ilk artıştan sonra, zamanla bir yavaşlama olduğu görülmüştür. Fakat jel kaplamasız numunelerin doygunluğa daha hızlı ulaştığını belirtmişlerdir. Bu durumu damıtılmış suyun difüzyon katsayısının (D) deniz suyunun difüzyon katsayısından daha büyük olduğu çünkü tuz içeren deniz suyunun difüzyonu yavaşlatması olarak açıklamışlardır. Farklı yaşlandırma sıcaklıkları için 48 saat sonra 40 °C ve 60 °C'de hem jel kaplamalı hem de jel kaplamasız numunelerde akma gerilmesi ve young modülü sıcaklığının artmasıyla azalırken, yaşlanma sıcaklığının artmasıyla elastiklik ve kırılma gerilmesi artmıştır. Bir aylık yaşlandırmadan sonra 60 °C'de her iki numunede de kırılma gerilimi artmıştır. 80 °C'de bir ayda ise 48 saat yaşlandırmaya göre jel kaplamasız kompozitlerde elastik gerilmede %23, kopma gerilmesinde %37 ve modülde %42 azalma gözlenmiştir. Sıcaklıktaki bu artış, kompozit numunelerin akma noktasının düşmesine neden olmuştur. Testler jel kaplamalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin jel kaplamasızlara göre biraz daha yüksek olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak çalışma karışık kısa elyaf/dokuma kompozitlerin süre, ortam ve sıcaklığın mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır.

Garcia ve ark. [16] Cam elyaf kompozitler (GFRP)'in deniz suyu ortamının etkisi araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada deniz suyunun etkileri kullanılan polyester, vinilester ve epoksi matrisli kompozitlerde farklılık gösterdiğini bildirmişlerdir. Deniz suyunda dayanıklılıkta önemli olan matrislerin özelliklerini karşılaştırmışlardır. Deniz

inşaat mühendisliği uygulamaları için en uygun matrisin epoksi olduğu, çünkü suya doygunluk seviyelerine ulaştıktan sonra mekanik özelliklerin sabitlendiğini diğer polyester matrisli kompozitlerin sabitlenmediği, vinilester matrisin ise uygun olup olmadığının hızlandırılmış yaşlandırma testlerine tabi tutulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Kim ve ark. [17] mekanik olarak birleştirilmiş karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) ve cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. GFRP numunesi Glass UD200 Prepreg CFRP numunesi Carbon UD200 Prepreg $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2S}$ yarı-izotropik oryantasyonunda otoklav yöntemiyle üretilmişlerdir. Numunelerin toplam uzunluğu 120 mm, çıkıntı uzunluğu 50 mm ve genişliği ise 20 mm'dir. GFRP numunesinin kalınlığı 2,6 mm ve CFRP numunesinin kalınlığı ise 3,0 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Numunelerde genişliği 20 mm ve delik çapları 6, 8 ve 10 mm olacak şekilde delik boyutu hasarı için değişiklik yapmışlardır. 10 mm delik etrafında ise yapay delik hasarı oluşturmuşlardır. İç hasar için FMS 10 Eksenli Çift Fıskırtıcı Ultrasonik Sistem kullanarak C-tarama görüntülerini incelemişlerdir. Burada CFRP numunesindeki iç hasarın GFRP numunesindekinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Afshar ve ark. [18] deniz ortamına maruz kalan karbon fiber-vinil ester (CFVE) kompozitlerinin, mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Tek yönlü boyuna modülü 220 GPa izotropik vinil ester matrisine ve karbon fiberler 22 GPa enine ise 3.2 GPa olacak şekilde laminatlar kullanılmıştır. Kompozit malzeme 8 katlı kalınlığı 1,4 mm ve $[0^\circ]$, $[90^\circ]$ oryantasyonunda genişliği 12,5 mm uzunluğu 77 mm ıslak testere kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemeler üç gruba ayrılmıştır. İlk gruptaki numuneler $[0^\circ]$, $[90^\circ]$ oryantasyonunda beş numune olacak şekilde üç bölümde incelenmiştir. İlk grubun birinci bölümü 2000 saat BTRS (Tenney Benchmaster)'a göre sıcaklık ve nem, ikinci bölüm hızlandırılmış ayrışma odasında UV radyasyonuna, üçüncü bölümse tuz püskürtme odasına maruz bırakılmıştır. İkinci grup numuneler $[0^\circ]$ oryantasyonunda oda sıcaklığında bir yıl süreyle damıtılmış su, tuzlu su ve deniz suyuna bırakılmıştır. Üçüncü grup numuneler ise $[0^\circ]$ oryantasyonunda bir yıl boyunca gelgit havuzuna bırakılmıştır. Nem ve UV radyasyonuna maruz kalan kompozit numuneler ASTM D790 standardına göre üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve kompozit numunelerin kütlesi, 48 saatte

bir hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Kompozit numunelerin farklı maruz kalma durumunun boyuna eğilme modülü üzerinde önemli etkisi olmadığı, ancak enine modülde önemli azalmalar olduğunu bildirmişlerdir. Eğilme mukavemeti ise hem enine hem de boyuna yönde azalmıştır. Nem emiliminden dolayı fiber-matris ara yüz kırılma tokluğundaki UV kaynaklı mikro çatlaklardan dolayı kompozit numuneler yüzeyinde bütünlük kaybına sebep olmuştur. Bu durumu matris ile lifler arasındaki yük transfer mekanizmasının bozulması olarak açıklamışlardır.

Mourad ve ark. [19] deniz suyunun ve sıcak ortamın FRP kompozitler üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Çalışmalarında tek yönlü cam/epoksi (%52 fiber) ve cam/poliüretan (%58 fiber) olmak üzere her koşul için üç numune olacak şekilde hazırlanmıştır. Cam/epoksi kompozit numuneler 6 mm kalınlığında sürekli laminasyon yöntemi Cam/poliüretan kompozit numuneler 3 mm kalınlığında ise pultrüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen numuneler ASTM D3039 standardına göre kompozit çekme numuneleri hazırlanmıştır. Çekme testinden önce 23°C ve 65°C sıcaklığında değişen şartlandırılmış deniz suyuna 3, 6 ve 12 ay boyunca bırakılmıştır. Cam geçiş sıcaklığını ve kürlenme oluşumunu değerlendirmek için diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) testleri yapılmıştır. Numunelerin su emme oranı ve miktarı 30 gün aralıklarla tartılmıştır. Numunelerin koşullandırmadan önce ve sonra yüzeyde belirgin hasar olup olmadığı X-ışını analizi kullanılarak incelenmiştir. Cam/epoksi kompozitte 23°C' de deniz suyu emilimi 3 ayda %0,9 6 ayda %1,3 ve 1 yılda %2,5 65°C'de ise %2,8, %2,9 ve %5 olmuştur. Cam/poliüretan kompozitte 23°C' de deniz suyu emilimi 3 ayda %1,5, 6 ayda %1,8 ve 1 yılda %3,2 ve 65°C'de sürelerinde sırasıyla 3 ayda %3,1, 6 ayda %3,2 ve 12 ayda %4,7 olmuştur. Kompozit numunelerde difüzyonun 65°C'de, daha yüksek olduğu görülmüştür. Kompozit numunelerde 23°C' de deniz suyuna 3 ay batırıldıktan sonra çekme mukavemetinde yaklaşık %10 azalma, 6 ay sonra ise mukavemette bir artış ve ardından 12 ay sonra bir düşüş sergilediği görülmüştür. Bu durumun kompozit numunelerde homojen olmayan su dağılımından kaynaklandığını ve bununda lokal gerilmeler oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Bu gerilmelerin dağılımı matriste ve ara yüzeyde plastikleşme ve şişme meydana getirmiştir. Cam/epoksi kompozitlerde 23°C ve 65°C'de deniz suyuna 1 yıl maruz kaldıktan sonra çekme mukavemeti ve modül özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Yüksek sıcaklıkta matris ve arayüz bozulmasından kaynaklanan mukavemet azalmasını telafi etmek için yapılan kürlenme işlemi yüksek

Tg'si nedeniyle gerçekleşmemiştir. Cam/poliüretan kompozitlerde, 23°C ve 65°C'de deniz suyuna 1 yıl maruz kaldıktan sonra ve 65°C'de 3 ay maruz kaldıktan sonra fiber matris ara yüzünde bozulma görülmüştür. Ara yüzdeki bu bozulma, cam/poliüretan kompozitte daha düşük mukavemete sebep olmuştur. Yüksek sıcaklıkta ise matrisin kırılma geriliminde %25 azalmaya sebep olmuştur. Cam/poliüretan malzemede ise Tg'si 62°C'nin altında olması nedeniyle kürlenme meydana gelmiştir. Oda sıcaklığında ve 65°C'de deniz suyuna 1 yıl maruz kaldıktan sonra her iki kompozitte de cam elyaf hasarı gözlenmemiştir. Lifler yüksek sıcaklığa maruz kaldığında ise bozulmalar görülmüştür. Hem cam/epoksi hem de cam/poliüretan kompozitlerde modül sabit kalmıştır.

Banakar ve ark. [20] GFRP kompozitlerin lif oryantasyonun ve numunenin kalınlığının çekme gerilmesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kompozit numuneler örgülü cam fiber, epoksi reçine olarak YD128 ve sertleştirici olarak HY140 kullanılmıştır. Kürlenme işlemi oda sıcaklığında 48 saatte gerçekleşmiştir. Kompozit numuneler elle yatırma yöntemi ile üç farklı oryantasyon $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $+90^\circ$ olarak katman sayısı 6 ve 9 olacak şekilde üretilmiştir. Çekme testi ASTM 3039'a göre numuneler kesilmiştir. Numunelerdeki katman sayıları karşılaştırıldığında katman sayısının artmasıyla çekme dayanımı ve elastisite modülü azalmıştır. Oryantasyon etkisinde 30° 'de çekme dayanımı ve uzamanın en yüksek, 45° 'de en yüksek akma noktasına ve 90° ise en yüksek elastisite modülüne sahip olduğunu bulmuşlardır.

Yüncüoğlu ve ark. [21] tasarımcılar için cam ve karbon fiberleri farklı hıza, kalınlığa ve oryantasyon açısına sahip en iyi kompozit malzeme seçimini araştırmışlardır. Kompozit malzemeler 650 mm uzunluğunda ve 650 mm genişliğinde cam fiber takviyeli epoksi (CFTE) ve karbon fiber takviyeli epoksi (KFTE) kompozit plakalar $[0/90]_w$, $[15/-75]_w$, $[30/-60]_w$ ve $[45/-45]_w$ oryantasyonların da belirlenerek giyotinle kesilmiştir. Kompozit malzemeler 2 (fiber tipi, çekme hızı, katman) ve 4 (oryantasyon) olmak üzere 4 faktörlü şekilde belirlenmiştir. ASTM D2344-84 standardına göre 2 mm/dk ve 10 mm/dk çekme hızında Cam fiber takviyeli epoksi (CFTE) ve karbon fiber takviyeli epoksi (KFTE) kompozit plakalar için 4 katlı ve 8 katlı olacak şekilde numuneler 250 mm uzunluğunda ve 25 mm genişliğinde hazırlanmıştır. Reçine olarak Araldite LY 1564 epoksi reçine ve sertleştirici olarak Aradur 3487 kullanılmış, üretim yöntemi olarak 1 atm basınç altında vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Kürlenme işlemi için önce 1 saat 100 °C'de

bekletilmiş daha sonra 7 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında çekme deneyinde 0 derece ve 90 derece oryantasyonun da katman sayısının artmasıyla karbon fiber/epoksilerde çekme gerilmesi artarken cam fiber/epoksilerde azalmıştır. Ayrıca yine bu oryantasyon da karbon fiber/epoksiler daha yüksek dayanım göstermiştir. Kopma şekil değiştirmesi deneyinde 0 derece ve 90 derece oryantasyonun da karbon fiber/epoksiler daha az uzamışlardır. 45 derece ve -45 derece oryantasyonun da her iki fiber tipinde de belirsizlik yaşandığı için bu oryantasyonun diğer parametrelerle değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Tokluk açısından deney sonuçlarında ise karbon fiberlerin 0 derece ve 90 derece oryantasyonun da daha yüksek tokluğa sahip olduğu çıkmıştır. 45 derece ve -45 derece oryantasyonun da kopma şekil değiştirmesi en yüksektir. Ayrıca katman sayısı arttıkça hem cam hem de karbon fiberdeki dayanımı artmıştır.

Almeida ve ark. [22] Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin kayma özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. Kompozit malzemeler tek yönlü cam fiber Araldite LY1316 epoksi reçine ve Aradur 2969 sertleştirici kullanılarak 5 katmanlı 300 mm en, 300 mm boy ve 2,5 mm yükseklik olacak şekilde 0 derece 90 derece, 0 derece ve 90 derece ([0/90/0/90/0]), rastgele oryantasyon olarak dört farklı şekilde oda sıcaklığında 2,0 bar basınç altında vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Kurlenme 80 °C'de 10 saat gerçekleşmiş ve numuneler çift çentikli kesme kayma testi (DNS) için ASTM D3846-08, kısa kırıli kesme testi (SBS) için ASTM D2344-13 ve V çentikli kesme testi için ASTM D7078-12 standardına göre kesilmiştir. Sonuç olarak katmanlar arası kayma direncinin kısa kırıli ve çift çentikli 0 derece oryantasyonuna sahip kompozit numunelerde en yüksek ve 90 derece oryantasyonda ise en düşük olduğu görülmüştür. Rastgele oryantasyona sahip numunelerde ise daha yüksek düzlem içi kayma direnci gösterdiğini belirtmişlerdir.

Nandagopal ve ark. [23] CFRP kompozit malzemesinin kuru ve higrotermal yaşlandırma koşullarında yorulma eğilme davranış etkisini incelemişlerdir. Bunun için tek yönlü karbon fiber ve reçine olarak Prime 20LV epoksi reçine kullanmışlardır. 25 mbar basınç altında vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemiyle üretim yapılmıştır. Kurlenme 50 °C'de 16 saatte gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakalar 80 cm uzunluğu, 25 cm genişliği ve 28 cm uzunluğu, 28 cm genişliği olan 3 mm ve 6 mm katmanlı sınırsız [0]₆ ve sınırlı [$\pm$ 45/03]_s oryantasyonlarında üretilmişlerdir. Üretilen kompozit numuneler

kuru ve yaşlanmış koşullarda eğilme testleri için ASTM D7264 standardına göre hazırlanmıştır. Kuru numuneler, 40 °C'de fırında kurutulmuştur. Sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış eğilme numuneleri, 60 °C'deki doğal deniz suyuna daldırılarak higrotermal yaşlandırmaya tabi tutulurken yorulma numuneleri ise sadece 30 gün boyunca 60 °C'de higrotermal yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Sonuçlar hem sınırlandırılmış hem de sınırlandırılmamış plakalarda higrotermal yaşlanma nedeniyle eğilme mukavemeti, modülü ve kırılma gerilimi yaşlanma süresine bağlı olarak azalmıştır. 0 dereceli oryantasyonda sınırlandırılmış plakaların yük taşıma kapasitesi azaltmıştır. Kısıtlanmamış plakaların yorulma davranışı, higrotermal yaşlanma nedeniyle azalmıştır.

Biswas ve ark. [24] Cam ve karbon takviyeli kompozitlerin çekme, eğilme ve yorulma özelliklerini fiber oryantasyonlarının nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Numerik olarak ANSYS workbench yazılımı yardımıyla termoset epoksi esaslı cam ve karbon fiber takviyeli polimer kompozitleri 4 farklı oryantasyon 8 katmanlı 4 mm kalınlığında 0/90 derece, ± 15 derece, ± 30 derece ve ± 45 derece olan kompozit modeller tasarlanmıştır. Modeller oluşturulurken çekme testleri için ASTM D3039 standardına göre, eğilme testleri için ASTM D790-86 standardına göre, yorulma testleri için ASTM D3479/3479 M-19 standardına göre hazırlanmışlardır. Numuneler 250 mm uzunluğunda, 30 mm genişliğinde ve orta kısmı 25 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. GFRP ve CFRP modellerde en yüksek çekme, eğilme ve yorulma mukavemeti 0 derece ve 90 derece oryantasyona sahip modellerde en yüksek çıkmış fakat kat açısı arttıkça azalmıştır. Çekme mukavemeti ± 45 derece oryantasyonda azalmıştır.

Beura ve ark. [25] GFRP kompozitler üzerinde deniz suyunun etkilerini araştırmışlardır. Bunun için örgülü E-cam fiber, reçine olarak LAPOX L12 epoksi ve sertleştirici olarak Lapox K-6 kullanmışlardır. Üretimi elle yatırma yöntemi ile yapılmıştır. Kürleme işlemi oda sıcaklığında 48 saatte gerçekleştirilmiştir. Numuneler 18 katmanlı olacak şekilde ASTM D2344-84 standardına göre hazırlanmıştır. Deniz suyuna daldırılmadan önce numunelerin içerisinde bulunun nemin dışarıya çıkması için 60 °C'de 2 saat ısıtılmış ve bu numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulmuş sonra tartılmıştır. Numuneler %4 tuz içeren 30°C deniz suyuna 90 gün süreyle daldırılmıştır. GFRP kompozit numunelerin nem alma eğilimi deniz suyunun tuzluluğunun ve daldırma süresinin yaşlanma zamanına

bağlı olduğu görülmüştür. Katmanlar arası kayma mukavemeti (ILSS) testleri, 1 mm/dak, 5 mm/dak ve 9 mm/dak şeklinde yapılmıştır. Nem girişi matriste şişme, mikro çatlaklar, mikro boşluklar, delaminasyon ve lif matrisinin ayrılmasıyla kompozit numunelerde kararsızlık oluşturarak kayma mukavemetini (ILSS) azaltmıştır. Tuzluluğun artmasıyla difüzyon katsayısı azalmıştır.

Vizentin ve ark. [26] FRP kompozitlerinin gerçek deniz ortam etkisinin mekanik özelliklerini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. 8 katmanlı tek yönlü, izotropik ve ortotropik fiberler kullanılarak 0, 90 ve 45 derece oryantasyonlarında kompozit malzeme üretmişlerdir. Numuneler %3,78-3,83 arasında tuz içeren 10 ile 14 °C sıcaklıklar arasında değişen kuru, 6, 12 ve 24 ay süreyle üç gruba ayrılarak bekletilmiştir. Kompozit numuneler ISO 527 standardına göre E-cam fiber 300 mm genişliğinde ve 450 mm uzunluğunda epoksi olarak Sicomin SR 8200 polyester reçine olarak Reichhold POLYLITE 507-574 ve sertleştirici olarak SD 720 kullanmışlardır. Numuneler çekme testi için ISO 527 standardına göre hazırlanmıştır. Sayısal inceleme ANSYS programında yapılmış ve deneysel yapılan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak epoksi/cam 6 ay denize daldırılmış numuneler 0 derece, 90 derece ve 45 derece oryantasyona sahip üç grupta %32, %14 ve %36'lık 12 aylık denize daldırılmış numunelerde %44, %40 ve %49 çekme mukavemeti azalmıştır. Polyester/cam 6 ay denize daldırılmış numuneler 0 derece, 90 derece ve 45 derece oryantasyona sahip üç grupta %11, %5 ve %1, 12 aylık denize daldırılmış numunelerde %50, %37 ve %13, 24 aylık denizde ise %55, %48 ve %24 çekme mukavemeti azalmıştır. Ayrıca deneysel ve sayısal karşılaştırma, sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğunu bildirmişlerdir.

Behera ve ark. [27] Yaşlanmanın CFRP kompozitlerin yorulma performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kompozit malzemeler çok yönlü karbon fiber ve Hexcel IMA/M21 epoksiden oluşan 16 katlı $[\pm 45]_s$ (MD45) ve $[+45, -45, 0, 90]_{2s}$ (MDQI) oryantasyonlarında vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen numuneler 300 mm eninde, 450 mm boyunda ve 3.10 mm yüksekliğe sahip şekilde oluşturulmuştur. Kurlenme işlemi 180 °C'de 7 MPa basınç altında 2 saatte gerçekleştirmişlerdir. Numuneler iki farklı uzunluk-genişlik oranları sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerdeki ilk ağırlık ölçümü 70°C'de 2 gün kurutulduktan sonra ölçülmüştür. Numuneler 70 °C'de bir yıl süreyle musluk suyuna daldırılmış ve

yaşlandırılmamış numunelerle karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklık nem emilim testi, ASTM standardı D5229'a göre gerçekleştirilmiştir. Numuneler ASTM D3039 çekme testine ve ASTM D3410 basma testine tabi tutulmuştur. $[\pm 45]_s$ oryantasyonuna sahip yaşlandırılmış numunelerle yaşlandırılmamış numuneler karşılaştırıldığında gerilme mukavemeti %10 basma mukavemeti ise %19 azalmıştır. Ayrıca $[+45, -45, 0, 90]_{2s}$ oryantasyonuna sahip numunelerde yaşlandırılmış numunelerle karşılaştırıldığında benzer özellik gösterdiği görülmüştür. Nem difüzyon eğrisi ise her iki oryantasyonda da Fick şeklini takip eden bir grafik oluşturduğu görülmüştür. Her iki oryantasyona sahip yaşlandırılmış numunelerdeki cam geçiş sıcaklığı % 6 azalmış yani matris plastikleştirme etkisi ortaya çıktığını bulmuşlardır.

Khan ve ark. [28] Farklı elyaf/reçine oranlarına sahip karbon ve cam kompozit malzemelerinin mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında Karbon/Epoksi ve Cam/Epoksi olmak üzere iki çeşit kompozit malzeme üretmişlerdir. Kompozitler fiber-reçine oranı 40:60, 50:50 ve 60:40'lık olarak 1,5 mm kalınlığında olarak üç farklı şekilde hazırlamışlardır. Reçine olarak AralditeLY-5052 kullanmışlardır. Öncelikle elle yatırma yöntemi ve daha sonra 27 mm Hg 'da 24 saat boyunca vakum yapılarak üretilmiştir. Kurlenme işlemini 80 °C'de 2 saatte gerçekleştirmişlerdir. Numuneler çekme testi için ASTM standardı D-3039'a göre hazırlanmıştır. Kompozit numunelerin ısıl özelliklerini belirlemek için Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) testi kullanılmıştır. Bunun için DSC 6000 kalorimetre kullanılarak inert atmosfer altında sıcaklık dakikada 10°C artırılarak 250 °C'ye kadar çıkarılarak ölçülmüştür. Elyaf içeriğindeki artışla karbon/epoksi numunelerde çekme mukavemeti, uzaman miktarı ve modül yüzdesi arttı. Bu cam/epoksi numunelerde de aynı şekildedir. Karbon/epoksi numunelerde gerilme mukavemeti ve modülü, cam/epoksi numunelerden dört kat daha yüksek olduğu görülmüştür.

Ghabezi ve ark. [29] Karbon epoksi ve cam epoksi kompozit malzemelerinin deniz suyu etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında iki farklı kompozit malzeme üretmişlerdir. Öncelikle her iki kompozit malzemedede 6 katlı, ± 45 derece oryantasyon olacak şekilde çift yönlü E-cam 200 TEX cam fiber ve EP-L2-F-05 epoksiden ikincisi Twill karbon fiber ve CFS-RI-2-1900 epoksiden üretilmiştir. Kurlenme 23 °C'de 24 saat ve ardından 60

°C'de 6 saat olacak şekilde yapılmıştır. Karbon fiber numuneler 2000 mm uzunluğunda 950 mm genişliğinde ve 2 mm kalınlığında kesilmiştir. %3,5 tuzluluk oranına sahip yapay deniz suyuna daldırılmıştır. 5 adet 100 mm uzunluğunda ve 100 mm genişliğinde hem karbon hem de cam fiber kompozit numunelerde 23 °C ve 60 °C'de 9 ay boyunca yapay deniz suyunda bekletilerek su emilim ölçümü ASTM D 5229 standardına göre yapılmış ve ağırlıkları her hafta ölçülmüştür. Bu ölçüm sonrası elde edilen grafiklerde 23 °C ve 60 °C'de ilk olarak doğrusal daha sonra doygunluk düzeyine ulaşana kadar ise doğrusal olmayan bir şekilde ilerlediği görülmüştür. Doygunluk, 23 °C'de ve 60°C'de cam epoksi kompozit numuneler için %1,13 ve karbon epoksi kompozit numuneler içinse %0,61 olmuştur. Numuneler 23 °C'de ve 60°C'de çekme testi için ASTM D3039'a göre kayma testi ise ASTM D2344'te göre hazırlanmıştır. Cam epoksi kompozit numuneler yapay deniz suyunda 23 °C'de 45,90,180 bekletildikten sonra çekme mukavemetinin %1,81 azaldığı bulunmuştur. Fakat 60°C'de ise çekme mukavemeti daha belirgin bir şekilde azalmıştır. Yaşlanma sürecine göre cam epoksi kompozit numunelerde young modülündeki değişim 45 gün sonra 6,61 GPa, 90 gün sonra 6,3 GPa ve 180 gün sonra 6,44 GPa ölçülmüştür.

Karbon epoksi kompozit numuneler yapay deniz suyunda çekme mukavemeti 60 °C'de 45 gün için 475 MPa, 90 gün için 459 MPa,180 gün içinse 428 MPa ölçülmüş azaldığı bulunmuştur. Çekme elastik modülünde ise sıcaklık ve sürenin artmasıyla arttığı bulunmuştur. Cam epoksi kompozit numunelerde 60°C'de 90 gün bekletildikten sonra eğilme mukavemetinde %10.7 azalma karbon epoksi kompozit numunelerde %32,2 bulunmuştur. ILSS (tabakalar arası kayma mukavemeti) cam epoksi kompozit numunelerde 90 gün 23 °C'de %5,4 ve karbon epoksi kompozit numuneler için %1 bulunmuştur. 90 gün 60 °C'de ise cam epoksi kompozit numunelerde %30,3 ve karbon epoksi kompozit numuneler için %8,3 bulunmuştur. Sonuçlar çekme ve kayma mukavemeti cam epoksi kompozit numunelerde azalmıştır. Eğilme testlerinde ise karbon epoksi kompozit numunelerde eğilme mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Çekme, kayma ve eğilme mukavemetindeki azalmaların kompozit malzemeler doyma seviyesine ulaştığında dahi devam ettiğini gösterir.

Jesthi ve Nayak [30] deniz suyu ortamında farklı oryantasyonlardaki hibrit, cam ve karbon fiber kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Üretimde çift

yönlü örgü karbon elyafı ve düz örgü cam elyafı, reçine olarak Bisfenol A tipi ve sertleştirici olarak Trietilen tetraamin kullanılmışlardır. Elle yatırma yöntemi ile üretim yapılmıştır. Kompozit malzemeler altısı cam, dördü karbon fiber olmak üzere on katmanlı üç çeşit hibrit kompozitler hazırlamışlardır. Hibrit kompozit malzemelerde $[C_2G_3]$ s ve $[CG_2CG]$ s'de cam elyaf ve $[CG_3C]$ s'de ise karbon elyaf fazla kullanılmıştır. Kürleme oda sıcaklığında 24 saat ardından da $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saatte gerçekleşmiştir. Hibrit, GFRP ve CFRP kompozit malzemelerindeki boşluk içeriği yapısı ASTM D2734-09 standardına göre belirlemişlerdir. Kompozit malzemelerin deniz suyu yaşlandırması ASTM D570-98 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemeler pH değeri 7.86 olan deniz suyunda oda sıcaklığında 90 gün boyunca daldırılmıştır. Kompozit malzemelerde meydana gelen ağırlık değişimleri 0,01 mg hassasiyete sahip Sartorius ile ölçülmüştür. Çekme testi için kompozit numuneler 250 mm uzunluk, 25 mm genişlik ve 3 mm kalınlık olarak ASTM D3039 standardına uygun, eğilme testi için kompozit numuneler 70 mm uzunluk, 13 mm genişlik ve 3 mm kalınlık olarak ASTM D7264 standardına uygun, darbe testi için kompozit numuneler 65 mm uzunluk, 12,7 mm genişlik ve 3 mm kalınlık olarak ASTM D256 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Hibrit kompozitlerinin boşluk içeriği yapı olarak aynı olduğu fakat CFRP kompozitlerin iyi yapışma özelliğinden dolayı GFRP kompozitlere göre boşluk içeriği daha azdır. Deniz suyu emiliminin hibrit kompozitlerde düz GFRP ve CFRP kompozitlere göre daha azdır. Bu durumu çekme mukavemetinin hibrit kompozitlerde daha yüksek olmasıyla ilişkilendirmişlerdir. Hibrit kompozit numuneler düz GFRP ve CFRP kompozitlere kıyasla kuru durumda eğilme mukavemeti yüksek fakat deniz suyuna bırakılan numunelerde daha azdır. Sonuç olarak GFRP ve CFRP kompozitlerin hibrit kompozitler sayesinde daha iyi mekanik özellikler elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Singh ve ark. [31] farklı oryantasyonlara sahip GFRP kompozitlerin yorulma davranışını incelemişlerdir. Çalışmada çift yönlü düz örgülü E-cam ve 610 g/m^2 yüzey yoğunluğuna sahip fiberden, 8 katlı ve $0/90$ derece, ± 15 derece, ± 30 derece ve ± 45 derece oryantasyonunda olacak şekilde üretilmiştir. Epoksi reçine olarak Araldite LY 556 CS ve sertleştirici olarak Aradur Hy 95 kullanılmıştır. Numuneler 280 mm uzunluğunda, 280 mm^2 genişliğinde ve 3 mm kalınlığında 25 kN'lık bir yük altında 24 saat preslenerek üretilmiştir. Daha sonra ASTM D3171-15 standardına göre numune boyutları belirlenmiştir. ASTM D3039 standardına göre çekme testleri ve ASTM D3479 yorulma

testlerine göre numuneler hazırlanmıştır. Yorulma testleri için farklı oryantasyonlara sahip 15 numune test edilmiş ve hasar oluşumları ölçülmüştür. Daha sonra 3 numunenin dinamik gerinimleri ekstansometreyle izlenmiştir. Transmisyon ışık fotoğrafçılığı (TLP) ile GFRP kompozitlerdeki yorulma hasar deneyleri karşılaştırılmış ve benzer olduğu görülmüştür. 0/90 derece ve ± 15 derece oryantasyonlarında genel hasar, ± 30 , ± 45 derece oryantasyonlarında ise bölgesel hasarlar gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı gerilmelerde farklı hasar durumları ortaya çıkmıştır.

Ray ve ark. [32] higrotermal (nemli ve ısı) ortam şartlandırması sırasında karbon /epoksi ve cam /epoksi kompozitlere sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Üretim için ilk olarak tek yönlü karbon fiber ve reçine olarak XAS/914 epoksi ikinci olarak örgülü E-cam fiber reçine olarak araldite LY-556 ve sertleştirici olarak HY-951 kullanılmışlardır. Üretim için ilk olarak tek yönlü karbon fiber ve reçine olarak XAS/914 epoksi ikinci olarak örgülü E-cam fiber reçine olarak araldite LY-556 ve sertleştirici olarak HY-951 kullanılmışlardır. Kompozit malzemeler vakumlu torbalama yöntemi ile üretilmiş ve daha sonra oda sıcaklığında 24 saat kurlanmaya bırakılmıştır. Higrotermal şartlandırmada tüm karbon ve cam kompozit malzemeler için kontrollü bir iklim odası kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin 3 nokta eğilme testi için ASTM D2344 standardına göre numune boyutları hazırlanmıştır.

Hem karbon hemde cam kompozit numunelerin ağırlığı sabitleşene kadar 50 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Üretilen karbon kompozit numunelerin yarısı 60 °C sıcaklık ve %95 bağıl nem diğer yarısı ise 70 °C sıcaklık ve %95 bağıl nem ortamında 1200 saat bekletilmiştir. Üretilen cam kompozit numunelerin yarısı 50 °C sıcaklık ve %95 bağıl nem diğer yarısı ise 70 °C sıcaklık ve %95 bağıl nem ortamında 260 saat bekletilmiştir.

Karbon ve cam kompozit numuneler yüzde nem absorpsiyon ölçümü için farklı zaman aralıklarıyla tartılmıştır. Her iki durum için şartlandırılmış karbon ve cam kompozit malzemelerde sıcaklık ne kadar yüksek olursa, nem alma oranının o kadar yüksek olduğu görülmüş bu durum difüzyon hızı ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca cam ve karbon kompozit malzemelerde katmanlar arası kayma gerilmeleri azalmıştır. Sonuç olarak daha yüksek sıcaklığa maruz kalmanın, aynı düzeyde emilen nem için daha fazla bozulmaya yol açtığını bulmuşlardır.

Khalili ve ark. [33] GFRP kompozit malzemelerde tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantılarda kullanılan yapıştırıcının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kompozit malzemelerin üretimi tek yönlü örgülü E-cam fiberler, E-cam kırılmış lifler ve E-cam toz lifler olmak üzere beş tabakalı laminatlardan oluşmuştur. Sertleştirici olarak HY 5161 ve epoksi olarak LY219 kullanarak 25 mm uzunluğunda ve 25 mm genişliğinde ve 0,75 mm kalınlığında numuneler kesilmiştir. Hazırlanan numunelere çekme testi, eğilme testi, darbe testi ve yorulma testi uygulanmıştır. Düzgün yapıştırıcı, %30 tek yönlü örgülü fiberler 0 derece, 45 derece ve 90 derece oryantasyonunda %30 kırılmış fiberler ve %20, %30 ve %40'da toz fiberler olmak üzere sekiz tipte yapışkan bağlantı üretilmiş üç test yapılarak ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Numuneler ASTM D3039 standardına göre çekme numuneleri, yorulma testleri ASTM D 3166-05 standardına göre, eğilme testleri ASTM D 790 standardına göre, darbe testleri ASTM D 256 standardına göre hazırlanmıştır. Liflerin yükleme yönüne göre oryantasyonu, bağlantı mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. 0 derece, 45 derece oryantasyonunda yapıştırıcının elyafı ve toz ile takviye edilmesi bağlantı dayanımını arttırmıştır. 90 derece oryantasyonunda bu durum görülmemiştir. Toz şeklindeki fiberlerin hem mukavemet hem de sertlik üzerinde etkisi bulunurken gerinim üzerinde etkisi bulunmamıştır. Diğer tek yönlü örgülü fiberler ve kırılmış fiberlere göre toz fiberlerin çekme testlerinde bağlantı mukavemeti %72, eğilme testlerinde %112, darbe dayanımında %63 artarak en iyi fiber şekli olduğunu göstermiştir.

Reddmann ve ark. [34] tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları ve blok bindirmeli yapıştırma bağlantılarının kayma testlerini deneysel ve numerik olarak incelemişlerdir. Deneysel olarak örgülü NB-EP4030 D E-cam fiber yapıştırıcılar için DP190 (3M) ve EPX 82 (Karbon) reçine kullanılmıştır. Kurlenme işlemi 2 °C/dk ve 60 dk 135°C'de 100 kPa 'da gerçekleşmiştir. Üretilen numuneler tek türlü kesme testi için ASTM D5868'e ve blok kesme testi için, ASTM D4501'e göre kesilmiştir. Hem tek türlü hem de blok kesme testlerinde ABAQUS programı kullanılarak bir sonlu elemanlar analizi yapıldı. Sonuçlar deneysel verilerle numerik analizlerin eşdeğer olduğunu göstermiştir. Aynı yapışkan malzeme ile tek bindirmeli numunelerden blok bindirmeli numunelerin daha yüksek bir bağlantı mukavemeti gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca DP190 yapıştırıcı, en yüksek kesme mukavemetine sahiptir.

Katsiropoulos ve ark. [35] iki farklı epoksi kullanılarak birleştirilen CFRP kompozit malzemelerin yapıştırıcı kalınlığının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında 8 katlı prepreg AS4/8552 kompozit malzemeden, Epibond 1590 A/B ve LMB Huntsman iki farklı epoksi yapıştırıcı kullanarak $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ s oryantasyonunda üretmişlerdir. Numune bağlantıları termal yaşlanma için $\pm 5,5$ °C/dk ve -50 °C/80 °C'de hidrotermal yaşlandırmada ise 176 gün, 70 °C sıcaklıkta %85 neme maruz bırakılmıştır. Yapıştırılmış kompozit bağlantıların Mod-I testleri AITM-1.0053 Mod-II kırılma testleri AITM-1.0006 ve kayma davranışı, AITM-1.0019'a göre yapılmıştır. Mod-I testlerinde çatlak ilerlemesini çabuklaştırmak için 1 mm/dk'da 35 ve 40 mm uzunluğunda bir ön çatlak oluşturulmuştur. Mod-II testleri için Mod-I numunelerinden uzunluğu 110 mm kesilmiştir. 1 mm/dk hızında 3 noktalı eğilmeye tabi tutulmuştur. Sonuçlar LMB yapıştırıcısı ile yapıştırılmış bağlantılarda termal yaşlanma, kırılma tokluğunda bir azalmaya yol açarken hidrotermal yaşlandırmada bağlantıların dayanıklılığı artmıştır. Fakat uzun süre maruz kalmada bağlantı yerlerinin kırılma tokluğunda bir azalmaya neden olmuştur. LMB'nin yapıştırıcısının yorulma davranışı, Epibond 1590 ile karşılaştırıldığında daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Li ve ark. [36] Tek bindirmeli CFRP kompozit bağlantılarda farklı yapıştırıcı performanslarını deneysel ve numerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada Araldite AV138 ve Araldite 2015 iki tip yapıştırıcı kullanılmışlardır. Yapıştırılan CFRP, malzeme kalınlığı 0,15 mm, 16 katmandan oluşan çentik uzunlukları 10 mm ve çentik derinliği 1,2 mm olan karbon/epoksi tek yönlü prepregler üretilmiştir. Tek bindirmeli çentiksiz modelin uzunluğu 25 mm ile çentikli model bindirme uzunlukları 12,5 mm, 25 mm ve 37,5 mm ve çentik derinlikleri ise 6 mm ve 15 mm değerlerindedir. Çekme testleri MTS809 test cihazında gerçekleştirilmiştir. Yapıştırılan her bir parçayı birleştirmek için 0,1 mm kalınlığında bir yapıştırıcı tabakası, yapıştırıcının kalınlığını kontrol etmek için 0,1 mm çapında bakır tel ve 2,5 mm olan yükleme ucuna conta kullanılmıştır. Çekme testleri MTS809 test cihazında 25°C sıcaklığında %50 bağıl nem ve 1 mm/dk hızında piston yer değiştirme kontrolü ile test edilmiştir. Testlerin numerik analizleri ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizde, sınır değer problemini çözmek için Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca çentik derinlikleri 0,9 mm, 1,05 mm,

1,20 mm, 1,35 mm ve 1,5 mm ve uzunlukları 6 mm, 9 mm, 12 mm ve 15 mm olan üç farklı bindirme uzunluğu 12,5 mm, 25 mm ve 37,5 mm de modellenmiştir. Sonuçlara göre üç noktalı eğilme testi durumunda ise, Araldite AV138'in yapıştırıcının eğilme sertliği, Araldite 2015 yapıştırıcı kullanılan bağlantınıninkinden biraz daha yüksektir. Araldite AV138'in yapıştırma performansı etkisi, Araldite 2015'inkinden daha etkilidir. Yapıştırılmış çentiksiz ve çentikli 2B sonlu eleman modellerinin deneylerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Özdemir ve ark. [37] GFRP/Al tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarını deneysel olarak incelenmişlerdir. Üretimde cam fiber (GFRP) ve alüminyum alaşımı reçine olarak Araldite LY 1564 ve sertleştirici olarak Aradur 3487 BD kullanmışlardır. Üretimi vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile $[0^\circ/90^\circ]$ oryantasyonunda olacak şekilde gerçekleştirmişlerdir. Mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için çekme testi için ASTM D3039, basma testi için ASTM D3410, kayma testi için ASTM D7078 standardına göre her test için 5 adet numune hazırlanmıştır. Düşük hızlı darbe testleri ise oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak numune boyutları 100 mm uzunluğunda, 25 mm genişliğinde ve 2 mm kalınlığında ASTM D5868 – 01'in standardına göre kesilmiştir. İkinci olarak, $25 \times 25 \text{ mm}^2$ boyutlarında 500 g/m^2 yoğunluğa sahip karbon ve cam kompozit malzeme kullanılmışlardır. Yapıştırma yüzeyine farklı tip ve sayıda örgü takviyelerinin oluşturularak numuneler oda sıcaklığında üç gün bekletilmiştir. Sonuçlar bağlantıların değiştirilmesiyle kopma yükünün, sıcaklığın artmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. Numunelere 2,5 J'lık bir darbe yükü uygulandıktan sonra, kırılma dayanımlarının azaldığını belirtmişlerdir.

Zou ve ark. [38] CFRP'nin farklı oryantasyonlarla yapıştırdığı CFRP/Al tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarını incelenmişlerdir. Üretimde $[0/90]$ 4s, $[0/45/-45/90]$ 2s ve $[45/-45]$ 4s oryantasyonuna sahip CFRP laminatlar ve 7075-T651 alüminyum plakalar epoksi reçine yapıştırıcısı olarak Araldite 2015 kullanılmıştır. CFRP laminatlar ASTM D3166'e göre 120 mm uzunluğunda 25 mm genişliğinde 1.65 mm kalınlığında dikdörtgen plaka şeklinde numuneler kesilmiştir. Bağlantı bindirme uzunluğu 15 mm ve yapıştırıcı kalınlığı 0,2 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Alt tabakalarla aynı kalınlığa sahip yapıştırılmış ara parçalar sabitlendikten sonra bağlantılar alt ve üst baskı plakaları 0,6

MPa basınçta oda sıcaklığında kürlenmiştir. Bağlantılara uygulanan çekme testleri ASTM D5868-01'a göre hızı 2 mm/dk olacak şekilde ve yorulma testleri ise ASTM D3166 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Yorulma testinden elde edilen verileri değerlendirmek için istatistiksel analiz yöntemi olan Weibull dağılımı kullanılmıştır. Sonuçlar [0/90]4s ve [0/45/ 45/90]2s orayntasyonunda gevrek kırılma ve [45/ 45] oryantasyonunda sünek kırılma oluşmuştur. Ayrıca [45/ 45] oryantasyonunda yorulma ömrü daha fazladır. Delaminasyon hasarı CFRP ucuna kadar ulaşmış, yapıştırılan bölgede mukavemet önemli ölçüde azalmış ve yapışkan tabakada çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir.

Saeedifar ve ark. [39] denizcilik uygulamalarında çift bindirmeli iki malzemeli yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantının performansını incelemişlerdir. Gemi inşaat  eliği AH36 ve yarı-izotropik bir düzene sahip iki karbon fiber takviyeli (CFRP) sandviç panel malzemeden 630x55 mm çubuk şekilde numuneler kesilmiştir. Yapıştırıcı olarak Scigrif SG300-40 Metil Metakrilat (MMA) kullanılmıştır. Sandviç kompozit ve  elik çubuk numuneler arası 10 mm 'dir ve MMA ile doldurulmuştur. Numunelerin  ekme testleri ASTM D3039 standardına göre yapılmıştır. Bağlantıdaki hasarı belirlemek için hızı 2 MHz olan Akustik Emisyon (AE), bağlantının hem üst hem de alt yüzeyindeki gerinimi için Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC), bağlantının uzunlamasına gerilimini ölçmek için Fiber Optik Sensör (FOS) kullanılmıştır. Bağlantıda yapılan testler ABAQUS programı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, yapışkanla bağlanmış iki malzemeli bir bağlantının Akustik Emisyon (AE), Fiber Optik Sensör (FOS) ve Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) tekniği ile hasar başlangıcının tespit edilebildiği, değerlendirebildiğini ve bağlantıdaki kritik hasar bölgelerini fark edebildiğini belirtmişlerdir.

Dehaghani ve ark. [40] CFRP kompozit malzemelerin tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının kayma mukavemetini incelemişlerdir.  alışmalarında karbon/epoksi kompozit malzeme üretmişlerdir. Karbon kompozitleri üretirken düz örgülü ve alan yoğunluğu 333 g/m² olan fiber kullanmışlardır. Numuneler 900 mm uzunluğunda 550 mm genişliğinde [0₇], [0/ 45/90] s, [45/90/0/ 45] s ve [90/ 45/0] s oryantasyonunda reçine transfer kalıplama yöntemiyle numuneler üretilmiştir. Çalışmada kullanılan epoksi 07333, 3 M'dir. Tek bindirmeli bağlantıda ise bindirme genişliği 25.4 mm ve yapışkan

kalınlığı, 0.18 mm'dir. Numune boyutları ASTM D 5868-01 standardına göre hazırlanmıştır. Yapıştırıcı kürleme işlemi 80°C'de ve 90 dakikada gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numunenin kalınlığı ve uzunluğu, opto-dijital mikroskop VHX 5000, Keyence kullanılarak ölçülmüştür. Kayma testi için ASTM D790 standardına göre 0,1 mm/s'lik hızında gerçekleşmiş ve her numune için yer değiştirme, Tracker, Open Source Physics kullanılarak optik olarak ölçülmüştür. Farklı yüzey işlemleriyle işlenmiş tek bindirmeli bağlantıdaki numunelerin mukavemeti üzerindeki etkisini yapışkanların yüzeyi aseton, zımpara kâğıdı, düşük basınçlı kum püskürtme ve yüksek basınçlı kum püskürtme ile temizlenerek ve karşılaştırılarak yüzey pürüzlülükleri incelenmiştir. Tek bindirmeli bağlantıdaki numunelerin yapıştırılan kısmındaki gerilim durumları numerik olarak ABAQUS 6.14-2 programı kullanılarak simüle edilmiştir. Sonuçlar en yüksek kayma mukavemeti yüzey işlemi olarak zımpara kâğıdı kullanılan durumda en düşük ise asetonla temizlemenin kullanıldığı tek bindirmeli bağlantı numunelerinde gözlenmiştir. Tüm yüzey işlemlerinde 0° oryantasyonda matris içinde çatlaklar meydana geldiği görülmüştür. Tek bindirmeli bağlantıda yapıştırılan parçanın eğilme modülü arttıkça kayma mukavemeti artmıştır. En düşük kayma modülü [90/±45/0]s oryantasyonun orta düzleminde bulunmuştur. Numerik ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde gözlemlenen hasar mekanizmalarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Boban ve ark. [41] GFRP kompozitlerin yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek bindirmeli bağlantı, tek adımlı bindirme bağlantısı, iki adımlı bindirme bağlantısı, üç kademeli bindirme bağlantısı ve çift bindirmeli bağlantı olmak üzere farklı bağlantı türlerinin davranışını numerik olarak karşılaştırmışlardır. Çalışmada 5 farklı bağlantı türü ANSYS'de modellenmiş ve deformasyon ve gerilim için ANSYS programı yardımıyla analizleri yapılmıştır. Yapıştırıcı tipi Sika 30 olan yapıştırıcı tabakasının kalınlığı 1, 2 ve 3 ve bindirme uzunluğu 70 mm, 100 mm ve 150 mm olarak hazırlanmıştır. Tek bindirmeli bağlantıda modellemek için katı 1765 düğümlü 644 elemanlı, tek adımlı bindirme bağlantısı 1802 düğümlü 675 elemanlı, iki adımlı bindirme bağlantısı 2691 düğümlü 1093 elemanlı, üç kademeli bindirme bağlantısı 3105 düğümlü 1279 elemanlı ve çift bindirmeli bağlantıda 2849 düğümlü 1078 elemanlı ikinci dereceden bir ağ tipi kullanılmış beş farklı bağlantıda da yapıştırıcıya 5000 N düşey yük uygulanarak gerilme ve deformasyon

etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar deformasyon ve gerilmenin çift bindirmeli bağlantılarda diğer bindirmeli bağlantılardan daha düşük olduğunu göstermiştir.

Mohabeddine ve ark. [42] yapıştırıcıyla bağlanmış CFRP/Çelik bağlantılarına yapıştırıcı tipinin, CFRP modülü, CFRP uzunluğunun ve çelik kalınlığının nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Yapıştırılan numuneler 7 gün kürlenmeye bırakılmış ve MTS 831-02 Elastomer standardına göre çekme testi için hazırlanan numuneler 115 mm uzunluğunda ve 19 mm genişliğinde kemik şeklinde hazırlanmıştır. Test için Sikadur 30, S&P HP220, Sika Power 1277, Araldite 2052-1, Araldite AW4858/HW4858, Araldite LY5052/Aradur 5052CH 6 altı farklı yapıştırıcı seçilmiş yapıştırıcı türleri ASTM D638-14 standardına göre karşılaştırılmıştır. CFRP kompozit laminatlar tek yönlü ve yüksek modüllü üretimi ise vakum torbalama ve elle yatırma tekniği olmak üzere iki farklı yöntemle üretilmiştir. Çeliğ çubuklarda ise 6 mm ve 10 mm olmak üzere iki kalınlıkta olan S275 karbon çeliği kullanılmıştır. Araldite 2052-1, AralditeAW4858/HW4858 ve AralditeLY5052/Aradur5052CH sünek yapıştırıcıların kırılkan yapıştırıcı olan Sikadur 30, S&P HP220 ve SikaPower1277'a göre çok yüksek mukavemet elde edildiğini göstermiş fakat sünek yapıştırıcı kalınlığındaki artış mukavemette bir azalmaya neden olurken kırılkan yapıştırıcılarda ise bu durum gözlenmemiştir. CRFP modülünün yüksek olması çift bindirme bağlantısının orta bölgesinde kopmaya neden olmuş fakat hem düşük hem de yüksek modüle sahip olan bağlantı sünek bir yapıştırıcı ile yapıştırıldığında çok yüksek mukavemet elde edilmiştir. CFRP uzunluğunun S&P HP220 yapıştırıcısı ve AW yapıştırıcısı kullanılan numunelerde mukavemetin arttığı gözlemlenirken çelik kalınlığının artmasıyla yapıştırılan CFRP bağlantılarında arka yüzündeki gerilim dağılımının etkilediği görülmüştür.

Jairaja ve ark. [43] CFRP/Al tek bindirmeli ve çift bindirmeli yapıştırma bağlantılarını numerik ve deneysel olarak incelenmişlerdir. CFRP/Al tek bindirmeli ve çift bindirmeli yapıştırma bağlantılarını numerik ve deneysel olarak incelenmişlerdir. CFRP kompozit malzemelerin uzunluğu 400 mm, genişliği 400 mm ve kalınlığı 2,5mm 10 katmanlı tek yönlü fiberler şeklinde ve 0 derece oryantasyonunda reçine olarak LY556/HY 951 epoksi kullanarak üretmişlerdir. Üretim yöntemi olarak elle yatırma ve vakum torbalama tekniği seçmişlerdir. Kürlenme işlemi oda sıcaklığında 24 saatte gerçekleşmiştir. Yapıştırıcılar

için yapıştırmadan önce ASTM D 2093 standardına göre bağlantı yüzeylerini hazırlamışlardır. Daha sonra ASTM D 5868 standardına göre Araldite-2015 ve AV-138 gibi iki farklı yapıştırıcı ile dört farklı tek bindirmeli bağlantı ve bir tane çift bindirmeli bağlantı olmak üzere beş numune üretilmiştir. Hem tek hem de çift bindirmeli bağlantıların geometrik ölçüleri uzunluğu 177.8 mm ve genişliği 25.4 mm olacak şekilde ASTM D 5868 standardına göre hazırlanmıştır. X-ışını radyografi testi ile de hazırlanan numunelerin son kontrolü yapılmıştır. Numunelerin, çekme testi ASTM D3039-00 standardına göre çekme hızı 1 mm/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Testlerin numerik analizleri ABAQUS programı yardımıyla yapılmıştır. Sonuçlar sünek Araldite-2015 yapıştırılmış tek bindirmeli bağlantıda CFRP ve yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde hasar görülmüş fakat kırılgan AV138 yapıştırılmış bağlantıya göre daha yüksek mukavemet gösterdiği bulunmuştur. Çift bindirmeli bağlantıda bağlantının ortası kırılgan AV138 yapıştırıcıyla uçları ise sünek Araldite-2015 'le olacak şekilde ikili yapıştırıcıyla birleştirilmiştir. Kırılgan AV138 yapıştırıcı kullanılmasına rağmen bağlantının tüm bölgelerinde bağ mukavemetinin tek bindirmeli bağlantıdan daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel ve numerik analizler karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Kim ve ark. [44] Farklı yapıştırma yöntemlerine göre tek bindirmeli olarak birleştirilmiş kompozit bağlantılar üzerine gelen hasar ve mukavemet etkisini incelemişlerdir. Kompozit malzemelerin üretiminde tek yönlü 0 derece ve 10 katmandan oluşan 0.155 mm kalınlığa sahip HT145/RS1222 karbon/epoksi prepregler kullanılmıştır. Tek bindirmeli bağlantı numunesi 200 mm uzunluğunda 25 mm genişliğinde üretilmiştir. Numuneler, yapıştırıcı olmadan sertleşme, FM73 yapıştırıcı kullanarak ve Hysol EA9309NA, EA9309.3NA iki çeşit yapıştırıcı kullanarak olmak üzere üç çeşit bağlama şekli kullanılarak üretilmiştir. Bağlantı şekillerini oluşturmak için kürleme işlemi 126 °C'de ve 40 psi basınçta gerçekleştirilmiştir. Numuneler, çekme testleri için ASTM D639-02 standardına göre yapılmış FM73 ve EA9309NA, EA9309.3NA yapıştırıcıların her biri için beşer numune üretilmiştir. Daha sonra yapıştırıcılar oda sıcaklığında kürlenmiştir. Testler sırasında çatlak başlangıcı ve büyümesi mikroskop kullanılarak gözlemlenmiş ve video kamera kullanılarak kaydedilmiştir. FM73 yapıştırıcı ile bağlı numunelerde kat içi delaminasyon meydana gelmiştir. Yapıştırıcısız numunelerde, üst ve alt yapışkanlar

arasındaki arayüzde kırılma meydana gelirken en yüksek kopma mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir. Bu durumun yapıştırıcının yapışma mukavemeti ile orantılı olmadığını belirtmişlerdir. EA9309NA ve EA9309.3NA yapıştırıcı ile bağlı numunelerde çatlak üst üste binen bölgenin her iki ucundan başlamış ve ara yüz boyunca ilerlediğini karbon liflerinin yapışan yüzeyden dışarı çekildiğini göstermiştir. Mikroskop ile incelemede ise çatlakın başlaması ve kırılmasının aynı anda meydana geldiği görülmüştür. Sonuçlar numunelerin kırılma sürecinin ve mukavemetinin yapıştırma yöntemine bağlı olduğunu göstermiştir.

Sadeghi ve ark. [45] Oryantasyon açısının E-cam/epoksi kompozitlerin tek bindirmeli bağlantıları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kompozitleri E-cam fiberden tek yönlü ve 243 kg/m^2 özellikli ve EPL 1012 fiber epoksiden oluşan 8 katmanlı 0 derece, 30 derece, 45 derece ve 90 derece oryantasyonda üretmişlerdir. Numuneler ASTM D1002 standardına göre 101.4 mm uzunluğunda, 25.4 mm genişliğinde ve 1.6 mm kalınlığında kesilmiş elle yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Tek bindirmeli bağlantıda kullanılan Araldite 2015 yapıştırıcısı ve sertleştirici olarak AV5308 ve HV5309-1 kullanılmıştır. Numuneler ASTM D638 standardına göre kemik şeklinde tasarlanmıştır. Daha sonra 60 °C'de 35 dakika kürlenmiştir. Çekme testleri ASTM D3039 standardına göre yarı statik çekme testleri ise SANTAM STM-150 test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında hızı 1.27 mm/dk yer olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bir yapıştırıcıda hasarın hem başlamasının hem de yayılmasının tahmini için kullanılan Yapışkan Bölge Modeli (CZM) özelliğine sahip model ABAQUS programında çift doğrusal çekme-ayırma yöntemi kullanılarak modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar 0 dereceden 30,45 ve 90 dereceye yükseldikçe yapışkan bölgedeki kayma gerilmesi ve bağlama mukavemeti azalmıştır. CZM analizinde ise bağlantı yerlerinin kırılma kesiti yapıştırıcı tabaka kopması ve E-cam kompozit numune üst tabakasının sıyrılmasından dolayı meydana gelmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kompozit Malzemeler ve Tarihsel Süreci

Bir kompozit malzeme, bir matrise (polimerler, metaller veya seramikler) gömülü takviyeden (lifler, parçacıklar, pullar ve/veya dolgu maddeleri) oluşur. Matris, takviyeyi istenen şekli oluşturmak için tutarken takviye, matrisin genel mekanik özelliklerini geliştirir [46].

Kompozit malzemeler alüminyum ve çelik gibi geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında daha yüksek özgül mukavemet ve sertlik, iyi aşınma direnci, yüksek sıcaklık performansı, daha iyi termal özellik, daha iyi yorulma ve sürünme direnci gibi üstün özelliklere sahiptir [47].

Kompozit malzemelerin tarihsel süreci eski, modern ve gelişmiş kompozit malzemeler olarak ayrılabilir.

Eski zaman kompozitleri; antikçağdan itibaren doğal kompozit malzemelerin kullanılmasını ifade eder.

Modern ve gelişmiş kompozit malzemeler ise; 1940'tan 1960'a kadar cam elyaf takviyeli plastikler (GFRP), 1965'te karbon elyaf takviyeli plastikler (CFRP), 1975 yılında karbon fiber takviyeli ve kevlar fiber takviyeli epoksi reçine, 1980 ile 1990 yılları arasındaki fiber takviyeli metal matrisli kompozit ve 1990 yılından sonra akıllı kompozit ve gradyan fonksiyonel kompozit gibi çok fonksiyonlu kompozit malzemeleri ifade etmektedir. Yıllar içinde kompozit malzemelerin gelişimi, tasarımı ve üretimi ile ilgili bilgi ve deneyimde artmıştır [48].

2.2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

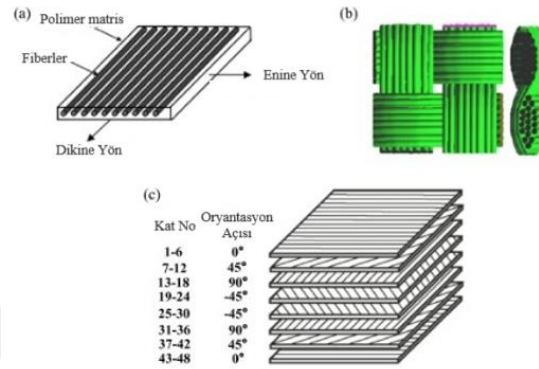
Kompozit malzemelerin düşük yoğunluklarından dolayı, mukavemet-ağırlık oranları ve modül-ağırlık oranları metalik malzemelerinkinden önemli ölçüde üstündür [49]. Kompozitlerin özellikleri, kompozitlerin hazırlanması sırasında matris içine serilen veya lamine edilen liflere bağlıdır [50]. Kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için takviye lifler şeklindedir. Bu hem mukavemeti yüksek hem de esnek şekilde olmasını

sağlamaktadır. Takviyeler parçacıklar, pullar, doğranmış fiberler (Whiskers), kısa lifler, sürekli lifler veya levhalar şeklinde olabilir [51]. Takviye lifleri için özgül mukavemet (mukavemet/yoğunluk oranı) ve özgül sertlik (sertlik/yoğunluk oranı) sürekli olarak artırılmıştır. Cam, kevlar, boron ve karbon fiberler için özgül dayanım ve özgül sertlik değerleri metallerle karşılaştırıldığında daha yüksektir [52]. Liflerin yüksek performanslı malzemeler olarak kullanımı üç önemli özelliğe dayanmaktadır [8]. İlk olarak tane boyutunun mikroyapı birimine göre küçük bir çap içermesi ki bu, yüksek bir mukavemetin elde edilmesini sağlamaktadır. Boyut ne kadar küçükse, malzemedeki kusur olma olasılığı o kadar düşüktür [53]. İkinci olarak uygulanan yükün matris aracılığıyla sert ve güçlü fibere aktarılmasına izin veren yüksek en-boy oranıdır. Üçüncü olarak çok yüksek esneklik, düşük modül, düşük sertlik ve küçük bir çapa sahip olma özelliğidir. Bu esneklik, lifleri kullanarak kompozit malzemeler üzerinde çeşitli tekniklerin kullanılmasına izin verir [54]. Yüksek performanslı kompozit malzemenin en yaygın biçimi, elyaf takviyeli plastiktir.

Yüksek mukavemetli, yüksek sertlikte ve düşük yoğunluklu elyaflar, elyaf takviyeli kompoziti oluşturmak için plastik bir matris içine gömülür. Mukavemet ve sertliğin çoğu takviye lifler tarafından sağlanır. Matris, lif hizalamasını korur ve yükü liflerin etrafına aktarır [55]. Ayrıca matris sıcaklık ve nemden kaynaklanan çevresel zararlardan da korumaktadır [56]. Elyaf takviyeli kompozitlerin uygulamalarda kullanılan biçimi elyaf ve matris tabakasının çeşitli katmanlarının istiflenerek ve istenen kalınlıkta birleştirilmesiyle laminat oluşmaktadır. Kompozit malzemelerde her bir katmandaki lif oryantasyonu, lif hacim kesimi kompozitlerin performansını, fiziksel ve mekanik özelliklerini oluştururken istenen kullanım amacına göre uyarlanabilirliği gibi özellikleride oluşturmaktadır [57], [58].

Kompozit malzemeler için en önemlisi, mukavemet ve sertliği artırarak ağırlığın azaltılmasıdır [59]. Geleneksel yapısal metaller hemen hemen eşit özellikler sergiledikleri için izotropik kabul edilir. Metallerin aksine kompozitler ise anizotropik özelliklere sahiptirler. Anizotropik malzemeler her yönde farklı mekanik özellikler gösterir; yani, tüm düzlemlerine veya eksenlerine göre simetrik değildir [60]. Şekil 2.1.(a)'da gösterildiği gibi fiber takviyeler tek yönlü prepreg (UD), kompozitler kullanılmaktadır ve anizotropik özelliklere sahiptir. Bu lif yönü boyunca maksimum

dayanıklılık ve mukavemete sahipken lif yönüne dik durumda ise minimum özelliklere sahiptirler. Çift yönlü prepreg (dokuma) (Şekil 2.1 b) şeklinde ise her iki yönde de maksimum dayanıklılık ve mukavemete sahiptirler. Çok yönlü fiber takviyelerde gelişmiş özellikler elde edebilmek için birçok prepreg katının farklı fiber oryantasyonlarının birbirine bağlanmasıyla yapılırlar [17], [18], [19],[61],[62],[63].



Şekil 2. 1. FRP kompozit yapıların en yaygın kullanım şeması: (a) tek yönlü laminat (b) çift yönlü laminat (dokuma kat) ve (c) çok yönlü laminat, yarı-izotropik oryantasyon dizisi $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{6s}$ [17], [18], [19].

Kompozit yapılarda lifler aynı oryantasyona sahip katlar (tabakalar) biçiminde oluşmaktadırlar. Lif oryantasyonun katlar arasında farklı olabilmesi için 0° , 90° , $+45^\circ$ ve -45° dizisinde yarı izotropik konfigürasyonu kullanılmaktadır. Üretimde ise $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ ve $[45^\circ/0^\circ/135^\circ/90^\circ/45^\circ]_s$ oryantasyonları kullanılmaktadır [64].

Kompozit malzemeler, fiziksel, kimyasal ve mekanik birleşimlerden oluşan karmaşık bir süreç olduğu için bir çok avantaj ve dezavantajları içermektedir.

Kompozitlerin avantajları;

- Kompozit malzemelerin daha hafif olması,
- Yüksek darbe dayanımı,
- Mukavemet ve sertlik için oryantasyonun uyarlanabilmesi,
- Korozyona karşı direnç,
- Montaj maliyetlerinin azalması,
- Yüksek sıcaklıklar ve hava koşullarına dayanıklılık,

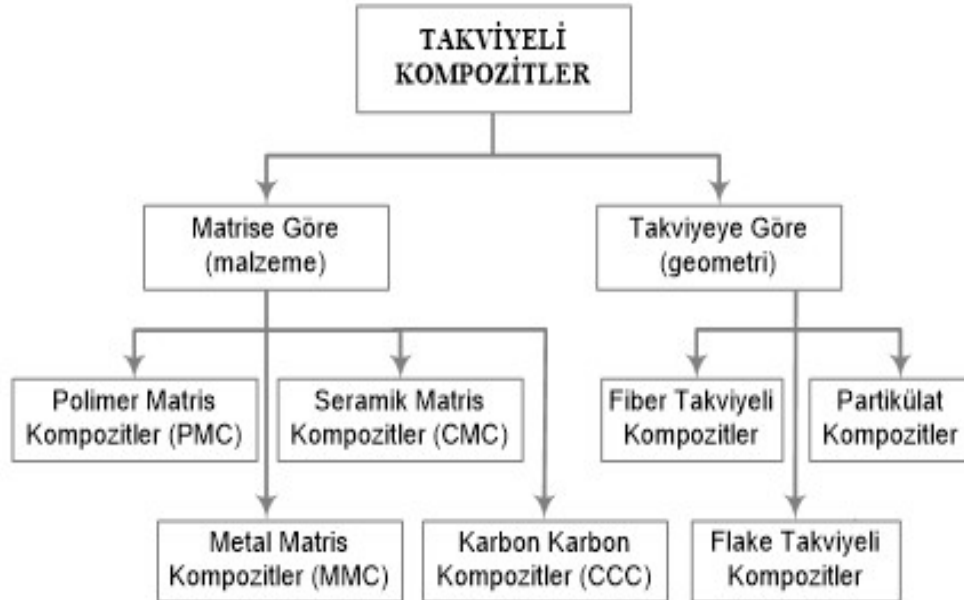
gibi birçok avantajları bulunmaktadır.

Kompozitlerin dezavantajları ise;

- Metal bir yapıya göre kompozit malzeme yapısı ve onarım süreci daha karmaşıktır.
- Çevresel şartlar (nem, sıcaklık vb.) özelliklerini etkiler.
- Sıcaklık direnci, matris malzemelerine bağlıdır.
- Kompozitlerin üretim maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır [65].

2.3 Kompozitlerin Sınıflandırılması

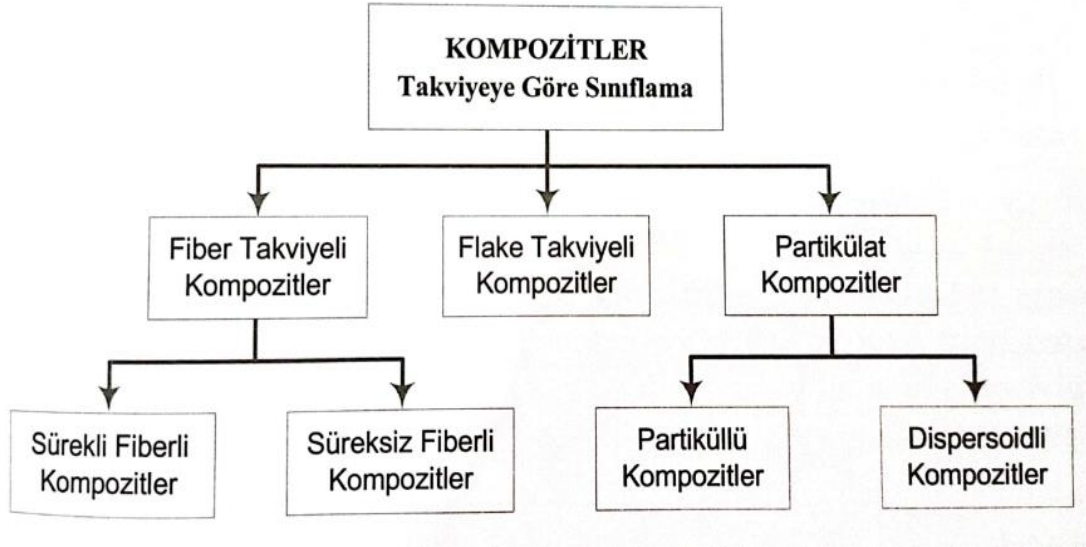
Kompozit malzemeler takviyenin şekline ve matrisin tipine göre sınıflandırılabilir. Takviyenin şekline göre fiber takviyeli, partikülat takviyeli ve flake takviyeli olmak üzere üç kategoriye ayrılırlar. Matris malzemelerinin türüne göre ise metaller, seramikler ve polimerlerden meydana gelmektedirler [66].



Şekil 2. 2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [67]

2.3.1 Takviye Geometrisine Göre Sınıflandırmalar

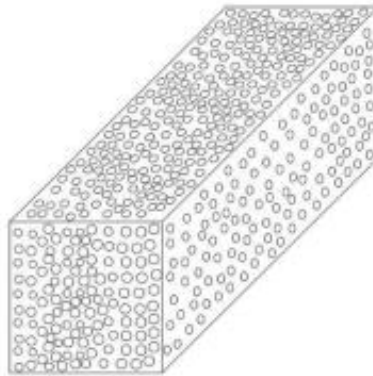
Kompozitler için takviyeler fiber, partikülat ve flake şekilde bulunurlar. Takviye fazının geometrisi kompozitlerin mekanik özelliklerini vermektedir. Ayrıca matrisin mekanik özelliklerini de geliştirmektedir.



Şekil 2. 3. Kompozitlerin içerdikleri takviye malzemeye göre sınıflandırılması [67].

2.3.1. 1. Partikülat Kompozitler

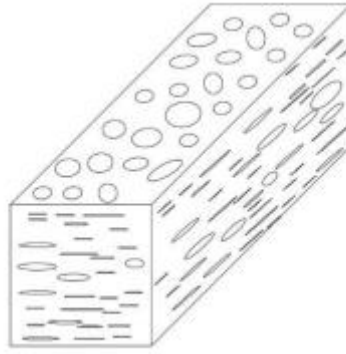
Matris içerisinde partiküllerden oluşur. Partiküllerin düzeni rastgeledir ve yaklaşık olarak eşit boyutlarda bulunurlar. Fakat bu düzen istenilen bir oryantasyonda da olabilir. Partiküllü kompozitlerin gelişmiş mukavemet, artan çalışma sıcaklığı, oksidasyon direnci gibi avantajları vardır.



Şekil 2. 4. Partikülat takviyeli kompozit [68].

2.3.1.2. Flake Kompozitler

Matris içerisinde düz takviyelerden oluşur. Tipik pul malzemeler cam, mika, alümina ve gümüştür. Pul kompozitler daha yüksek mukavemet ve düşük maliyet gibi avantajlar sağlar. Ancak pullar kolayca yönlendirilemez ve sadece sınırlı sayıda malzeme kullanılabilir.



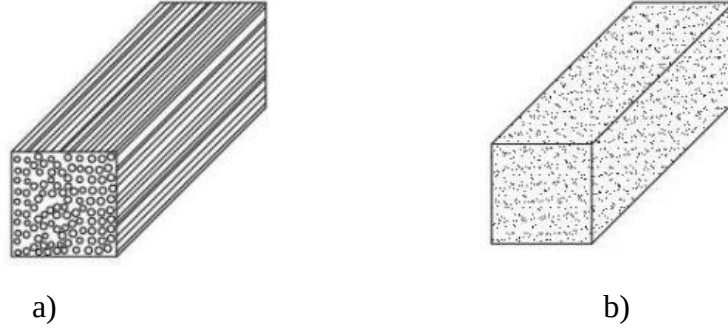
Şekil 2. 5. Flake takviyeli kompozit [68].

2.3.1.3. Fiber Kompozitler

Kompozitlerdeki takviye edici bileşenler, adından da anlaşılacağı gibi kompozitin mukavemetini arttırmalıdır. Ayrıca ısı direnci veya iletimi, korozyona karşı direnç ve sertlik sağlama gibi ilave katkıları da vardır. Takviye istenilen ihtiyaç özelliklere göre yapılabilir. Matris mukavemetini artıran bir takviye, matristen daha güçlü ve daha rijit olarak hasar oluşumunun en aza indirilmesini hedeflemektedir.

Bir fiber kompozitin performansı, fiberlerin uzunluğu, şekli, yönü ve bileşimi ile matrisin mekanik özelliklerine göre değerlendirilir. Fiberin matris içindeki yönelimi, kompozitin mukavemetinin bir göstergesidir. Mukavemet, fiberin uzunlamasına yönü boyunca en yüksektir.

Sürekli fiberler (uzun fiberler) düşük yoğunluk yüksek kuvvet içerdiklerinden mekanik özellikler üzerinde bakımından en verimlidir. Fakat istenilen oryantasyona sahip kısa fiberler (rastgele fiberler) ise çok daha fazla kuvvete sahiptir [67].

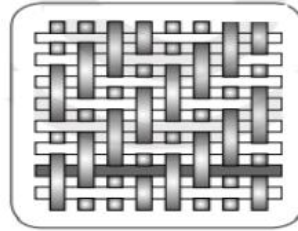


Şekil 2. 6. a) Sürekli fiberler (uzun fiberler) ve b) kısa fiberler (rastgele fiberler) takviyeli kompozitler [68].

Denizcilik uygulamalarında çift örgü takviyeli kompozitlerde twill örgü ve plain örgü daha çok öne çıkmaktadır [69].

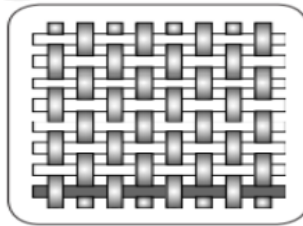
Twill örgü, plain örgü, satin örgü, basket örgü, leno örgü çift örgü takviyeli kompozitlerde kullanılmaktadır.

Twill örgü, bir ya da daha fazla lifin, tekrarlanarak iki veya daha çok olacak şekilde lifin üzerinden altına doğru tekrarlı olarak olarak örülmesiyle oluşur. Twill örgünün mekanik özellikleri diğer örgüler içinde oldukça yüksektir (Şekil 2.7)



Şekil 2. 7.Twill örgü [70].

Plain örgü, her bir lifi tekararlı olarak her bir lifin altından üstüne doğru olacak şekilde örülür. Bu durum diğer örgülere göre plain örgünün en zor örgü olmasına sebep olur. Diğer örgülere göre ise düşük mekanik özelliklere sahiptir ((Şekil 2.8) [70].



Şekil 2. 8. Plain örgü [70].

2.3.2. Matris Türüne Göre Sınıflandırmalar

Matris yükleri fiberler arasındaki eşit şekilde dağıtmak, fiberleri bir arada tutmak ve fiberleri mekanik ve çevresel hasarlardan korumaktadır.

Başlıca kompozit sınıfları Metal Matrisli Kompozitler (MMC) ve Seramik Matrisli Kompozitler (CMC), Polimer Matrisli Kompozitler (PMC) ve genellikle Karbon-Karbon kompozitler (CCC) bulunmaktadır.

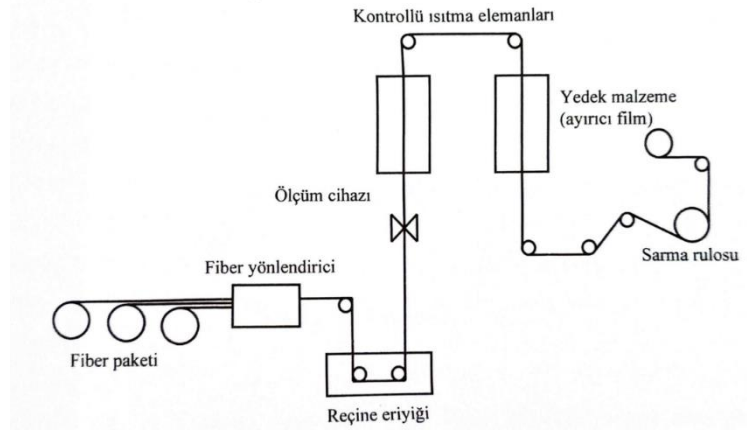
2.3.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler

En bilinen gelişmiş kompozitler, küçük çaplı fiberlerle (örn. grafit, aramidler, bor) güçlendirilmiş bir polimerden (örn. epoksi, polyester, üretan) oluşan polimer matrisli kompozitlerdir. Bilinen kompozit olmalarının başlıca sebepleri düşük maliyetleri, yüksek mukavemetleri ve basit üretim prensiplerini içermeleridir.[71].

PMC'lerin olumsuz yönleri düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek termal ve nem genleşme katsayıları ve belirli yönlerde düşük elastik özellikler sahip olmalarıdır.

Yüksek mukavemet, düşük maliyet, yüksek kimyasal direnç ve iyi yalıtım özelliklerinden dolayı en yaygın fiberler cam, grafit ve kevlar'dır. Dezavantajları ise düşük elastik modül, polimerlere zayıf yapışma, yüksek özgül ağırlık, sürtünme hassasiyet ve düşük yorulma dayanımıdır [71].

Polimerler hem termoset hemde termoplastik olarak sınıflandırılmaktadırlar. Termoset polimerler çözünmez ve kürlendikten sonra eritilemez çünkü zincirler güçlü kovalent bağlar ile rijit bir şekilde bağlanmıştır. Termoplastikler yüksek sıcaklık ve basınç altında şekillendirilebilir çünkü bağlar zayıf Van Der Waals tipindedir. Termoset ve termoplastik arasındaki farklar Tablo 2.1'de verilmiştir. Ayrıca 76-1270 mm arasında değişen standart genişlikleri mevcut bir polimer matris içindeki fiberlerden oluşan kullanıma hazır bantlara prepregler denilmektedir. Bir prepreg hazırlanırken fiber dizisi reçine banyosundan geçirilir. Sonra kür reaksiyonunu iletirmek için reçine emdirilmiş fiberler A aşamasından B aşamasına ısıtılır. Ayırıcı bir film, silindir üzerine sarılır. Bu film, depolama sırasında prepreglerin birbirine yapışmasına engel olur (Şekil 2.9.).



Şekil 2. 9. Prepreg üretim şeması [71]

Tablo 2. 1. Termoset ve termoplastik arasındaki farklar [71]

Termoplastikler	Termosetler
Isı ve basınç altında yumuşar ve böylece kolay tamir edilir	Isıtmayla ayrıştırılmaz
Yüksek kopma şekil değiştirmeleri	Düşük kopma şekil değiştirmeleri
Belirsiz raf ömrü	Kesin raf ömrü
Yeniden işlenebilirlik	Tekrar işlenmez
Kolay işlenebilme ve yapışkan olmama	Yapışkan
Kısa kür süresi	Uzun kür süresi
Yüksek üretim sıcaklığı ve viskozitenin üretimi zorlaştırması	Düşük üretim sıcaklığı
Mükemmel çözücü direnci	Düşük çözücü direnci

En yaygın kullanılan fiber polimer matrislerde camdır. Cam, yüksek mukavemet, düşük maliyet, aşınmaya karşı direnç ve iyi yalıtım özellikleri göstermektedir. En yaygın türleri E-cam ve S-camdır. E-Cam burada kullanılan E Elektriksel uygulamalar içindir. E-Cam iyi elektriksel özelliklere sahiptir. S-camdaki S harfi yüksek silika anlamında kullanılır. S-Cam E-Cam'a göre daha yüksek mukavemet ve yorulma direnci özelliklerine sahiptir. C-camdaki C harfi ise korozyon anlamına gelmektedir. Depolama tankı gibi kimyasal ortamlarda kullanılır.

R-camı düşük dielektrik sabitleri gerektiren uygulamalarda, D-camı (dielektrik) ve yüzey görünümünü iyileştirmek içinse A-cam kullanılır.

Grafit fiberler en sert fiberlerden birisidir. Fiberin sertliği grafit içeriği kadar yüksektir. Ancak önemli bir dezavantajı, sertlik ve mukavemetin ters orantılı olmasıdır. Ayrıca yüksek maliyetli olması da eklenebilir.

Aramid fiber özellikleri yüksek çekme mukavemetine, düşük yoğunluğa ve düşük maliyete sahip olmalarıdır. Genellikle kompozit takviye olarak en yaygın şekilde kullanılan aramidlerden yüksek özgül rijitliğe sahip olan Kevlar 49'dur.

Polimer kompozitlerde en çok kullanılan epoksi, fenolik, akrilik, üretan ve poliamiddir. Epoksiler pahalı olmasına rağmen en çok kullanılan termoset reçinelerdir. Epoksilerin avantajları yüksek mukavemet, mkemmek yapışma, kürlenme sırasında düşük seviyelerde uçuculuk, epoksi ve takviyesi arasındaki bağın büyük kayma gerilmeleri kazanma eğilimini azaltan düşük büzülme oranları dezavantajları ise yüksek maliyet ve işleme zorluğudur [71].

2.3.2.2. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMC) bir metal matrise sahiptir. Titanyum, alüminyum ve magnezyum şu anda en yaygın matrislerdir. MMC'ler yüksek dayanıklılık, süneklik, çekme modülü, termal iletkenlik vb. gösterecek şekilde özel olarak tasarlanabilir. Bu nedenle, MMC'deki bu özellikler, onları elektronik, uçak, robotik ve daha pek çok farklı uygulama aralığına uygun hale getirir [72].

Metal matrisli kompozitler temel olarak elik ve alüminyum gibi monolitik metallere göre avantaj sağlamak için kullanılır. Bu avantajlar arasında alüminyum ve titanyum gibi düşük yoğunluklu metalleri takviye ederek daha yüksek özgül mukavemet ve modül; grafit gibi düşük termal genleşme katsayısına sahip fiberlerle takviye ederek daha düşük termal genleşme katsayıları ve yüksek sıcaklıklarda mukavemet gibi özelliklerin korunması yer almaktadır.

2.3.2.3. Karbon-Karbon Kompozitler

Karbon- karbon kompozitlerde hem takviye hemde matris karbondur. Karbon karbon kompozitler pahalı olduklarında dolayı kullanım alanları yaygın değildir. Pahalı olmalarının en önemli sebebi kaplama işlemleri ve proses teknikleridir. Bu kompozitlerin en önemli özellikleri gerilme kuvveti ve gerilme modülünün yüksek olması ayrıca performanslarını yüksek sıcaklıkta bile koruyabilmeleridir. Bunun yanında kayma ve

yayılmaya karşı dirençli, kırılma dayanımı yüksek, termal genleşme katsayısı düşük ve termal iletkenliği yüksektir [67].

2.4. Deniz Uygulamalarında En Çok Kullanılan Kompozitler

Kompozit malzemeler elyaflarla güçlendirilmiş bir matristen oluşmaktadır. GFRP ve CFRP denizcilik uygulamaları için yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerdir. GFRP ve CFRP arasındaki fark GFRP ince cam elyaflarıyla güçlendirilmiş polimer bir matristen yapılmış elyaf takviyeli bir polimerdir. CFRP ise karbon fiberlerden ve bir polimer matristen yapılmış elyaf takviyeli bir polimerdir.

GFRP'nin mukavemet özellikleri CFRP'den biraz daha düşük ve daha az sert olmasına rağmen CFRP daha yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine sahiptir. GFRP malzeme genellikle daha az kırılımandır. Fakat GFRP'de ham maddeler çok daha ucuzdur. Hem GFRP hem de CFRP mukavemet ve ağırlık özellikleri metallere göre oldukça avantajlı olup, kalıplama işlemleriyle kolaylıkla şekillendirilebilmektedir.

2.4.1. Cam Fiber Takviyeli Polimerler (GFRP)

Cam fiber takviyeleri, toz halindeki SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO veya MgO 'nun çeşitli kombinasyonlarından yapılarak daha sonra doğrudan eritme yoluyla yaklaşık 1300°C 'ye kadar ısıtılır ardından kalıplanır. E-cam (kireç alüminyum borosilikat), iyi mukavemet özellikleri ve su bozunmasına karşı direnci nedeniyle deniz laminatlarında kullanılan en yaygın cam takviyesidir. S-cam (silikon dioksit, alüminyum ve magnezyum oksitler) yaklaşık üçte bir oranında daha iyi gerilme mukavemeti ve E-camdan daha iyi yorulma direnci göstermektedir. S-cam elyafın maliyeti, E-cam elyafının yaklaşık dört katıdır. Cam elyaflar iyi kimyasal direnç, mükemmel gerilme mukavemeti, işlenebilirlik sergilemekte ve üretimi ucuzdur [68].

Kompozitler termoset veya termoplastik içeriğinde bulunurlar. FRP malzemelerinin kullanılması, deniz araçlarında hafiflik, yakıt tüketiminde ve maliyette azalama gibi faydalar sağlamaktadır. En çok kullanılan kompozitler karbon fiber takviyeli kompozitler (CFRP) veya cam elyaf takviyeli kompozitlerdir (GFRP) 'dir. Cam elyafı, düşük maliyeti ve birçok reçine ile uyumlu olması nedeniyle en çok kullanılan elyaftır. Camın maliyeti karbon fiberlere göre 5 kat daha düşüktür, ancak karbon fiberler daha yüksek mukavemete sahiptir [69]. Cam elyaf takviyeli reçineler 20. yüzyılın başlarından beri kullanılmaktadır.

Cam elyaf takviyeli reçineler çok hafif ve mukavemeti yüksek malzemelerdir, ancak cam elyafın kendisinin çok mukavemetli olmaması nedeniyle modülleride çok yüksek değildir. Yirminci yüzyılın üçüncü çeyreğinde yüksek modüllü lifleri içeren boron, karbon, silisyum karbür ve alümina gibi malzemeler ortaya çıkmıştır [51].

GFRP malzemeler fonksiyonel özellikleri çeliğe eşit, alüminyumdan daha yüksek rijitliğe sahip ve özgül ağırlığı çeliğin dörtte biri kadardır [70]. Deniz araçlarında gemi gövdeleri korozyonu önlemek için karbon çelik levhaların kaynaklanması ile oluşturulmuştur. Tüm kaynak işlemleri ısıdan etkilenen bölgede gerilim yoğunlaşmaları oluşarak korozyon oluşması daha da hızlanır ki bu durum yorulma ömrünü azaltır [71]. GFRP malzemeler iyi hasar toleransı, yüksek mukavemet, korozyona karşı direnç, iyi elastiklik gibi iyi özelliklere sahip olduklarından denizcilik alanında kullanılmaktadır [72].

2.4.2. Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP)

Karbon ve grafit elyaflar, PAN (bir polimer fiber olan poliakrilonitril) bazlı veya zift (saflaştırılmış petrol veya kömür katranı) bazlı öncüler kullanılarak üretilir. Öncül ilk adımda, aşırı yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak oksitlenir. Daha sonra karbonizasyon ve grafitleşme süreçlerinden geçerler. Bu işlemler sırasında sertlik, mukavemet ve kimyasal özellikleri değişikliklere uğramaktadır. Yüzey işleme ve boyutlandırma işlemi ise reçine uyumluluğunu ve işlenebilirliğini geliştirmektedir. PAN bazlı lifler, karbon liflerinin üretiminde en yaygın olarak kullanılmaktadır. Zift bazlı lifler ise daha sert ve daha kırılğan olma eğilimindedir.

Endüstride farklı sertlik, mukavemet ve kopma uzaması sunan çok çeşitli karbon fiber türleri üretilmektedir. HS (yüksek dayanımlı) karbon lifleri çok yüksek gerilme mukavemeti sergilerken, HM (yüksek modüllü) karbon lifleri çok serttir. Karbon fiberler yüksek sıcaklıkta iyi performans özelliğine sahiptirler. Yük altında ise eğilebilir ancak kalıcı olarak deforme olmamaktadırlar.

Takviye ve matris malzemesi arasındaki ara yüzey bağı kompozitin mukavemetini belirlemekte matris arayüz bağının bozulması, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin (FRP) özelliklerini etkilemektedir [73].

2.4.3. Matrisler (Reçineler)

Kompozitlerde matrislerin yüksek boyutlu çapraz bağlantı noktalarına sahip olması yüksek kırılma mukavemeti, yüksek solvent direnci ve yüksek modül gibi üstün mekanik özellikleri göstermektedir. FRP kompozitler için en yaygın matrisler epoksilerdir. Bunlarda yüksek boyutlu çapraz bağlantı noktalarına sahiptirler. Fakat yüksek boyutlu çapraz bağlantı noktalarının en büyük dezavantaj özelliği kırılma olmalarıdır. Bu özellik malzemelerinin yük taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkilemektedir [74], [75], [76].

Kompozitler için matris malzemesi olarak seçilebilecek çeşitli polimerler vardır. Polimerler termosetler ve termoplastikler olmak üzere iki kısımda incelenir. Bunlar

1. Doymamış Polyester
2. Vinylester Reçine
3. Epoksi Reçine
4. Fenolik Reçine
5. Poliimidler
6. Termoplastik Reçine
7. Elastomerik Reçine: Poliüretan

Polimerler, sıcaklığın etkisine bağlı olarak termoplastik ve termoset olarak iki gruba ayrılmaktadır. Vinylesterler, polyesterler, epoksiler ve fenolikler, gemi yapımında kullanılan en çok kullanılan matris malzemeleridir. Bu matrislerin içerisinde en yaygın kullanılan reçineler termosetlerdir ve sertleşme adı verilen iki düşük moleküler madde arasındaki geri dönüşü olmayan bir reaksiyonla oluşturulurlar. Matris reçineleri genellikle çapraz bağlama reaksiyonunu tamamlamak için yüksek sıcaklıklarda kürlenir [77].

Termoplastikler ise sıcaklık artırılıp azaltılarak tekrar tekrar yumuşatılıp sertleştirilebilen türdür [69]. GFRP ve CFRP matris fazı epoksi, polyester reçineler ve vinilester gibi termoset polimerlerden oluşur. [78].

Yapılan çalışmalarda deniz suyuna uzun süre maruz kalan cam/polyester, cam/vinil ester, karbon/polyester ve karbon vinil ester kompozitlerin eğilme mukavemeti ve modülünde hasarlar meydana gelmektedir [79]. Ayrıca deniz suyuna maruz kalan karbon/vinil ester kompozitlerinde kırılma tokluğunda %30 azalma görülmüştür [80].

Epoksi, yüksek mukavemeti ve modülü, düşük büzülme seviyesi ve uçuculuğu, daha iyi yapışma ve kimyasal direnci ayrıca işleme kolaylığı nedeniyle en yaygın kullanılan matris malzemesidir. Epoksi kompozit matrisler içinde en sık kullanılan termosetlerdir.

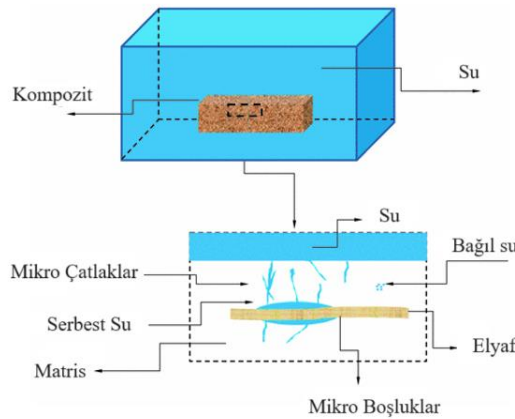
Termoset re inler solventlere ve a ındırıcılara karşı iyi direnç, ısıya ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık, yorulma direnci, esneklik, iyi yapışma gibi özelliklere sahip olmalarından dolayı tercih edilirler [81].

2.5. Çevresel Parametrelerin Etkileri

Kompozit malzemeler üst yapılar ( verteler, perdeler, direk sistemleri, pervaneler, tahrik milleri, dümenler, borular, valfler), eğlence alanında (sürat tekneleri, yarı  yelkenlileri, kanolar) ve ticari alanda (cankurtaran botları,  amandıralar, yolcu feribotları, derin deniz dalgıçları, balıkçı gemileri) gibi geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Deniz ortamlarında nem ve sıcaklığa, UV (Ultraviyole Radyasyon) ve çözeltilere maruz kalma denizcilik uygulamalarında kompozitler için en büyük zordur.

2.5.1. Nem ve Sıcaklık

Metaller gibi geleneksel yapılı malzemelere göre avantajlı olan kompozit malzemeler zorlu ve değişen  evre koşullarında ısıya ve neme karşı hassastır [82]. Şekil 2.10'da kompozit nem emiliminin durumunu göstermektedir [83].



Şekil 2. 10. Kompozit nem emilim mekanizması [83].

Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitlerde nemin emilmesi, yapıların mukavemeti ve sertliğinde azalmaya neden olmaktadır [84]. Deniz alanında, nem emilimi, FRP kompozitlerinin bozulmasının esas nedenidir. FRP malzemelerinin mekanik davranışı matris malzemesinde meydana gelen değişikliklere bağlıdır [85],[86].

Nem, kompozitlerin şişme, plastikleşme, delaminasyon ve fiber-matris ara bağının ayrılması veya kopmasıyla mekanik özelliklerde azalmaya neden olmaktadır [87]. Nem emilimi, plastikleştirme ve hidroliz yoluyla epoksi matrisinin termofiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinde değişikliklerde yol açmaktadır [88],[89]. Emilen su epoksi reçinelerini yumuşatır, şişmesine neden olur. Nemin bir kompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, hem elastik modülü hem de camsı geçiş sıcaklığını (T_g) düşürmesidir. Camsı geçiş sıcaklığı T_g , malzeme özelliklerini büyük ölçüde azalttığı için önemlidir [90]. Aynı zamanda fiber-matris bağına bozarak mikroyapısal bütünlüğün kaybına neden olur. Sonuçta nem emilimi basınç dayanımı, katmanlar arası kayma dayanımı, yorulma direnci ve darbe toleransı gibi matris ağırlıklı özelliklerin bozulmasına yol açmaktadır [88], [91], [92].

Neme sürekli maruz kalması, durumunda FRP kompozitlerin fiber /matris arasındaki arayüzey bağ kuvvetinin mukavemetini azaltmaktadır [93]. Nem emilimi Fick'in difüzyon kanunu ile açıklanmaktadır. Mevcut nem difüzyon modelleri, sabit difüzyon katsayısına sahip Fick yasasına dayanmaktadır. Bir konsantrasyon gradyanının neden olduğu tek boyutlu bir sistemdeki parçacıkların (atomlar, moleküller, iyonlar vb.) akışı olarak ifade edilmiştir [94]. Ayrıca bu yasa nem emme kütlesinin zamanın karekökü ile doğrusal olarak arttığını doygunluğa ulaşılan kadar da kademeli olarak yavaşladığını belirtmektedir [95]. Emilen nem miktarı matris ve liflerde farklı olduğu için hacimsel artışta büyük uyumsuzluğa neden olmakta bu durumda gerilme ve gerinim alanlarını faklılaştırmaktadır [82]. Nem emilimi matrisi oluşturan kimyasal bileşime, neme maruz kalma ortamına ve sıcaklığa bağlıdır [96], [97]. FRP kompozitler yüksek sıcaklıkta suya daldırma, nem emiliminde artışa gerilme mukavemetinde ve arayüzey yapışmasında azalmaya yol açar [98]. Takviyeli kompozitler ve vinil ester bazlı kompozitlerin nem emilimini karşılaştırıldığında tuzlu su emiliminin polyester takviyeli kompozitler için doygunluğa kadar doğrusal olduğunu belirtmekte fakat üç ay sonra ise kütle değişiminde ani bir düşüş gösterdiği görülmüştür [85].

Ayrıca denizcilik uygulamaları için son yapılan çalışmalarda;

Visco ve ark. [99] Ortoftalik polyester Synolite 0188 ve izoftalik polyester Synolite 0288 PA reçinenin ve cam fiber kompozitlerdeki nem emilimini karşılaştırmıştır. İzofthalik polyester Synolite 0288 PA reçinenin daha iyi nem emilim direncine sahip olduğu gösterdi.

Abdurehman ve ark. [100] GFRP kompozitlerinin dezavantajlarını azaltmak için CFRP ve GFRP kompozitlerinin hibridizasyonu, 6 ay boyunca kompozitler deniz suyuna daldırılır. Deniz ortamında basınç dayanımının en büyük sorun olduğunu belirtmişlerdir. SEM analizlerinde deniz suyuna daldırıldıktan sonra elyaf/matris ayrılması ve elyafın çekilmesini göstermektedir. Ayrıca mekanik özelliklerde çekme mukavemetinin %19 kesme mukavemetinin %13 ve basınç mukavemeti ise %50 azalmıştır.

Bhat ve ark. [101] deniz suyunun izoftalik polyester ve cam elyafdan yapılmış 6, 8 ve 10 mm kalınlığındaki kompozitlerin sertliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deniz suyuna daldırıldıktan sonra cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozitlerin kütledeki değişiklikler, su emilimi ve çözünür parçacıkların oluşumuna neden oldu.

Emilen nem, matrisin şişmesini ve aşınmasını sağladı. Sızdırmanın bir sonucu olarak matriste yapay olarak hazırlanan deniz suyunda bulunan tuzlar, cam elyaflarını açığa çıkararak çaplarını azalttı. Kompozit malzemede deniz suyuna uzun süre maruz kaldıktan sonra sertlik değeri azalmış ve fiziksel hasar ise geri döndürülemez kimyasal bozulmadan kaynaklanmıştır. Kompozit numunelerin deniz suyuna daldırılmasından sonra yapılan SEM ve EDX analizleri, lif/matris arayüzünün önemli ölçüde bozulduğunu ve daldırma süresi arttıkça hasar derecesinde arttığını ortaya koymuşlardır.

Beura ve ark. [102] deniz suyuna daldırılmış GFRP kompozitlerinde, zaman, tuzluluk ve gerinim hızının birlikte etkisiyle hasar oluşumu ve yayılmasını 90 gün süre ile oda sıcaklığında aynı anda sistematik olarak analiz eden bir araştırma yapmışlardır. 30, 35 ve 40 ppt tuzluluğa sahip deniz suyuna elle yatırılmış 18 katlı kompozit numuneler kullanmışlardır.

Başlangıçta, Fickian bölgesinde difüzyon katsayısı tuzluluktaki artışla azalırken, yaşlanma ortamı en yüksek tuz konsantrasyonuna 40 ppt sahipken, en düşük su alımını göstermiştir. Burada nem emilimi Fickian olmayan hale yani matrisin parçalanmasının artması durumuna gelmiş ve en yüksek tuz konsantrasyonuna sahip ortamda en yüksek su alımı görülürken difüzyon katsayısının ve cam geçiş sıcaklığı (T_g) azaldığını aynı anda gerinim oranında bu durumdan etkilendiği görülmüştür. Tüm bu sonuçları daldırma süresi ve yüksek tuzlulukla ilişkilendirmişlerdir.

Yüksek sıcaklıkta suya daldırma, kompozitlerin nem emiliminde artışa neden olmaktadır. Gerilme mukavemetinde ve arayüzey yapışmasında ise azalmaya yol açmaktadır.

Kompozit malzemelerde mukavemet değişimi k rleme süresine ve sıcaklığa bağlıdır [103], [104], [105].

Nem emme oranının daldırılan su sıcaklığına bağlı olduğu ve süre arttıkça matrisin plastikleşmesi ve şişmesi görülmektedir. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla fiber/matris arayüz mukavemetini azalmaktadır [97], [106],[107],[108].Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalma camısı geçiş sıcaklığında (T_g) düşürmektedir [97],[109], [110],[111],[112].

2.5.2. Ultraviyole Radyasyon (UV) ve   zeltiler

Güneş ışınlarına maruz kalmak, UV (Ultraviyole Radyasyon) emilmesine neden olmaktadır [113]. Kompozit malzemeler, UV radyasyonunun etkisiyle çevresel olarak bozulmaya maruz kalır. Bozulmanın bir sonucu olarak polimer yapıda meydana gelen i  yapısal değişiklikler, malzemenin görünümündeki değişikliklerle yakından ilişkilidir [114].

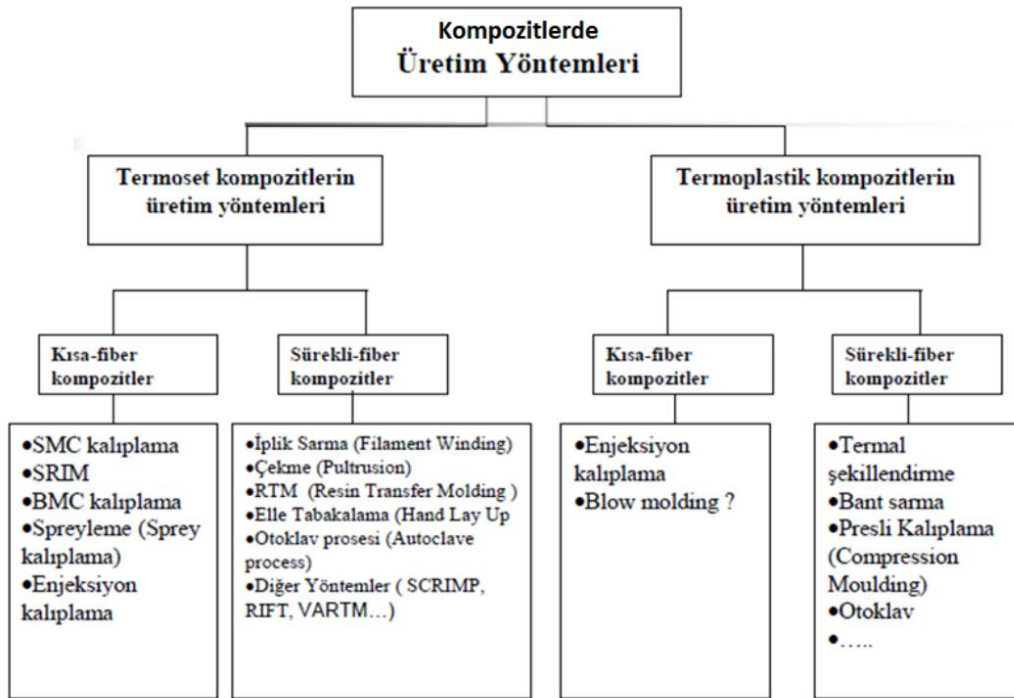
UV fotooksidatif yaşlanmaya bu da polimer zincirlerinin kırılmasına neden olmaktadır. UV serbest radikaller üreterek ve polimerlerin moleküler ağırlığını azaltmaktadır. Bu durum renk bozulması ve mekanik özelliklerin azalmasına neden olmaktadır [115]. Mekanik  zelliklerindeki bu durum özellikle ağırlıktaki azalma reçine (matris) mukavemetindeki ve ısı direncindeki azalma ile ilgilidir [114],[116],[117]. UV ışınlarına fazla maruz kalma, yüzey reçinesinde mikro çatlama, oyuklaşma ve pullanmayı meydana getirerek bozunma süresini hızlandırmaktadır. Bu, kompozitlerin mukavemet özelliklerini etkilemektedir [118], [119],[120].

Deniz ortamında bulunan kompozitlerin çevresel zorluklarından ilki tuzlu ve aşındırıcı deniz suyunun verdiği zarardır. FRP kompozitlerde matris malzemesi hidroksil çözelti ile kolayca reaksiyona girerek elyaf/matris interfaz yapısını bozar [121]. Deniz suyundaki farklı tuz bileşenleri olan Ca ve Mg tuzları, deniz suyunun içindeki kompozit malzemenin yüzeyinde biriktiği için nem alımı yavaşlar. Bu durum Fickian yasasına dayanmaktadır. Bu yasa nem emiliminin kütlesinin zamanın kareköküyle doğrusal olarak arttığını ve daha sonra doğgunluğa ulaşılana kadar kademeli olarak yavaşladığını belirtmektedir [19].

2.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Süreçleri

Kompozit malzemelerin üretimi için çok sayıda yöntem vardır. Kompozit üretim yöntemini seçerken dikkate alınması gereken parça karmaşıklığı, üretim hızı, yüzey kalitesi, malzeme seçimi ve maliyeti gibi çeşitli faktörler vardır.

- Kompozitlerde seçilecek üretim yöntemi; takviye malzemesine, matris malzemeye, parça şekline, istenen mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olarak değişim gösterir.
 - Bir parçayı üretmek için genel olarak; ham madde, kalıp, ısı ve basınca ihtiyaç duyulmaktadır.
 - Fiberlerin (elyafın) eşit aralıklı ve homojen bir dağılım göstermesi gerekmektedir.
 - Elyaf malzemeleri mekanik temaslara karşı hassas olduklarından matris tarafından iyice ıslatılması gerekir.
 - Elyaf ile matris arasında kuvvetli ara yüzeyin oluşturulması gerekmektedir. [122].
- Kompozitlerde üretim yöntemleri şeması Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 11. Kompozitlerde üretim yöntemleri [122].

2.6.1. En Çok Kullanılan Üretim Yöntemleri

Kompozit üretim süreçleri esas olarak reçineyi ve takviyeyi şekillendirmek için açık veya kapalı bir kalıplamayı içermektedir. Açık kalıplamada kompozit malzemeler açık bir kalıba yerleştirilir ve burada havaya maruz kaldığında kürlenir ve sertleşir. Kapalı kalıplamada kompozit malzemeler vakum poşeti veya iki taraflı, atmosfere kapalı bir kalıp içerisinde işlenir ve kürlenir. Kapalı kalıplamada üretim süreci oldukça hızlıdır. Tablo 2.2’de Açık kalıplama ve kapalı kalıplama süreçleri gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Açık kalıplama ve kapalı kalıplama [123].

Açık Kalıplama Süreci	Kapalı Kalıp Süreci
• Elle yatırma • Püskürtme işlemi • Filament Sarımı	• Reçine Transfer Kalıplama (RTM) • Vakum destekli reçine transfer kalıplama • Basınçlı kalıplama • Pultrüzyon • Enjeksiyon kalıplama

2.7. Denizcilik Endüstrisinde Kompozit Malzemelerin Uygulanması

Denizcilik endüstrisi yapısal bileşenleri, ilgili çevresel zorluklara maruz kalmaktadır. Bu nedenle, yüksek direnç gösteren ve uzun süreler boyunca çok az bakım gerektiren malzemeler dikkate alınmaktadır. Ek olarak hafif olması ve korozyon direnci genel olarak dikkate alınmaktadır [124].

2.8. Yapıştırılarak Birleştirilen Kompozit Bağlantılar

Kompozit yapılar sıklıkla birden fazla parça halinde üretilmekte ve daha sonra çeşitli birleştirme yöntemleri kullanılarak bir araya getirilmektedir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, avantajları nedeniyle deniz inşaatları, havacılık, rüzgâr türbinleri, otomobiller gibi kompozit yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır [125].

Yapıştırılarak birleştirilen bağlantıların daha iyi mukavemet/ağırlık oranı ve gerilimlerin daha düzgün dağılımı gibi özellikleri nedeniyle civata, kaynak ve perçin gibi geleneksel birleştirme yöntemler yerine daha yaygın olarak kullanılmaktadır [126].

Kompozit yapıların imalatında yüksek maliyetli elle montaj sürecini önemli ölçüde azaltır [127].

Yapıştırılarak birleştirilen bağlantıların performansı, kompozit bağlama yöntemleri, yüzey hazırlığı, malzeme parametreleri (yapışkanlık ve yapışma özellikleri), geometrik parametreler (yapışkan kalınlığı, bindirme uzunluğu, istifleme sırası, kat açısı, dolgu vb.) gibi birçok parametreye bağlıdır [128].

Tek bindirmeli yapıştırırmalı birleştirme, diğer geleneksel birleştirme işlemlerine kıyasla zaman ve maliyet tasarrufu, iyi sönümlene özellikleri ve çok yüksek mukavemet gibi birçok avantaj sunar. Bu bağlantıda yük bir plakadan diğerine yapıştırıcı vasıtasıyla düzgün bir şekilde iletilir [129].

Yaygın olarak kullanılan yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar basit bindirmeli, açılı kenar bindirmeli, çift bindirmeli ve katlanmış bindirmeli bağlantılardır. Bunlar arasında tek bindirmeli yapıştırırmalı birleştirme, imalat açısından en kolay geometriye sahip olması nedeniyle en yaygın bağlantı olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.12). Tasarım sürecinde, malzeme, geometrik ve çevresel koşullar için bağlantıların durumunu etkilemektedir.



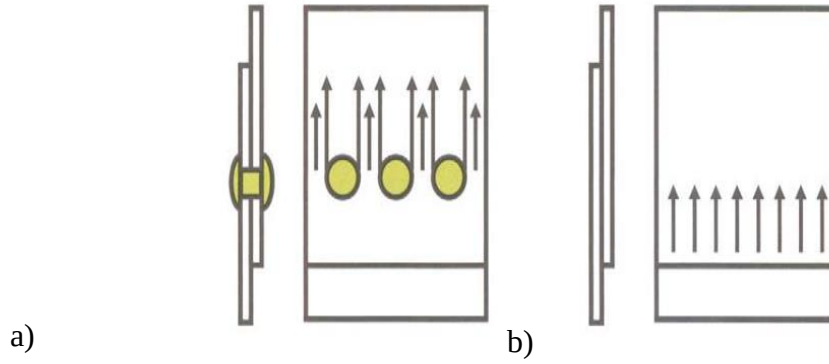
Şekil 2. 12. Tek bindirmeli yapıştırırmalı birleştirme [130].

Basit bindirmeli (tek bindirmeli) bağlantılarda dönmeye bağlı moment etkisi, yapıştırıcı kenarlarında yüksek gerilme yoğunluklu bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. Yapıştırırmalı bağlantılarda ani hasar oluşumları, gerilme yoğunluğunun en yüksek olduğu bölgelerde meydana gelmektedir. Yapıştırırmalı bağlantılarda ani hasar oluşumlarının engellenmesi, soyulma gerilmesi yoğunluğunun düşürülmesi ve kayma gerilmesinin yapıştırma uzunluğu boyunca homojen dağılımının sağlanması ile mümkündür. Ancak, yükleme durumunda, bağlantıyı ayırma yönünde etkiye sahip olan soyulma gerilmeleri ile kayma gerilmeleri beraber meydana gelir [130].

Gerilimin homojen dağılmaması, yüksek soyulma gerilimleri ve arayüzey gerilimleri bağlantıların erken hasar oluşumuna neden olur. Kompozit birleştirilmiş bağlantıların tasarımında birçok bağlama yöntemi ve parametre seçeneği vardır. Kompozit birleştirmelerin pratik uygulamaları için, kopma mekanizmalarının birleştirme yöntemlerine ve diğer birleştirme parametrelerine göre davranışlarının bilinmesi çok önemlidir. Hasar mekanizmasının ve davranışlarının anlaşılması aynı zamanda doğru ve güvenilir hasar tahmini için de gereklidir. Bu nedenle, birçok araştırmacı, kompozit birleşimli bağlantılar üzerinde yapılan önceki çalışmalarda çeşitli parametrelerin hasar davranışları üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışmalarda bağlanma parametreleri arasında yüzey koşulları (kirlenme, aşınma ve plazma işlemi), dolgu, bağlantı hattı kalınlığı, yüzey kat açısı, istifleme sırası, çevresel koşullar vb. yer almaktadır. Yapıştırılarak birleştirilen bağlantılar üzerinde kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar malzeme ve imalat süreci hakkında, yapıştırıcı ve yapıştırılan parçalardaki gerilim-gerinim dağılımları, tek ve çift bindirmeli bağlantı, kademeli bindirmeli bağlantı gibi tasarım konuları araştırılmıştır. Bunlar arasında tek bindirmeli yapıştırırmalı birleştirme, imalat açısından en kolay geometriye sahip olması nedeniyle en yaygın bağlantı olarak kullanılmaktadır. Yapışkanla yapıştırılmış kompozit tek bindirmeli bağlantı açık deniz, petrol ve gaz endüstrisinde uygulanmaktadır. Yüzer üretim platformlarının ve gemilerinin geliştirilmesi, üst kat kısım ağırlık sınırlamalarını karşılamak için yeni malzemeler dikkate alınırken aynı zamanda tek bindirmeli bağlantılar kullanılmıştır [131].

Yapışkanla yapıştırılmış bağlantılar, uygulamalarda mekanik bağlantılara alternatif olarak giderek artmakta ve geleneksel mekanik bağlantı elemanlarına göre birçok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlar arasında düşük yapısal ağırlık, düşük imalat maliyeti ve geliştirilmiş hasar toleransı bulunmaktadır. Geleneksel bağlantı elemanları genellikle liflerin kesilmesine ve dolayısıyla yapısal bütünlüğü azaltan gerilme konsantrasyonlarının ortaya çıkmasına neden olur [132].

Şekil 2.13'de gösterildiği gibi, bağlantı boyunca gerilme dağılımı, mekanik bağlantıya göre çok daha düzgündür ve bu da mekanik bağlantıya göre daha iyi yorulma ömrü sağlar. Yapıştırılmış bağlantılar ayrıca üstün titreşim ve sönümleme kabiliyeti sağlamaktadır.



Şekil 2. 13. Mekanik bağlantılar (a) yapıştırılmış bağlantılar (b) için yük dağılımı karşılaştırması [133].

Yapıştırma iki ayrı parçayı (yapıştırıcılar veya alt tabakalar) birleştirmek için polimerik bir malzemenin (yapıştırıcı) kullanıldığı yaygın olarak kullanılan bir birleştirme işlemidir.

Yapıştırıcı türlerinde bazıları güçlü ve esnek değilken diğerleri zayıf ve esnektir.

Yapısal yapıştırma için kullanılan yapıştırıcılar her zaman ya oda sıcaklığında ya da yüksek sıcaklıklarda kürlenir ve yükleri bağlantı boyunca aktarmak için yeterli güce sahip olmalıdır. Birçok yapısal yapıştırıcı türü vardır; bunlardan epoksiler, nitril fenolikler ve bismaleimidler en yaygın olanlarıdır.

Bunlar arasında epoksi yapıştırıcılar, çok çeşitli sıcaklık ve ortamlarda yüksek mukavemet ve uzun süreli dayanıklılık, mükemmel yapışma, kürlenme sırasında düşük veya hiç uçucu madde içermemesi ve iyi kimyasal direnç avantajları arasındadır.

Yapısal bir yapıştırıcı bağlantısında, bir bileşendeki yük yapıştırıcı katman aracılığıyla başka bir bileşene aktarılır. Yük aktarım verimliliği, bağlantı tasarımına, yapıştırıcı özelliklerine ve yapıştırıcı/alt tabaka arayüzüne bağlıdır. Yükleri yapıştırıcı üzerinden etkili bir şekilde aktarmak için, alt tabakalar (veya yapışkanlar) üst üste bindirilir [133].

2.9. Denizcilik Endüstrisinde Kompozit Malzemelerin Uygulanması

Denizcilik yapısal bileşenleri birçok çevresel zorluklara maruz kalmaktadır. Bu nedenle, yüksek direnç gösteren ve uzun süreler boyunca çok az bakım gerektiren malzemeler genel olarak dikkate alınmaktadır.

Kompozitler çelik, alüminyum ve ahşapta yaşanan korozyon sorunlarının üstesinden gelmek için tasarlanmış ve II. Dünya Savaşı'ndan sonra denizcilik endüstrisine dâhil edilmiştir.

Tuz ve aşındırıcı deniz suyu, özellikle deniz taşıtlarına ve yapılara zarar vermektedir. Bu durum termoset kompozitler kullanılarak azaltılmıştır.

Termoset reçinelerin matris malzemesi olarak kullanımı daha yüksek mukavemet-ağırlık oranı, daha iyi korozyon direnci, işletme maliyetlerini düşürmek ve iyileştirmek için daha hafif ağırlık, birden fazla parçayı tek bir parçada birleştirme imkânı, daha az bakım, daha az gürültülü bir çalışma ortamı ve karmaşık şekillerde kullanım için tasarım esnekliği ile ilişkilidir [134].

2.10. Askeri Uygulamalar İçin Yapılan Çalışmalar

Kompozitlerin denizcilik sektöründe benimsenmesi 1940'lar ile 1960'ların yılları arasında

- Kompozit malzeme devriye botları 1960'ların başında ABD Donanması için ilk uygulaması yapılmıştır.
- 1970lerin başında çelik, alüminyum veya sandviç kompozit kullanılarak devriye botlarının maliyet, ağırlık ve yapısal performansını karşılaştırılması yapılmıştır.
- Mayına karşı ölçüm gemileri (MCMV) 1973'de en büyük kompozit gemi inşaa edilmiştir.
- 1980 yıllarında polimotor motor yapılmıştır.
- 1981'de bir İsveç sahil güvenlik gemisi de köpüklü sandviçten inşa edilen en büyük gemi inşaa edilmiştir.
- 1990'ların başlarında kompozit direkler de kullanılmaya başlanmıştır.
- 1998'de kevlar fiber takviyeli kompozitten bir üstyapıya sahip hoverkraft yapılmıştır.
- 2000 yılının başlarında motor parçaları, ısı eşanjörleri, ekipman temelleri, valfler, pompalar, borular ve kanallar gibi dahili ekipman ve bağlantı parçalarında üretilmeye başlanmıştır [135].

2.11. Sivil Uygulamalar İçin Yapılan Çalışmalar

- Hovercraft gemileri, 1969'da PVC ve polyester köpük çekirdekli fiber takviyeli kompozit laminatlardan yapılmıştır.
- 1984 yılında GRP kaplamalı ve PVC köpük çekirdekli GFRP panelli sandviç yapılar kullanılarak inşa edilmiştir.
- 1984'te Japon GRP balıkçı tekneleri veyüksek alev geciktirici özelliklere sahip bir

cam elyaf/poliüretan kompozit cankurtaran botu geliştirmiştir.

- 1985 yılında Norveç'te takviyeli sandviçler kullanarak keşif gemisi üretilmiştir.
- 1995 yılında ABD Donanması, yeni nesil gemi direklerini geliştirmiştir.
- 1996 yılında elektromanyetik paraziti azaltmak için yeniden tasarlayarak üretilen bir sandviç yapı oluşturmuştur.
- 2000li yılların başında ambar kapağı tasarımı yapılmıştır. Yapı, tek cidarlı sertleştirilmiş yapı ve sandviç yapı olacak şekinde düşünölmüştür [135].
- 2020 yılında Singapur Kraliyet Donanması ve İsveç tersaneleri için yeni nesil devriye gemisi (NGPV) sınıfı olarak bilinen yeni nesil bir korvet devriyesi tasarlanmıştır.

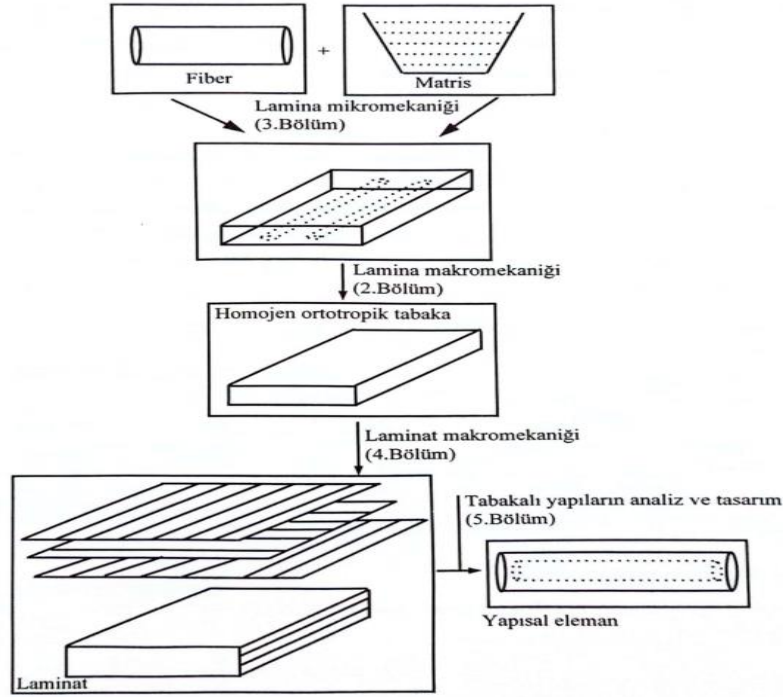
2.12. Kompozit Malzemelerin Mekaniği

2.12.1. Bir Laminanın Makromekanik Analizi

Bir kompozit malzeme iki veya daha fazla bileşen iğerdiği için analiz ve tasarımları metal gibi geleneksel malzemelerinkinden farklı yapılıdır [71].

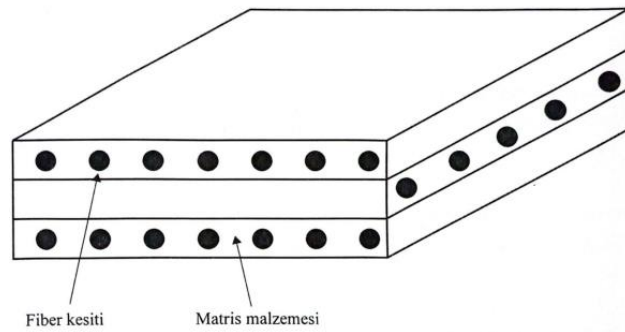
Kompozit yapıların mekanik davranışlarının analizine dair yaklaşımlar şu şekildedir.

- Bileşenlerin tek tek özelliklerinden faydalanılarak bir kompozit tabakanın ortalama özellikleri olan rijitlik, mukavemet, termal ve nem genleşme katsayıları bulunur.
- Tek yönlü/çift yönlü bir lamina için gerilme-şekil değiştirme bağlantıları çıkarılır. Yükler, lamina simetrisinin asal dorultusu boyunca veya dışında uygulanabilir. Laminanın hasar teorileri bu laminadaki gerilmeleri ve laminanın mukavemet özelliklerini dikkate alır.



Şekil 2. 14. Tabakalı kompozitlerin analiz şeması [71].

Lamina, kompozit malzemenin genelde 0.005 in. (0,125 mm) kalınlıklı ince bir tabakasıdır. Bir laminat laminaların lamina kalınlığı yönünden dizilmesiyle oluşur. Lamina, izotropik homojen malzemeye benzememektedir. Lamina izotropik homojen fiberler ve izotropik homojen bir matristen bile olsa laminanın rijitliği fiber, matris veya fiber matris arayüzeyinde seçilecek noktaya bağlı olarak değişmektedir. Bu farklılıkların dikkate alınması mekanik modellemeyi karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle laminaların makromekanik analizi ortalama özellikler ve homojen olduğu kabul edilerek yapılmaktadır [71].



Şekil 2. 15. Üç laminadan oluşmuş laminat [71].

Kompozit malzemelerden yapılmış bir yapı, genellikle değişik laminaların sıralamasından oluşan laminat bir yapıdır.

2.12.2. Anizotropik Malzemelerin Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkileri

Genelleştirilmiş Hooke yasası, anizotropik elastik katıların gerilme ve şekil değiştirme arasındaki geometrik ve fiziksel doğrusal ilişkidir. Genelleştirilmiş Hooke Yasası, belirli bir malzemede istenen bir gerilim kombinasyonunun neden olduğu deformasyonları tahmin etmek için kullanılabilir. Bir eleman bir yönde bir kuvvete maruz kalıyorsa (maruz kalma yönünde bir gerilme oluşturur), bu diğer yöndeki gerilmelerin sıfıra eşit olmadığını gösterir. Elastik bandın ayrılması gibi, malzemeyi herhangi bir düzlemde dışarı doğru çekilirken diğer düzlemler boşluğu doldurmak için içeriye doğru hareket ederek malzeme incelir. Böylelikle gerilme olmadan diğer yönlerde gerilme meydana gelir. Gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişki genelleştirilmiş Hooke Kanunu kullanılarak şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \\ i,j,k,l &= 1,2,3 \\ \varepsilon_{ij} &= S_{ijkl} \sigma_{kl}\end{aligned}\quad (2.1)$$

Burada , σ_{ij} gerilme ve ε_{kl} şekil değiştirme bileşenleri iken C_{ijkl} sertlik matrisi ve S_{ijkl} uyumluluk matrisidir. Bu durumda S_{ijkl} matrisi C_{ijkl} matrisinin tersidir.

Genel olarak malzemeyi temsil eden 81 elastik sabit varken Gerilme ve şekil değiştirme tensörlerindeki simetri nedeniyle elastik sabitlerin sayısı 36'ya düşmektedir.

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} , \quad S_{ij} = S_{ji} \quad (2.2)$$

Anizotropik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri kısaltılmış biçimde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}C_{12}C_{13}C_{14}C_{15}C_{16} \\ C_{21}C_{22}C_{23}C_{24}C_{25}C_{26} \\ C_{31}C_{32}C_{33}C_{34}C_{35}C_{36} \\ C_{41}C_{42}C_{43}C_{44}C_{45}C_{46} \\ C_{51}C_{52}C_{53}C_{54}C_{55}C_{56} \\ C_{61}C_{62}C_{63}C_{64}C_{65}C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \text{ veya } \sigma_i = C_{ij}\varepsilon_j \quad (2.3)$$

$i,j=1,\dots,6$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}S_{12}S_{13}S_{14}S_{15}S_{16} \\ S_{21}S_{22}S_{23}S_{24}S_{25}S_{26} \\ S_{31}S_{32}S_{33}S_{34}S_{35}S_{36} \\ S_{41}S_{42}S_{43}S_{44}S_{45}S_{46} \\ S_{51}S_{52}S_{53}S_{54}S_{55}S_{56} \\ S_{61}S_{62}S_{63}S_{64}S_{65}S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \text{ veya } \varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j \quad (2.4)$$

Bir gerilme bileşeni olan σ_i , sonsuz küçüklükte bir gerilme olan $d\varepsilon_i$ üretir. Elastik malzemeler için birim hacim başına şekil değiştirme enerjisi:

$$dW = \sigma_i d\varepsilon_i \quad (2.5)$$

Denklem (2.3)'teki gerilme-şekil değiştirme ilişkisiyle şekil değiştirme enerjisi elde edilmiştir.

$$dW = C_{ij}\varepsilon_j d\varepsilon_i \quad (2.6)$$

$$W = \frac{1}{2} C_{ij}\varepsilon_i \varepsilon_j \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'nin kısmi türevi alınarak,

$$\frac{d^2W}{d\varepsilon_i d\varepsilon_j} = C_{ij} \quad (2.8)$$

ve

$$\frac{d^2W}{d\varepsilon_j d\varepsilon_i} = C_{ji} \quad (2.9)$$

Türev sırası önemli olmadığı için,

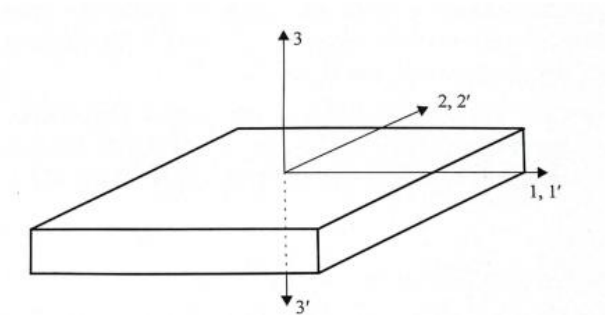
$$C_{ij} = C_{ji} \quad (2.10)$$

Denklem (2.4) simetri nedeniyle 21 bağımsız sabite sahiptir. Bu yüzden,

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (2.11)$$

2.12.3. Anizotropik Malzeme

Bir noktada yirmi bir bağımsız elastik sabite sahip olan malzemeye anizotropik malzeme denir. Eğer malzeme homojen değilse bu sabitler noktadan noktaya değişiklik gösterebilirler. Bunun yanı sıra malzeme homojen dahi kabul edilse 21 elastik sabit analitik veya deneysel olarak bulunmalıdır. Birçok doğal ve sentetik malzeme, malzeme simetrisine sahiptir ki bu da elastik özelliklerin simetrik doğrultularda benzer olduğunu gösterir. Bu simetri, 6x6'lık rijitlik[C] ve 6x6'lık esneklik [S] matrislerindeki sabitlerin bazılarını ya sıfırlayarak ya da birbiriyle ilişkilendirerek bağımsız elastik sabitlerin sayısını azaltır. Bu durum Hooke Kanunu bağıntılarını basitleştirir [71].



Şekil 2. 16. Bir monoklinik malzemede 1-2 simetri düzlemi için koordinat eksenlerinin dönüşümü [71].

2.12.4. Monoklinik Malzeme

Bir malzemenin simetri düzlemi varsa rijitlik matrisi indirgenebilir.

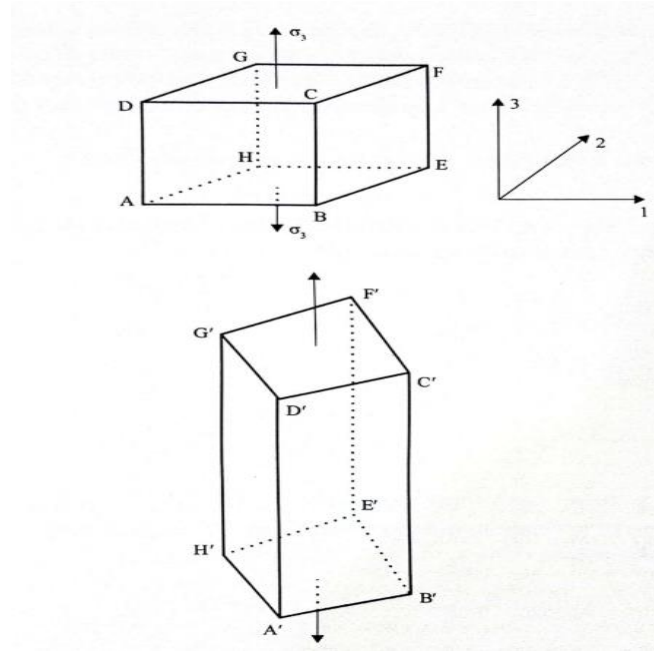
$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

$$C_{14}=0, C_{15}=0, C_{24}=0, C_{25}=0, C_{34}=0, C_{35}=0, C_{46}=0, C_{56}=0. \quad (2.13)$$

Simetri düzlemine dik olan doğrultuya, asal doğrultu denir. Bu tip malzemelerde 13 adet bağımsız elastik sabit mevcuttur.

Monoklinik malzemede esneklik matrisi indirgenirse

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{45} & S_{55} & 0 \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$



Şekil 2. 17. Monoklinik malzemedan yapılmış kübik elemanın deformasyonu [71].

Şekil 2.17’de monoklinik malzemedan çıkarılmış bir kübik elemanı ele alırsak, elemanda 3,1-2 simetri düzlemine dik doğrultuyu göstermektedir. Bu elemana σ_3 normal gerilme uygulanırsa Hook Kanunu denklem (2.4) ve monoklinik malzeme için esneklik matrisi denklem (2.14)’ü kullanarak,

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= S_{13}\sigma_3 \\ \varepsilon_2 &= S_{23}\sigma_3 \\ \varepsilon_3 &= S_{33}\sigma_3 \\ \gamma_{23} &= 0 \\ \gamma_{31} &= 0 \\ \gamma_{12} &= S_{36}\sigma_3\end{aligned}\quad (2.15)$$

elde edilir.

2.12.5. Ortotropik Malzeme

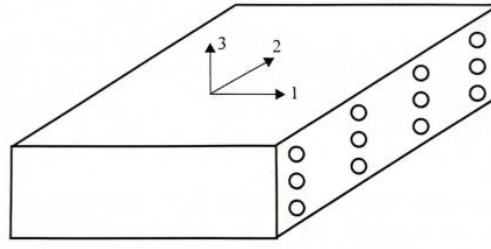
Bir malzeme, karşılıklı olarak birbirine dik üç malzeme simetri düzlemine sahipse rijitlik matrisi aşağıdaki gibidir.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Bu rijitlik matrisi monoklinik malzeme için yazılmış denklem (2.12)’deki rijitlik matrisi $[C]$ den başlanarak türetilebilir. İki den fazla simetri düzlemi olması sebebiyle

$$C_{16}=0, C_{26}=0, C_{36}=0, C_{45}=0$$

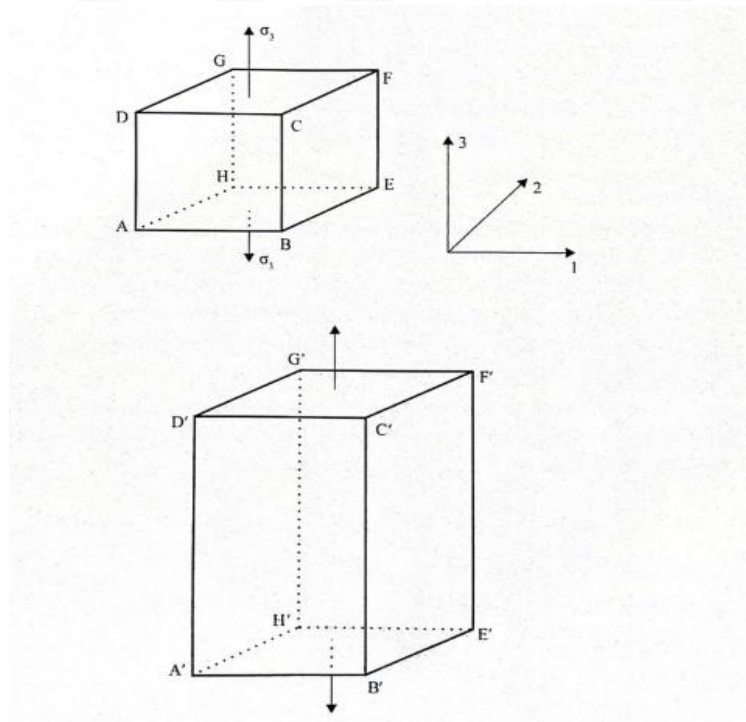
Malzeme simetrisinin karşılıklı üç dik düzlemi, aynı zamanda elastik simetrisinin karşılıklı üç dik düzlemini ifade eder. Dokuz bağımsız elastikten sabit mevcuttur.



Şekil 2. 18. Ortotropik bir malzemeye örnek olarak verilebilecek dikdörtgen dizimli fiberleri bulunan tek yönlü lamina [71].

Esneklik matrisi aşağıdaki forma indirgenir.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$



Şekil 2. 19. Ortotropik malzemeden yapılmış kübik elemanın deformasyonu [71].

Ortotropik bir malzeme için elastik simetrisinin anlamını gösterme, monoklinik bir malzeme için yapılan yaklaşıma benzer. Ortotropik malzemeden çıkarılan bir kübik eleman Şekil 2.19 dikkate alınarak düzenlenirse;

Burada 1,2 ve 3 asal yönlerdir veya 1-2,2-3 ve 3-1,simetrisinin olduğu karşılıklı üç ortogonal düzlemlerdir. Normal gerilme σ_3 ü,elemana uygulanır daha sonra Hook Kanunu denklemi (2.4) ve ortotropik malzeme için esneklik matrisini (2.17) kullanarak

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= S_{13}\sigma_3 \\ \varepsilon_2 &= S_{23}\sigma_3 \\ \varepsilon_3 &= S_{33}\sigma_3 \\ \gamma_{23} &= 0 \\ \gamma_{31} &= 0 \\ \gamma_{12} &= 0\end{aligned}\tag{2.18}$$

elde edilir.

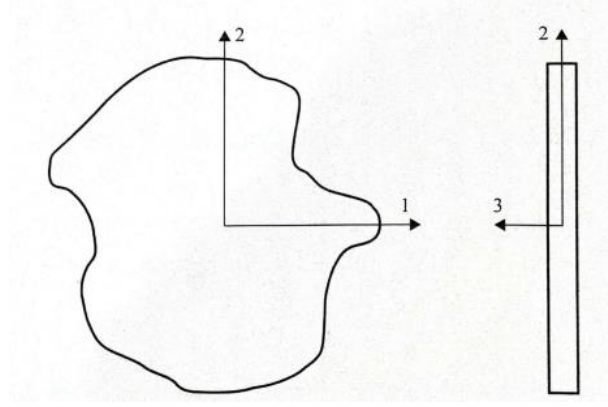
2.13. İki Boyutlu Tek Yönlü Lamina İçin Hooke Kanunu

2.13.1. Düzlem Gerilme Kabulü

İnce bir plaka, kalınlığı az olan bir prizmatik elemandır ve tipik bir lamina durumudur. Eğer bir plaka ince ise ve düzlem dışı yükleme yoksa bu plakanın düzlem gerilme altında olduğu kabul edilebilir. Eğer plakanın üst ve alt yüzeylerinde dış yükler yoksa

$$\sigma_3 = 0, \tau_{31} = 0 \text{ ve } \tau_{23} = 0 \text{ dır.}$$

Plaka ince olduğu için plakanın içinde oluşacak gerilmeler, alt ve üstünde oluşan gerilmelerden çok az farklıdır. Bu yüzden plaka içinde de bu değerler sıfır alınabilir. Eğer bir plaka ince ise ve düzlem dışı yükleme yoksa düzlem gerilme altında olduğu kabul edilir. Bu kabul, üç boyutlu gerilme-şekil değiştirme denklemlerini iki boyutlu gerilme – şekil değiştirme denklemlerine indirger.



Şekil 2. 20. İnce bir plaka için düzlem gerilme şartları [71].

2.13.2. Üç Boyutlu Hooke Kanunun İki Boyuta İndirgenmesi

Tek yönlü bir lamina, ortotropik malzeme kategorisine girer. Eğer lamina ince ise ve herhangi bir düzlem dışı yük taşııyorsa lamina için düzlem gerilme durumu varsayılabilir. Bu durumda, Denklem (2.4) ve Denklem (2.18)'i kullanarak ve

$\sigma_3 = 0, \tau_{31} = 0$ ve $\tau_{23} = 0$ varsayarak

$$\begin{aligned}\varepsilon_3 &= S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 \\ \gamma_{23} &= \gamma_{31} = 0\end{aligned}\tag{2.19}$$

Şekil değiştirme ε_3 , bağımsız bir şekil değiştirme değildir. Diğer iki birim şekil değiştirme olan ε_1 ve ε_2 nin bir fonksiyonudur. Bu nedenle normal şekil değiştirme ε_3 , gerilme-şekil değiştirme bağıntısından (2.17) çıkarılabilir.

Ayrıca kayma şekil değiştirmeler olan γ_{23} ve γ_{31} de sıfır oldukları için çıkarılabilir. Sonuçta, bir ortotropik düzlem gerilme problemi için Denklem (2.18) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix},\tag{2.20}$$

burada S_{ij} esneklik matrisi elemanlarıdır. Matristeki dört bağımsız esneklik elemanına dikkat edilmelidir.

2.14. Kompozit Malzemenin Mukavemet Değeri

Tek yönlü tabakaya sahip kompozitler için boyuna çekme $(\sigma_{1T})_{ult}$, boyuna basma $(\sigma_{1C})_{ult}$, enine çekme $(\sigma_{2T})_{ult}$, enine basma $(\sigma_{2C})_{ult}$ ve düzlem içi kayma (tabakalar arası kayma) $(\tau_{12})_{ult}$ olmak üzere beş nihai mukavemet parametresi vardır.

Buna göre;

$$(\sigma_1^T)_{ult} = (\sigma_f)_{ult} V_f + (\varepsilon_f)_{ult} E_m (1 - V_f) \quad (2.21)$$

$$(\sigma_1^C)_{ult} = \frac{E_1 (\varepsilon_2^T)_{ult}}{\nu_{12}} \quad (2.22)$$

$$(\sigma_2^T)_{ult} = E_2 (\varepsilon_2^T)_{ult} \quad (2.23)$$

$$(\sigma_2^C)_{ult} = E_2 (\varepsilon_2^C)_{ult} \quad (2.24)$$

$$(\tau_{12})_{ult} = G_{12} (\gamma_{12})_{ult} = G_{12} \left[\frac{d}{s} \frac{G_m}{G_f} + \left(1 - \frac{d}{s} \right) \right] (\gamma_{12})_{ult} \quad (2.25)$$

bulunur.

2.14.1. Termal ve Genleşme Katsayıları

Termal genleşme katsayısı, birim sıcaklık değişiminde birim uzunluk başına gelen değişiklidir.

$$\alpha_1 = \frac{1}{E_1} (\alpha_f E_f V_f + \alpha_m E_m V_m) \quad (2.26)$$

$$\alpha_2 = (1 + \nu_f) \alpha_f V_f + (1 + \nu_m) \alpha_m V_m - \alpha_1 \nu_{12} \quad (2.27)$$

α_f fiber için termal genleşme katsayısı ve α_m matris için termal genleşme katsayısını ifade etmektedir.

Polimer matrisli kompozitlerdeki reçineler su absorbe ettiğinde genişler. Bu durumda boyutlardaki değişim nem genleşme katsayısı ile ölçülür. Bu katsayı, cismin birim

ağırlığındaki nem içeriği ağırlığında görülen, birim değişim başına düşen, birim uzunluktaki doğrusal boyut değişimi olarak tanımlanır. İki nem genleşme katsayısı vardır: Bunlarda birisi boylamasına (1) doğrultuda, diğeri ise enine (2) doğrultudadır [71].

$\beta_1 = 1$ doğrultusundaki lineer nem genleşme katsayısı, m/m/kg/kg(in./in./lb/lb)

$\beta_2 = 2$ doğrultusundaki lineer nem genleşme katsayısı, m/m/kg/kg(in./in./lb/lb)

$$\beta_1 = \frac{E_m}{E_1} \frac{\rho_c}{\rho_m} \beta_m \quad (2.28)$$

$$\beta_2 = (1 + \nu_m) \frac{\rho_c}{\rho_m} \beta_m - \beta_1 \nu_{12} \quad (2.29)$$

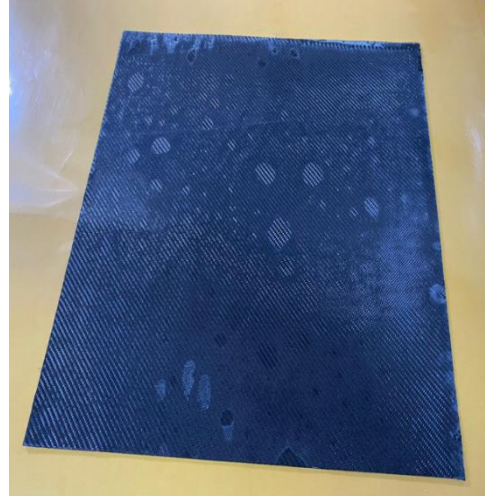
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kompozit Malzemelerin Üretimi

Kompozit numuneler yedi katmanlı 0/90 oryantasyona, 390 gr/m² yoğunluğa sahip twill cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozit plakaları ve sekiz katmanlı 0/90 oryantasyona, 245 gr/m² yoğunluğa sahip twill karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kompozit plakalar Fibermak Mühendislik firması tarafından imal edilmiştir. Reçine malzemesi olarak F-RES 21 epoksi ve F-Hard 22 sertleştirici kullanılmıştır.(Tablo 3.1 ve Tablo 3.2). Prepregler için Drump tipi prepreg üretim makinesi kullanılmış olup, fiber tipi karbon fiber 3k atkı elyafı ve fiber tipi 390 gr cam fiber atkı elyafı seçilmiştir. Daha sonra elle yatırma yöntemi ile üzerlerine epoksi ve sertleştirici karışımından oluşan reçine sistemi sürülen prepregler bir gün boyunca bekletilmiş ardından reçine jelleştikten sonra sıcak pres yöntemi ile kompozit malzeme imalatı gerçekleştirilmiştir. Ardından 120 °C’de 8-10 bar basınç altında 1 saatte kürlenmiştir (Tablo 3.3 ve Tablo 3.4). Üretim sonrası hem GFRP hem de CFRP kompozit plakaların boyutları 500 mm x 500 mm boyutlarında ve ölçülen kalınlığı 2 mm'dir (Şekil 3.1).



a)



b)

Şekil 3. 1. GFRP kompozit plakaların(a) ve CFRP kompozit plakaların üretimi(b)

Tablo 3. 1. F-RES 21 Reçine özellikleri

Viskozite (25 °C)	450-750 mPa.s
Yoğunluk (25 °C)	1,05 g/cm ³

Tablo 3. 2. F-Hard 22 Sertleştirici Özellikleri

Viskozite (25 °C)	35000-45000 mPa.s
Yoğunluk (25 °C)	1,1 g/cm ³

Tablo 3. 3. Karışım özellikleri

Karışım Oranı (Ağırlıkça)	RES 21 Reçine	100
	F-Hard 22 Sertleştirici	21
Karışım Viskozitesi (25 °C)	500-800 mPa.s	
Prepreg Kürleme	120 °C’de 60 dakika	

Tablo 3. 4. Kürleşme sonrası özellikler

Çekme Gerilimi (MPa)	80
Çekme Modülü (MPa)	3300
Eğilme Gerilimi (MPa)	125
Eğilme Modülü (MPa)	3200

Numuneler oryantasyonları 0/90 ve twill örgüye sahip 7 katlı GFRP ve 8 katlı CFRP kompozit plakalar Şekil 3.2 ’de gösterilen CNC Router kullanılarak kesilmiştir.



a)



b)

Şekil 3. 2. GFRP numunelerin kesimi (a) ve CFRP numunelerin kesimi (b)



Şekil 3. 3. GFRP ve CFRP kesilmiş numuneler

3.1.1 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Geleneksel metalik malzemelerle karşılaştırıldığında kompozitler büyük ölçüde geliştirilmiş performans ve esneklik sunar. Ancak bu faydalar artan malzemenin karmaşıklığını da beraberinde getirmektedir. Malzeme özelliklerinin temel karakterizasyonu, farklı yükleme koşulları (gerilme, basma, kesme ve eğilme) altında gerçekleştirilecek bir dizi deney gerektirmektedir. Kompozit malzemeler anizotropiktir (mekanik özelliklerin yöne bağlı olduğu) ve homojen değildir. Kompozit uygulamalarda, malzemenin ortama dayanıklılığını belirlemek için genellikle daha karmaşık testlere ihtiyaç duyulmaktadır. Kompozit malzemeleri test etmek için geliştirilen çok çeşitli uluslararası ve ulusal test standartları bulunmaktadır. Bunlar Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) tarafından kabul edilen standartlara dönüştürülerek kullanılmaktadır. GFRP ve CFRP kompozit plakaların tek bindirmeli yapıştırırmalı bağlantılarda kullanılan yapıştırıcının standart test prosedürüne dayanarak, belirli fiziksel ve mekanik özelliklerle ilgili bilgiler ürün veri sayfasından elde edilerek Tablo 1'de listelenen Loctite Hysol-9466 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır.

Tablo 3. 5. Loctite Hysol-9466 Yapıştırıcı Malzemenin Özellikleri

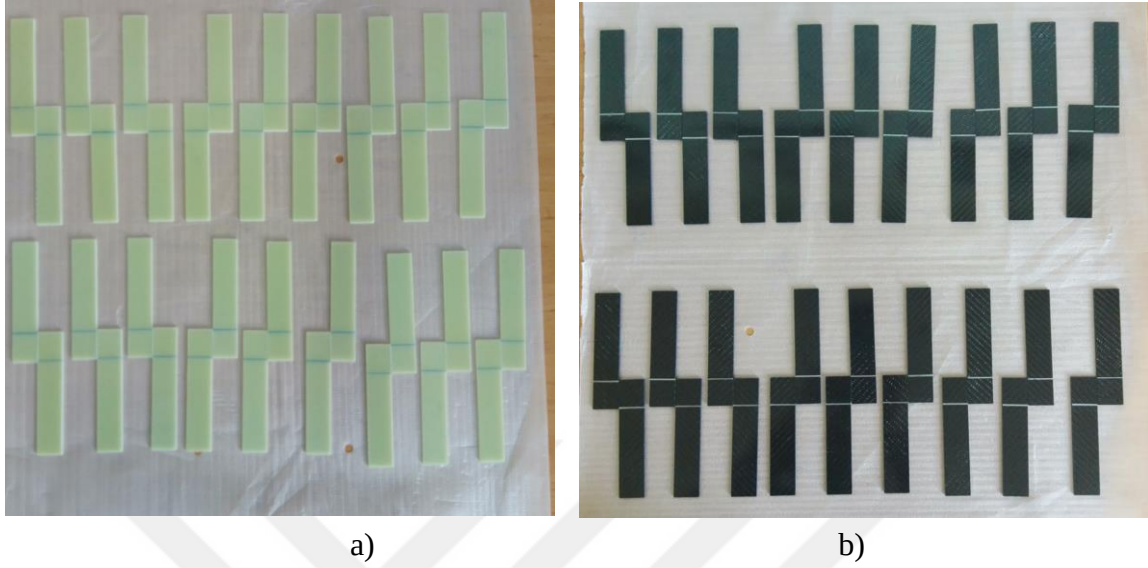
Soyulma Mukavemeti /Birim Genişlik (Çelik için) (N/mm ²)	8
Maks. Kesme Mukavemeti ISO 4587 (Çelik için) (N/mm ²)	37
Maks. Kesme Mukavemeti ISO 4587 (GFRP için) (N/mm ²)	5
Çekme Mukavemeti ISO 527-3 (MPa)	32
Çekme Modülü ISO 527-3 (GPa)	1.718
Uzama ISO 527-3 %	3
Shore Sertliği 868 (Durometre D)	60
Camsı Geçiş Sıcaklığı (T _g) ASTM E 1640 °C	62

3.2. Numunelerin Hazırlanması

0/90 oryantasyonunda yedi katmanlı dokuma 390 gr/m² twill GFRP kompozit plakalar ve sekiz katmanlı 245 gr/m² twill CFRP kompozit plakalar fiber takviyeli polimer (FRP) tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları için standart test yöntemine (ASTM D5868 - 01) göre gerekli boyutlarda kesilmiştir.

**Şekil 3. 4.** Test numunelerinin geometri modeli

GFRP ve CFRP numuneler yapıştırma bağlantısı öncesi her bir yapışma için parçanın ucu cetvelle 25 mm olacak şekilde işaretlenmiştir.



Şekil 3. 5. Numunelerin işaretlenmesi GFRP (a) ve CFRP (b)



Şekil 3. 6. Yapıştırma öncesi numunelerin hazırlanması

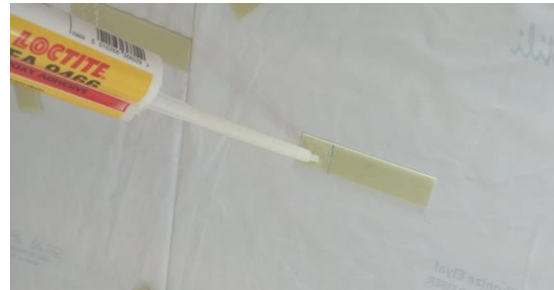
Numuneler yapıştırma tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Yapışan yüzeyler solvent ile temizlenmiştir. Yapıştırma işlemi için Alpan Hidrolik firması tarafından temin edilen çift kartuşlu manuel uygulama tabancası ve oda sıcaklığında kürlenene iki bileşenli bir epoksi yapıştırıcı olan Loctite Hysol-9466 kullanılmıştır. Kullanılan uygulama tabancasında

reçine ve sertleştirici 2:1 karışım oranındadır. Çift kartuşlu manuel uygulama tabancası ve Loctite Hysol-9466 Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 7. Çift kartuşlu manuel uygulama tabancası ve Loctite Hysol-9466

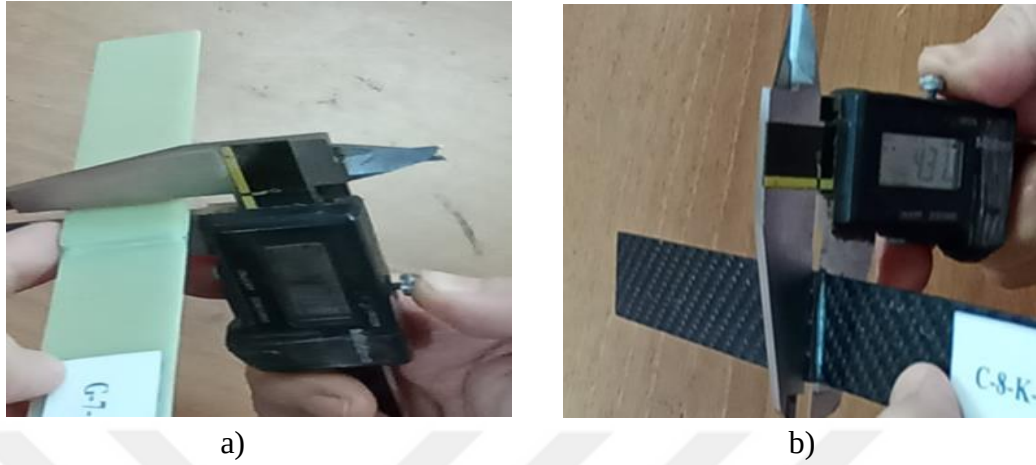
Literatürde yapılan çalışmalarda yapıştırıcının daha iyi bağlantı mukavemetini elde etmek için 0,1-0,3 mm kalınlık aralığının yeterli olduğu, 0,6 mm'nin üzerindeki daha kalın yapıştırıcının ise bağlantı mukavemetini azaltacağı bulunmuştur. Bunun nedeni, daha ince bir yapışkan tabakanın yapışkan direncini tam olarak kullanabilmesidir [136],[137]. Loctite Hysol-9466 yapıştırıcı, ilk yapıştırılan numunenin üst bölgesine uygulandı ve ardından diğer numune bunun üzerine yerleştirildi. Daha sonra, yapıştırıcı ile yapıştırılan numunelerin üst üste binen alanları birbirine bastırılmıştır. Yapışkan tabakanın optimum kalınlığı olan 0,2 mm seçilmiş ve numunelerin üstüne 0,1 MPa sabit bir basınç uygulanmıştır. Kuru ortam ve deniz suyu bekletilen (1,2 ve 3 ay) numunelerin herbiri için aynı yapıştırıcı ve aynı kalınlık kullanılmıştır. Şekil 3.8’de CFRP ve GFRP numunelere Loctite Hysol-9466 yapıştırıcının uygulanması görülmektedir.



Şekil 3. 8. Numunelere Loctite Hysol-9466 yapıştırıcının uygulanması

Daha sonra yapıştırıcı kalınlığının tüm yapıştırma alanına eşit olarak dağılmasını kontrol etmek için tüm numuneler tek tek dijital kumpas ile ölçülmüştür (Şekil 3.9). Loctite

Hysol-9466 kürlenen epoksi yapıştırıcı kullanılarak tek bindirmeli bağlantı elde edilmiştir.



Şekil 3. 9. Dijital kumpasla GFRP (a) ve CFRP (b) yapıştırma numunelerinin kalınlık kontrolü

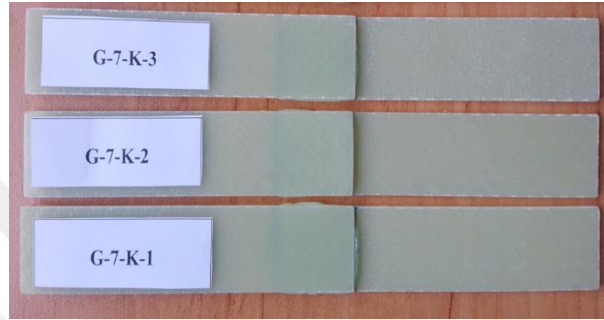
Bağlantıların tam mukavemet performansını kazanması için yapıştırıcı bilgi sayfasında belirtildiği gibi 7 gün bekletilerek tamamen k rlenmesi sağlandıktan sonra deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler öncelikle kuru ortam, sonra deniz suyu tuzluluk (dezilasyon) yüzdesi %3.3-3.7 ve deniz suyu sıcaklığı 23.5  C olan Ege Denizi'nden İzmir (Selçuk/Pamucak) alınan 1 aylık deniz suyu ortamı ardından 2 aylık deniz suyu ortamı son olarak 3 aylık deniz suyu ortamı için hazır hale getirilmiştir. Numunelerin her biri için kullanılan deniz suyu, desalinasyon işlemi yapılmadan aynı tuzluluk oranında ve aynı sabit sıcaklıkta bekletilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler hazırlanırken birbirine karışmaması için Tablo 3.6'da belirtilen şekilde kodlanmıştır. G-7-K-1 kodlanmış numunenin anlamı G cam elyaf takviyeli polimer (GFRP)'den üretilmiş 7 katlı ve K kuru ortamda testi yapılan 1 numaralı numune anlamını taşımaktadır. C-8-K-1 kodlanmış numunenin anlamı ise C karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP)'den üretilmiş 8 katlı ve K kuru ortamda testi yapılan 1 numaralı numune anlamını taşımaktadır.

Tablo 3. 6. CFRP ve GFRP numunelere kod oluşturulması

Fiber Türü	Katman Sayısı	Ortam	Numune No
C (CFRP)	8 (8 katlı)	Kuru (K)	1
G (GFRP)	7 (7 katlı)	1A (1 Aylık Deniz Suyu)	2
		2A (2 Aylık Deniz Suyu)	3
		3A (3 Aylık Deniz Suyu)	

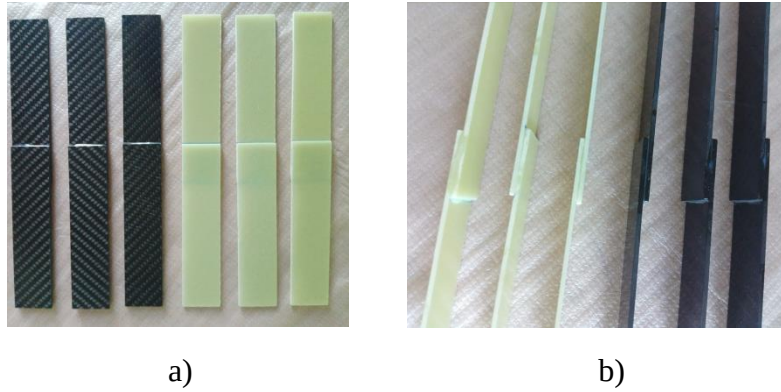


Şekil 3. 10. CFRP numunelerin kodlanmış örnekleri



Şekil 3. 11. GFRP numunelerin kodlanmış örnekleri

Şekil 3.12’de tek bindirmeli yapıştırma GFRP ve CFRP bağlantıları test numunelerinin üstten görünüşü ve yandan görünüşü görülmektedir.



Şekil 3. 12. GFRP ve CFRP numunelerin üst görünüş (a) ve yan görünüş (b) örnekleri

Numuneler deniz suyuna bırakılmadan önce tek bindirmeli yapıştırma bağlantı tasarımı oluşturulmuş ve daha sonra numuneler bir kabın içerisinde bekletilmek üzere hazırlanmışlardır. Hazırlanan numuneler kuru ortam ve 1, 2, 3 ay deniz suyunda bekleyecek şekilde 4 gruba ayrılmıştır. Şekil 3.12’de deniz suyunda bekletilen GFRP ve CFRP numuneler görülmektedir. Bu numuneler 1, 2 ve 3 ay deniz suyunda bekletme sürelerinin sonunda sudan çıkartılarak deniz suyu nem emme ağırlık oranı (%) kuru

numunelerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra eksenel darbe deneyi ve üç nokta eğilme deneyi yapılarak hasar görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 3. 13. GFRP ve CFRP numunelerinin deniz suyu bekletilmesi

3.2.1. Deniz Suyu Emilimi

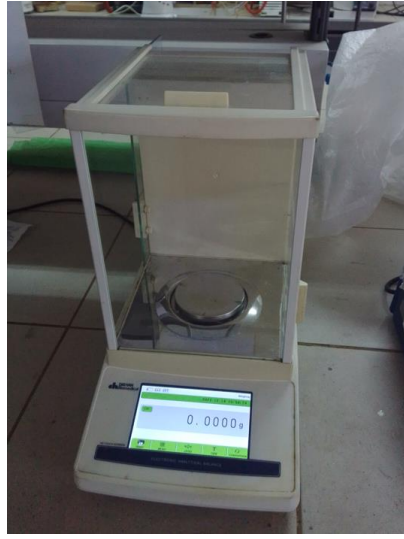
Tek bindirmeli yapıştırma bağlantı oluşturmuş GFRP ve CFRP numunelerde her gruptan üçer numune kullanılmıştır. Nem tutma oranı, her bir GFRP ve CFRP numune grubunun ağırlığı deniz suyu bekletilen 1 ay (30 gün), 2 ay (60 gün) ve 3 ay (90 gün) sonrası aralıklarla ölçülerek başlangıçtaki ağırlık ile karşılaştırılarak hesaplanmış ve elde edilen verilere göre grafikler çizilmiştir.

Ağırlık ölçümü için DEU Fen Fakültesi Kimya Bölümü Laboratuvarında bulunan Daihan Biomedical 0,1 mg hassasiyete sahip analitik terazisi kullanılmıştır (Şekil 3.14).

Ağırlık ölçümünden önce numunelerin yüzeyleri nem emici kâğıtla silinmiş ve dış ortamın deneysel sonuçlar üzerindeki etkisini önlemek için ağırlık ölçüm süreci 20 dakikayı aşmamıştır. Nem tutma oranları aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$M(\%) = (m_y - m_k) / (m_k) \times (100) \quad (3.1)$$

Burada; m_k : kuru haldeki ağırlığını, m_y : yaş haldeki ağırlığını; M : yüzde olarak nem tutma oranını göstermektedir [138].



Şekil 3. 14. Daihan Biomedical hassas terazi cihazı

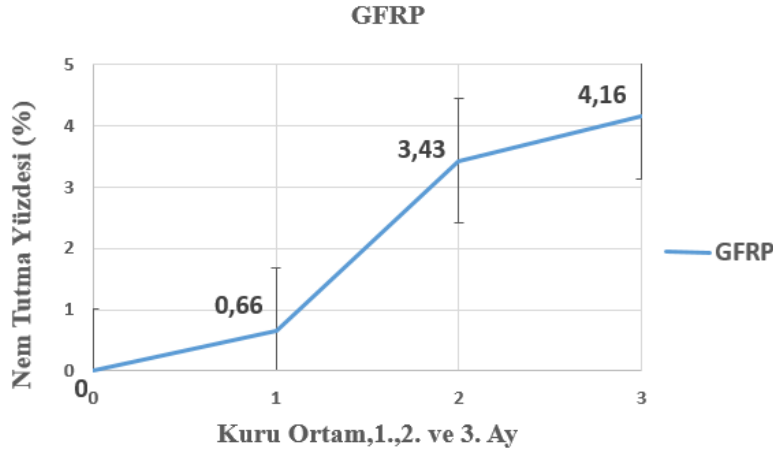
➤ **GFRP numunelerde deniz suyu nem tutma oranı**

Nem tutma oranları (%) deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletilen GFRP numunelerinin kuru ortama bırakılan numunelerle karşılaştırılarak oluşturulan deniz suyu emilimi ölçüm sonuçları Tablo 3.7’de verilmiştir. Deniz suyu sıcaklığı olan 23.5 °C olan ve deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletilen tüm GFRP numuneler kuru ortama bırakılan (G-K-1, G-K-2 ve G-K-3) numunelerle karşılaştırılmıştır.

Tablo 3. 7. Kuru ortam ve deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletilen GFRP numunelerinin nem tutma oranı (%)

Kodu	Ağırlık (g)	Kodu	Ağırlık (g)	Nem Tutma Oranı (%)	Ortalama	Standart Sapma
G-7-K-1	17,2334	G-7-1A-1	17,3477	0,66	17,3524	0,061
G-7-K-2	17,3039	G-7-1A-2	17,4158	0,64		
G-7-K-3	17,1751	G-7-1A-3	17,2937	0,69		
G-7-K-1	17,2334	G-7-2A-1	17,8505	3,06	17,8593	0,018
G-7-K-2	17,3039	G-7-2A-2	17,8799	3,32		
G-7-K-3	17,1751	G-7-2A-3	17,8475	3,91		
G-7-K-1	17,2429	G-7-3A-1	17,9620	4,17	17,9707	0,008
G-7-K-2	17,2407	G-7-3A-2	17,9732	4,24		
G-7-K-3	17,2905	G-7-3A-3	17,9770	4,08		

Nem tutma oranları (%) deniz suyunda 1 ay bekletilen (G-7-1A-1, G-7-1A-2 ve G-7-1A-3) numunelerin ortalaması 0.66'dır. Nem tutma oranları (%) deniz suyunda 2 ay bekletilen (G-7-2A-1, G-7-2A-2 ve G-7-2A-3) numunelerin ortalaması 3.43'dır. Son olarak nem tutma oranları (%) deniz suyunda 3 ay bekletilen (G-7-3A-1, G-7-3A-2 ve G-7-3A-3) numunelerin ortalaması 4.16 olarak hesaplanmış olup GFRP numunelerinin nem tutma oranı grafiği Şekil 3.15'de verilmiştir.



Şekil 3. 15. Kuru ortam, 1., 2.ve 3. ay GFRP numunelerinin nem tutma oranı

Şekil 3.15'deki grafik incelendiğinde deniz suyunda bekletme süresi arttıkça nem tutma yüzdesinde artışın olduğu gözlemlenmektedir. 2. aydaki artış en önemli artışı göstermiş belirli bir doygunluğa erişmesiyle artış hızı 3. ayda daha yavaş bir şekilde ilerlemiştir. Nem tutma oranı 3. ayda da artarak zirveye ulaşmıştır. Deniz suyu emilimi GFRP kompozitlere nüfuz ederek mekanik özelliklerde bozulmaya neden olmaktadır [139].

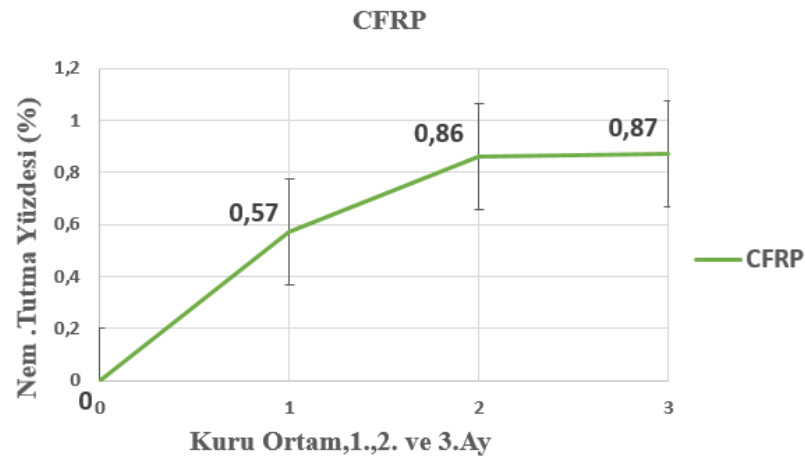
➤ CFRP numunelerde deniz suyu nem tutma oranı

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantı oluşturmuş CFRP numunelerde nem tutma oranları (%) deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletilen CFRP numunelerinin kuru ortamda bırakılan numunelerle karşılaştırılarak oluşturulan deniz suyu emilimi ölçüm sonuçları Tablo 3.8'de verilmiştir. Deniz suyu sıcaklığı olan 23.5 °C olan ve deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletilen tüm CFRP numuneler kuru ortama bırakılan (C-8-K-1, C-8-K-2 ve C-8-K-3) numunelerle karşılaştırılmıştır. Nem tutma oranları (%) deniz suyu sıcaklığı olan 23.5°C

olan deniz suyunda 1 ay bekletilen (C-8-1A-1, C-8-1A-2, C-8-1A-3) numunelerin ortalaması 0.57'dir. Nem tutma oranları (%) deniz suyunda 2 ay bekletilen (C-8-2A-1, C-8-2A-2, C-8-2A-3) numunelerin ortalaması 0.86'dır. Son olarak nem tutma oranları (%) deniz suyunda 3 ay bekletilen (C-8-3A-1, C-8-3A-2, C-8-3A-3) numunelerin ortalaması 0.87 olarak hesaplanmış olup CFRP numunelerinin nem tutma oranı grafiği Şekil 3.16'da verilmiştir.

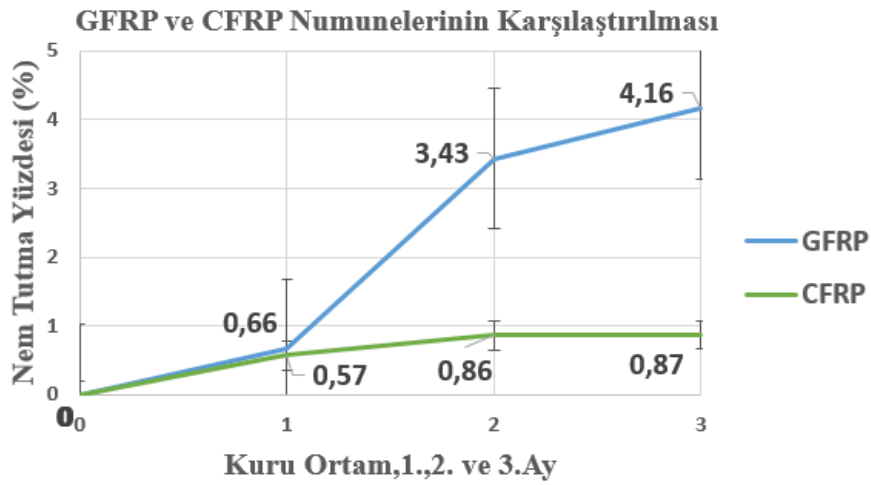
Tablo 3. 8. Kuru Ortam ve Deniz Suyunda 1, 2 ve 3 Ay Bekletilen CFRP Numunelerinin Nem Tutma Oranı (%)

Kodu	Ağırlık (g)	Kodu	Ağırlık (g)	Nem Tutma Oranı (%)	Ortalama	Standart Sapma
C-8-K-1	14,8328	C-8-1A-1	14,9188	0,57	14,881	0,086
C-8-K-2	14,6962	C-8-1A-2	14,7829	0,59		
C-8-K-3	14,8605	C-8-1A-3	14,9423	0,55		
C-8-K-1	14,8328	C-8-2A-1	14,9648	0,89	14,924	0,089
C-8-K-2	14,6962	C-8-2A-2	14,8227	0,86		
C-8-K-3	14,8605	C-8-2A-3	14,9868	0,85		
C-8-K-1	14,8383	C-8-3A-1	14,8710	0,88	14,5860	0,248
C-8-K-2	14,4351	C-8-3A-2	14,4631	0,86		
C-8-K-3	14,3956	C-8-3A-3	14,4240	0,87		



Şekil 3. 16. Kuru ortam, 1., 2.ve 3. ay CFRP numunelerinin nem tutma oranı

Şekil 3.16'da nem tutma oranı CFRP numunelerinde deniz suyu tutma süresi arttıkça nem tutma yüzdesinde de bir artış olduğu görülmektedir. En önemli artış 2. ayda meydana gelmiş ve belirli bir doygunluğa ulaşmıştır. Üçüncü aydan itibaren artış daha yavaş ilerlemiştir. 2. ayda 1. aya göre belirli bir artış göstermektedir. 3. ayda da artarak zirveye ulaşmasına rağmen 2. aydaki artıştan küçük farklılık olacak şekilde ilerlemiştir. Daha sonra GFRP ve CFRP kompozit numunelerdeki deniz suyu nem tutma oranının karşılaştırılması Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3. 17. Kuru ortam, 1., 2.ve 3. ay GFRP ve CFRP numunelerin nem tutma oranının karşılaştırılması

Çevresel nem, difüzyon yoluyla malzemelere nüfuz edebilir. Nem, PMC'ler için plastikleştirici olarak çalışır, yani sertlik, mukavemet ve cam geçiş sıcaklığı gibi özellikler, bir polimere nem girmesiyle azalır. PMC'lerde nem emilimi polimer yapısını açar ve cam geçiş sıcaklığını düşürmektedir. Nem, polimerik matris için bir plastikleştirici görevi görür.

Nem etkilerindeki farklılıklar laminatın performansını tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır. Laminat doygunluğunu tahmin etmek için nem difüzyon analizinde mevcut en yeni teknolojiyi kullanmak en büyük zorluktur. Nemin bir polimer kompozit laminat içine emilmesinin, Fickian difüzyonunu takip ettiği düşünülmektedir. Nem emilimi Fick yasasına göre nem alımına bağlı ağırlık artışı, maruz kalma süresinin karekökü olarak değişir [5].

Fick'in difüzyon yasasına göre, FRP malzemesi başlangıç periyodunda hızlı bir şekilde nem alır ve denge veya doyma noktasına ulaşır. Difüzyon hızı üç unsur arasındaki ilişkiyi yüzey alanı ve konsantrasyon farkıyla doğru orantılı, arayüz kalınlığıyla ters orantılıdır şeklinde açıklamaktadır. Fick yasalarına uyan bir difüzyon sürecine normal veya Fickian difüzyon aksi takdirde, anormal difüzyon veya Fickian olmayan difüzyon denir.

PMC'lerde nem difüzyonu hem Fickian hem de Fickian olmayan bir şekilde yapılır. Kompozitlerin boşluk içeriğinin bir sonucu olarak, polimerler doyma noktasından sonra yavaş bir şekilde nem alır. Malzemede kusurlar veya boşluklar olduğunda, nem emilimi Fick'in difüzyon yasasından farklı bir şekilde gerçekleşir. Bu emilim davranışı Fick olmayan difüzyon olarak bilinir. Çok yüksek akış hızları, yoğun kimyasal reaksiyonlar veya çok yüksek konsantrasyon gradyanların olduğu durumlar örnek verilebilir. Ayrıca PMC'lerdeki viskoelastik yapı ve ortaya çıkan çatlaklar, Fickian olmayan difüzyon tipini göstermektedir [80].

PMC'lerde suyun difüzyonu, hacim oranı, reçine sisteminin yapısı, sıcaklık, katkı maddeleri, nem, lifin yönelimleri, lif yüzey kaplaması, boyutlandırma ve boşluk hacmi gibi birçok faktör tarafından etkilenir.

Kompozitlerin nem emilimi, esas olarak matris reçinesine bağlıdır çünkü lifler çok az nem emer. Karbon, cama göre neme karşı daha dayanıklıdır.

Kompozitlere su girmesi, aşağıdaki faktörlerden kaynaklanabilir:

- Matris fazının şişmesi ve arayüzlerde artık gerilmeler,
- Matris ve takviye arasındaki yapışma bağının dış substrat tarafından zayıflaması veya kırılması,
- Mikro çatlakların oluşması
- Polimer kompozit sistemlerde suyun difüzyonunu kontrol eden ana mekanizmalar [8].

1855 yılında Alman bilimci Adolf Fick, difüzyon olaylarını açıklayan temel ilkeleri geliştirdi. Bu kurallar, bir ortamda moleküllerin veya atomların nasıl dağıldığını ve hareket ettiğini açıklamaktadır. Fick difüzyon yasaları, difüzyonu belirler ve difüzyon katsayısını (D) çözer [67].

Difüzyon, bir maddenin, yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru hareket eder ve bu hareket, konsantrasyon farkıyla doğru orantılıdır. Yani,

bir madde için difüzyon akışının (J) konsantrasyon gradyanı ile orantılı olduğunu belirtir. Bu Fick'in birinci difüzyon yasası olarakta bilinir. Fick'in bu birinci yasası, konsantrasyonun sabit olduğu kararlı durum sistemleri için geçerlidir.

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.2)$$

J : difüzyon akış miktarı, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

D : difüzyon katsayısı, m^2/s

C : konsantrasyon, mol/m^3

x : konum, m

Ancak, farklı difüzyon koşullarında konsantrasyon zamanla değişir. Bu durumlarda, difüzyon kinetiğini belirleyen Fick'in ikinci yasası uygulanır. Bir boyutta kısmi bir diferansiyel denklem olan eşitlik:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

C : konsantrasyon, mol/m^3

t : zaman, s

D : difüzyon katsayısı, m^2/s

x : konum, m

olarak gösterilir [67].

Fick'in birinci yasasında belirli durumlarda ortamda difüzyon katsayısının değişmesi veya konsantrasyonun gradyanının değişmesi olmaktadır. Fick'in ikinci yasasında da zaman içinde difüzyon katsayısının değiştiği veya ortamın farklı olduğu durumlarda değişiklikler gerekebilir.

Bu durumda Fick'in modifiye edilmiş hali yani birinci ve ikinci yasalarına kimyasal reaksiyonların difüzyon sürecine (Reaksiyon-Difüzyon) ve bir akış hareketinin (Konveksiyon-Difüzyon) dahil olduğu durumlar, dikkate alınmaktadır. Sonuç olarak; Fick Kanunu'nun formülasyonları gerçek difüzyon davranışını daha iyi göstermek için değiştirilebilir veya genişletilebilir.

Şekil 3.17'de GFRP ve CFRP kompozit numunelerdeki zamana bağlı kütle değişiminin karşılaştırmasını göstermektedir. Burada, GFRP kompozit numunelerin CFRP

numunelere göre daha yüksek nem tutma yüzdesine sahip olduğunu göstermektedir. Kompozit malzemelerde bilindiği gibi, deniz suyu moleküllerinin GFRP'de CFRP'den daha fazla çözünür, bu da yapıştırılmış kompozit bağlantının hasar modlarının ve yaşlanma davranışının buna bağlı olduğu anlamına gelir [143].

Burada Fickian teorisi kullanılırsa, kompozit yapıların nem difüzyon mekanizmasındaki rolü daha iyi anlaşılmaktadır. Şekil 3.17'de GFRP ve CFRP kompozit numunelerdeki zamana bağlı kütle değişiminin karşılaştırmasını göstermektedir. Burada, GFRP numunelerinde su emme oranı artarken, CFRP numunelerinde su emme oranı azalmıştır. Bu durum farklı kompozit malzemelerin kullanılmasına bağlanabilir. Ancak 3 aylık yaşlandırma süresinin sonuna doğru kütle değişimi GFRP bağlantılarda artmaya, CFRP bağlantılarda ise azalmaya başlamıştır. Fick'in birinci yasasında, belirli durumlarda difüzyon katsayısında veya konsantrasyon gradyanında bir değişiklik olur.

Fick'in birinci yasasında, belirli durumlarda difüzyon katsayısında veya konsantrasyon gradyanında bir değişiklik olur. Fakat Fick'in ikinci difüzyon yasası, kompozitlerin nem emilimini açıklar [67].

Fick'in ikinci yasasına göre, difüzyon katsayısının zaman içinde veya farklı ortamlarda değiştiği durumlarda, burada kompozit yapıların nem difüzyon mekanizması üzerindeki rolünün daha iyi anlaşılmasını sağlayan Fick'in ikinci difüzyon yasası bu olguyu açıklar. Kompozit malzemeler için varsayılan nem alımı, D , denklem 1.32'de ve kompozit malzemelerin suya daldırılmasından kaynaklanan teorik kütle değişimi, M , denklem 1.33'de gösterilmiştir. Burada, M_1 ve M_2 sırasıyla t_1 ve t_2 zamanlarında kompozit malzemenin nem içerikleridir, h kompozit kalınlığı, L kompozit uzunluğu, w kompozit genişliği, t zaman ve M_∞ kütledeki maksimum değişimdir [140].

$$D = \pi \left(\frac{h}{4M_\infty} \right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \left(1 + \frac{h}{L} + \frac{h}{w} \right)^{-2} \quad (3.4)$$

$$M = \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\pi^2 \frac{D_t}{h^2} \right) \right] M_\infty \quad (3.5)$$

Şekil 3.17'de grafik genel olarak grafik, nem alımı ile kütle artışının maksimum değişime (M_∞) kadar olacağını ve bundan sonra kütle değişiminin gerçekleşeceğini öngörmektedir. Başka bir deyişle deniz suyundaki bu durum şu şekilde açıklanabilir. Kompozit

malzemenin yüzeyinde çeşitli tuz bileşenleri biriktikçe, nem alımı yavaşlar. Bu yasa, karekökünün nem emilim kütlelerini zaman içinde doğrusal olarak artırdığını ve ardından doygunluğa ulaşılan kadar kademeli olarak yavaşladığını belirtir [19].

Hem GFRP hem de CFRP aynı kalınlığa sahiptir. Her iki kompozit için nem içeriği eğrileri, deniz suyuna 1 ay (30 gün) daldırıldıktan sonra hızla artmıştır. Bununla birlikte, GFRP ve CFRP bağlantı numuneleri için kütle değişim eğrileri 2 ayda (60 gün) aynı artış profilini gösterirken, GFRP numuneleri için kütle kazancı daha yüksektir. 3 ayın sonunda (90 gün), GFRP numuneleri zaman içinde artan bir eğilim göstermeye devam ederken, CFRP numuneleri aşağı doğru azalan bir davranış göstermiştir. GFRP kompozitler su ile kimyasal olarak reaksiyona girerken, CFRP kompozitlerin daha az nem emdiği ve suyun korozif etkilerine karşı daha dirençli olduğu bilinmektedir [79]. Bunun bir başka nedeni de GFRP ara fazının CFRP ara fazına göre daha fazla nem emmesinin bir sonucu olarak düşünülebilir. Burada hem GFRP hem de CFRP numuneleri analiz edildiğinde, Şekil 3.17'deki zamana bağlı kütle değişim eğrisinde nem emilimi yalnızca difüzyonun ilk aşamalarında Fickian davranış göstermiştir.

Doygunluk seviyesine ulaşmadan önce, nem emilimine bağlı kütle artışı orantılı olarak artmıştır. Hem GFRP hem de CFRP yapılandırılan numunelerin hiçbirisi 3 ay (90 gün) sonra bile sabit bir doygunluk seviyesine ulaşmamıştır. Bu farklı bağlantıların her ikisinin de Fickian olmayan bir nem alımı grafiği gösterdiği tespit edilmiştir.

Bununla birlikte, CFRP bağlantıya kıyasla GFRP bağlantıdaki kütle artışı devam etmiştir. Matrisin şişmesi ve plastikleşmesi, daha fazla nem difüzyonuna izin vererek artmıştır. Ancak, buradaki daldırma sıcaklığı sabit oda sıcaklığı olduğundan, difüzyon katsayısı (D) hesaplanamaz. Sonuç olarak, oda sıcaklığındaki difüzyon katsayısı da geçirgenlik indeksi olarak kullanılabilir [25].

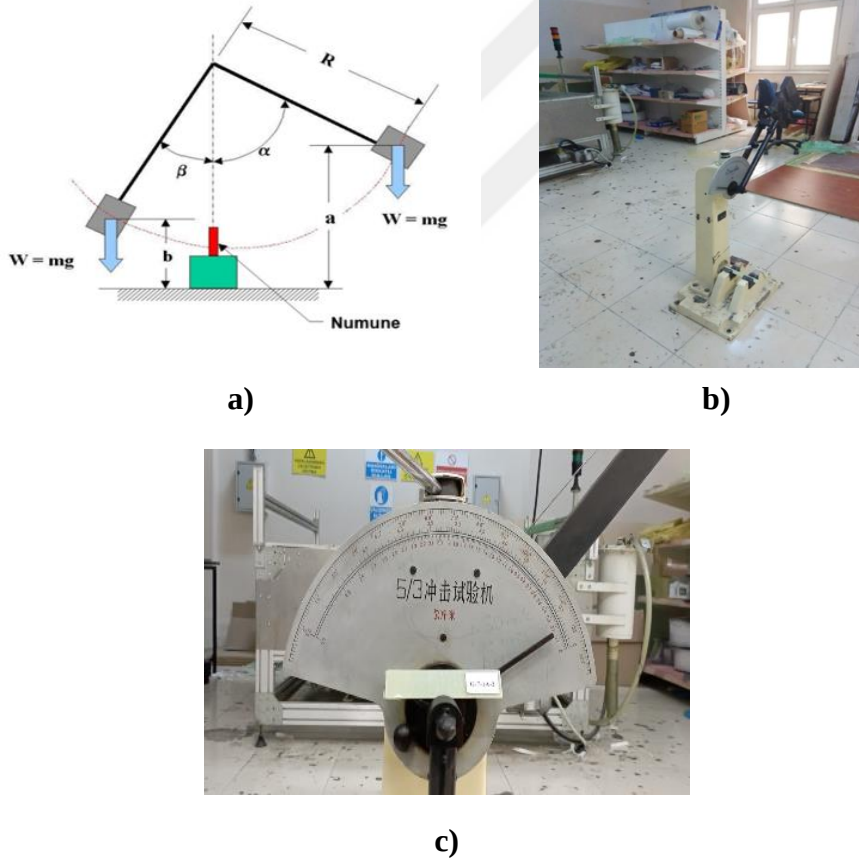
3.3. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

3.3.1. Eksenel Darbe Deneyi

Darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılmaktadırlar. Yapılan araştırmalar sınıflandırma arasındaki geçiş için net bir sonuç elde edilememiştir. Çalışmalar düşük hızlı darbeyi, statikmiş gibi düşünmekte hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Kompozit malzemelerde darbe tepkisi, darbe oluşumunu ve malzeme özelliklerinin darbe tepkisi üzerindeki etkisini anlamak açısından önemlidir. Eksenel darbe deneyi, malzemenin mukavemetini ve darbe dayanıklılığını belirlemek için yapılmaktadır. Eksenel darbe deney cihazı ile belirlenen hızda deney parçasının kırılmasında absorbe edilen enerji miktarı ölçülür [142].

Burada GFRP ve CFRP tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları eksenel darbe deneyi Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Araştırma ve Test Laboratuvarında bulunan boyu 48 cm ve açısı 45^0 olan sarkaç çubuğunu önceden belirlenen ilk konumundan serbest bırakılan 30 Jolue enerji seviyesinde eksenel darbeler uygulamak için Şekil 3.18 a'da şematik görünüm, Şekil 3.18 b'de numunenin takılı olduğu darbe test cihazı ve Şekil 3.18 c'de darbeye maruz kalan numune görülmektedir.



Şekil 3. 18. Eksenel darbeler a) Şematik görünüm [143] b) Numunenin takılı olduğu darbe test cihazı c) Darbeye maruz kalan numune.

Şekil 3.18 a’da düzeneğe numune yerleştirilir. Daha sonra çekiç belirli bir yüksekliğe (a) kaldırılır, yani potansiyel enerji verilir. Çekiç daha sonra mevcut konumundan serbest bırakılır. Çekicinin (a)’daki toplam enerjisinin bir kısmı numune tarafından emilirken, geri kalanı tekrar belirli bir miktarda (b) yükselmek koşuluyla potansiyel enerjiye dönüşür.

Birleştirmeler yapıldıktan ve yapıştırıcı tamamen kürlendikten sonra, birleştirme performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için numunelere eksenel darbeler uygulanmıştır. Numuneleri darbeye yerleştirmek için ve eksenel darbe enerjisini arayüzey bağlanma bölgesine iletmek için numuneler Şekil 3.18 b’de gösterildiği gibi cihaza yerleştirilmiştir. Bu, eksenel darbe testleri 30 (J) enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir.

Çekicinin ilk konumdaki potansiyel enerjisi ile son konumdaki potansiyel enerjisi arasındaki fark, numunenin kırılma enerjisini verecektir. Bu enerji miktarı, malzemenin kırılma direncini ifade eder ve genellikle Joule (J) cinsinden ifade edilir [144].

Kırılma enerjisi;

$$W(a - b) = mgR(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (3.6)$$

α : çekiç serbest bırakma açısı (°)

β : çarpma sonrası yükselme açısı (°)

R : sarkaç kolu (m)

m : çekicinin kütlesi (kg)

g : yerçekimi ivmesi (m / s²)

W_a : çekicinin serbest bırakılmadan önceki potansiyel enerjisi (m)

W_b : Numune kırıldıktan sonra belirli bir yüksekliğe kadar yükselen çekicinin potansiyel enerjisi (m).

Aradaki farktan hesaplanan bu kırılma enerjisi değeri Şekil 3.18 c’nin üst kısmında yer alan skaladan okunabilmektedir. Tek bindirmeli bağlantılara sahip GFRP ve CFRP için 12’şer adet olmak üzere toplam 24 numune hazırlanmıştır. İlk olarak, her bir GFRP ve CFRP için 3’er numune kuru ortamda bırakılmıştır. Daha sonra, her malzemeden üç numune 1 ay, 2 ay ve 3 ay boyunca deniz suyunda bekletilmiştir.

- **GFRP NUMUNELERİ**

Eksenel darbe testine maruz kalan GFRP kuru numuneler Şekil 3.19’da, 1 ay deniz suyunda bekletilen numuneler Şekil 3.20’da, 2 ay deniz suyunda bekletilen numuneler Şekil 3.21’de, 3 ay deniz suyunda bekletilen numuneler Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 19. Eksenel darbeye maruz kalan kuru ortam GFRP numuneleri



Şekil 3. 20. Eksenel darbeye maruz kalan 1 ay deniz suyunda bekletilen GFRP numuneleri



Şekil 3. 21. Eksenel darbeye maruz kalan 2 ay deniz suyunda bekletilen GFRP numuneleri



Şekil 3. 22. Eksenel darbeye maruz kalan 3 ay deniz suyunda bekletilen GFRP numuneleri

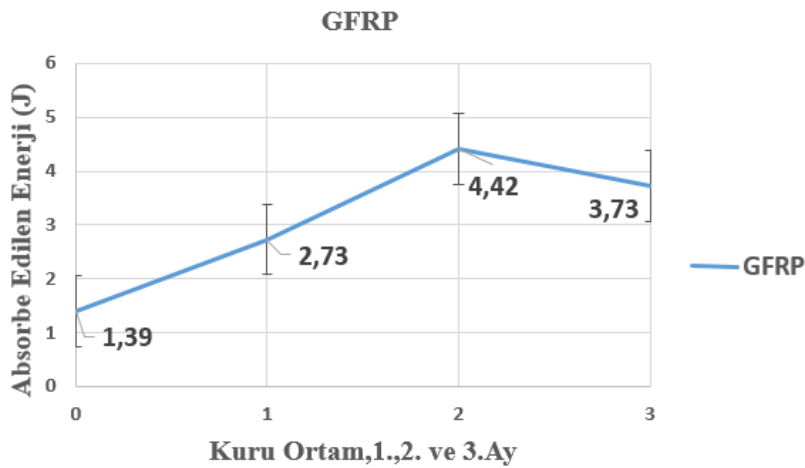
30 J darbe etkisiyle elde edilen verilerden GFRP numunelerinin absorbe edilen enerji miktarı ölçümleri Tablo 3.9’da verilmiştir. Eksenel darbe testine maruz kalan GFRP kuru ortam numunelerinin (G-7-K-1, G-7-K-2 ve G-7-K-3) ortalaması 1.39J’dur.

Deniz suyunda 1 ay bekletilen numunelerin (G-7-1A-1, G-7-1A-2 ve G-7-1A-3) ortalaması 2.73J’dur. Deniz suyunda 2 ay bekletilen numunelerin (G-7-2A-1, G-7-2A-2 ve G-7-2A-3) ortalaması 4.42J’dur. Deniz suyunda 3 ay bekletilen numunelerin (G-7-3A-

1, G-7-3A-2 ve G-7-3A-3) ortalaması 3.73J olarak hesaplanmış olup absorbe edilen enerji miktarı ölçümlerinin grafiği Şekil 3.23’de verilmiştir.

Tablo 3. 9. GFRP numunelerinin eksenel darbe deneyi ölçümleri

NUMUNELER	ÖLÇÜMLER	ORTALAMALAR	STANDART SAPMALAR
G-7-K-1	1.7468 J	1.3870	0,315
G-7-K-2	1.1582 J		
G-7-K-3	1.2563 J		
G-7-1A-1	2.5696 J	2.7331	0,150
G-7-1A-2	2.7658 J		
G-7-1A-3	2.8639 J		
G-7-2A-1	4.1202 J	4.4145	0,260
G-7-2A-2	4.5126 J		
G-7-2A-3	4.6107 J		
G-7-3A-1	3.5316 J	3.7278	0,196
G-7-3A-2	3.9240 J		
G-7-3A-3	3.7278 J		

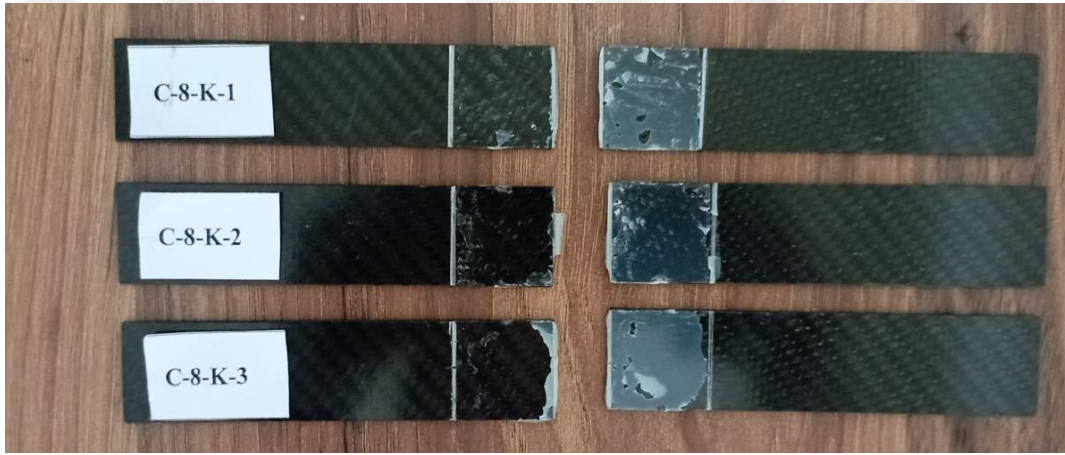


Şekil 3. 23. Kuru ortam, 1., 2. ve 3. ay deniz suyunda bekletilen GFRP numunelerinin absorbe edilen enerji miktarı grafiği

Şekil 3.23’de eksenel darbe deneyi GFRP kuru ortam ve deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletilen durumlar için 3 tane numune kullanılmış ve ortalama değerler alınarak hesaplanmıştır. Şekil 3.23’de görüldüğü gibi GFRP kompozit numunelerinin 2. aydaki absorbe edilen enerji miktarı artışı 4.42J’de en yüksek olmuştur. 3. ayda artış miktarı azalarak bu durum 3.73J olarak hesaplanmıştır.

- **CFRP NUMUNELERİ**

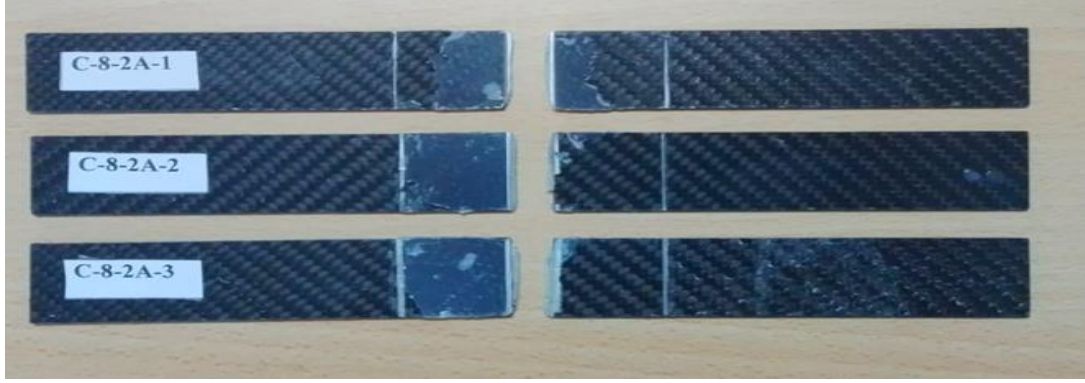
Eksenel darbe testine maruz kalan CFRP kuru numuneler Şekil 3.24’de, 1 ay deniz suyunda bekletilen numuneler Şekil 3.25’de, 2 ay deniz suyunda bekletilen numuneler Şekil 3.26’da, 3 ay deniz suyunda bekletilen numuneler Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



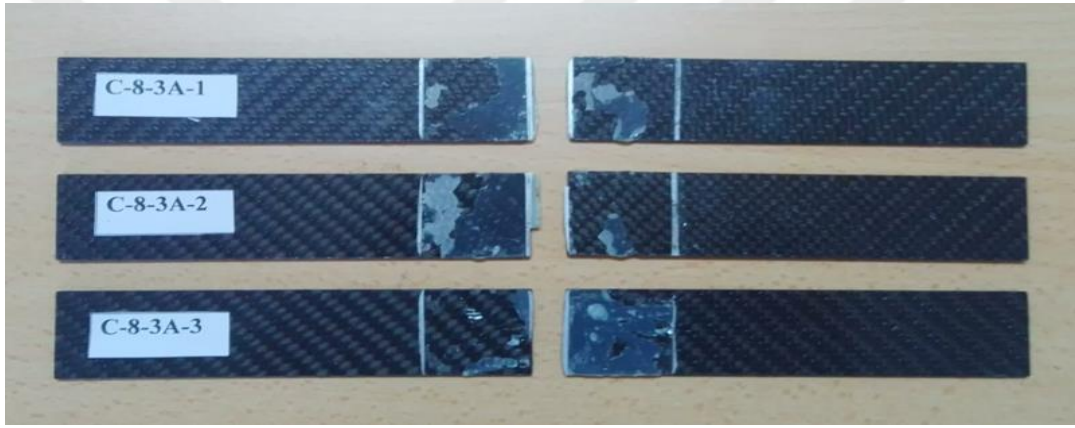
Şekil 3. 24. Eksenel darbeye maruz kalan kuru ortam CFRP numuneler



Şekil 3. 25. Eksenel darbeye maruz kalan 1 ay deniz suyunda bekletilen CFRP numuneleri



Şekil 3. 26. Eksenel darbeye maruz kalan 2 ay deniz suyunda bekletilen CFRP numuneleri



Şekil 3. 27. Eksenel darbeye maruz kalan 3 ay deniz suyunda bekletilen CFRP numuneleri

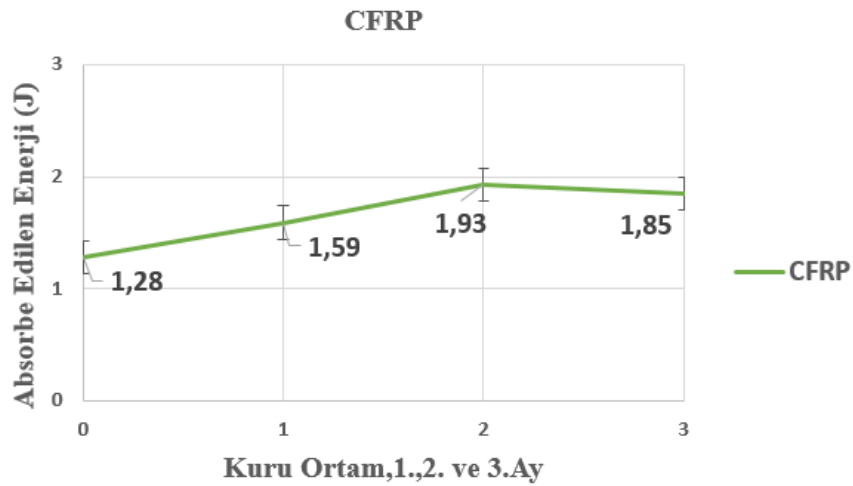
30 J darbe etkisiyle elde edilen verilerden CFRP numunelerinin absorbe edilen enerji miktarı ölçümleri Tablo 3.10'da verilmiştir. Eksenel darbe testine maruz kalan CFRP kuru ortam numunelerinin (C-8-K-1, C-8-K-2 ve C-8-K-3) ortalaması 1.28J'dur.

Deniz suyunda 1 ay bekletilen numunelerin (C-8-1A-1, C-8-1A-2 ve C-8-1A-3) ortalaması 1.59J'dur. Deniz suyunda 2 ay bekletilen numunelerin (C-8-2A-1, C-8-2A-2 ve C-8-2A-3) ortalaması 1.93J'dur.

Deniz suyunda 3 ay bekletilen numunelerin (C-8-3A-1, C-8-3A-2 ve C-8-3A-3) ortalaması 1.85J olarak hesaplanmış olup absorbe edilen enerji miktarı ölçümlerinin grafiği Şekil 3.28'de verilmiştir.

Tablo 3. 10. CFRP numunelerinin eksenel darbe deneyi ölçümleri

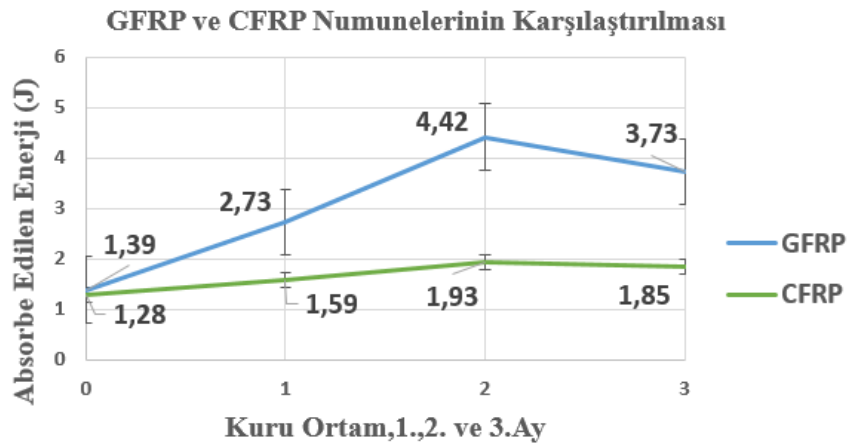
Numuneler	Ölçümler	Ortalamalar	Standart Sapmalar
C-8-K-1	1.1772 J	1.2753	0.098
C-8-K-2	1.2753 J		
C-8-K-3	1.3734 J		
C-8-1A-1	1.5696 J	1.5859	0.075
C-8-1A-2	1.6677 J		
C-8-1A-3	1.5205 J		
C-8-2A-1	1.9423 J	1.9336	0.008
C-8-2A-2	1.9260 J		
C-8-2A-3	1.9325 J		
C-8-3A-1	1.7658 J	1.8475	0.071
C-8-3A-2	1.8835 J		
C-8-3A-3	1.8933 J		



Şekil 3. 28. Kuru ortam, 1., 2. ve 3. ay deniz suyunda bekletilen CFRP numunelerinin absorbe edilen enerji miktarı grafiği

Eksenel darbe deneyi CFRP kuru ortam ve deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletilen durumlar için 3 tane numune kullanılmış ve ortalama değerler alınarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre CFRP kompozit numuneleri deniz suyunda bekletilme süresi arttıkça absorbe edilen enerji miktarı artmış ve en yüksek artış 2. ayda tespit edilmiştir.

Şekil 3.29'da tek bindirmeli yapıştırma bağlantı ile oluşturmuş eksenel darbe testine maruz kalan CFRP ve GFRP kompozit numuneler için eksenel darbe testi sonuçlarının karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 3. 29. GFRP ve CFRP kompozit numunelerin absorbe edilen enerji miktarının karşılaştırılması grafiği

Sonuçlar, Şekil 3.23 ve Şekil 3.28'de görüldüğü gibi, ikinci ayda absorbe edilen enerji miktarında en yüksek artış olduğunu, üçüncü ayda ise absorbe edilen enerji miktarında bir düşüş olduğunu göstermiştir.

GFRP numuneleri, yapışkan tabakanın bağlantının her iki yüzeyinde de kaldığı ve yapışkan tabaka ile alt tabaka yüzeyleri arasındaki arayüz bağının bir araya geldiği hasara sahiptir.

Öte yandan, CFRP numunelerinde ise yapıştırıcı tabakanın bağlantının her iki yüzeyinde kaldığı hasarlar vardır.

30J darbe enerjisi seviyesi altındaki tüm GFRP ve CFRP numuneleri için, bazı yapıştırma bağlantıları darbe ile anlık olarak ayrılmıştır. Burada elde edilen verilerden absorbe edilen enerji miktarı ölçülmüştür. Darbe testi sırasında absorbe edilen enerji, malzemenin darbe direncinin (mukavemetinin) ve tokluğunun bir ölçüsü olarak kullanılabilir [145].

GFRP ve CFRP kompozit numunelerin absorbe edilen enerji miktarları karşılaştırıldığında SEM görüntüleri ile de elde edilen gözlemlerle ilk fiber kopmaları ve fiber matris arayüz bağında boşlukların başlaması görülmüştür. Bu durum kuru ortam ve 1 ay deniz suyunda bekletilmiş GFRP numunelerde 1.39J-2.73J arasında meydana gelirken CFRP numunelerde ise 1.28J-1.59J arasındadır. Ayrıca CFRP numunelerinde fiber kopmaların bir miktar olduğu fakat fiber matris arayüz bağındaki boşluklarda fazla değişimin olmadığı gözlemlenmiştir.

2 ay deniz suyunda bekletilen GFRP numunelerinde 4.42J'den itibaren fiber kopmalarının, fiber çekilmelerinin hızlandığı ve mikro delaminasyonunda meydana geldiği gözlemlenmiştir. 2 ay denizde bekletilen CFRP numunelerinde 1.93J'de ise fiber kopmalarının bir miktar devam ettiği fiber-matris arayüz bağının 1.28J-1.59J değerindeki durumdan çok farklı olmadığı gözlemlenmiştir.

3 ay deniz suyunda bekletilen GFRP numunelerde 3.73J'de delaminasyonun devam ettiği bu durumun matrisin çatlamlarının başlamasına sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca fiberlerde kopmalar, fiberler arasında boşluklar ve fiber yüzeylerinde pürüzlenmeler daha da artmıştır.

3 ay deniz suyunda bekletilen CFRP numunelerde 1.85J'da fiberlerin kopmasının ve fiber-matris arayüz bağları arasındaki boşluğundaki artışın 1.93J'dan farklı olmadığı gözlemlenmiştir.

3.3.2. Üç Nokta Eğilme Deneyleri

Eğilme deneyi diğer adıyla bükme deneyi malzemenin sünekliğinin, kırılma mukavemetinin ve kırılmaya karşı direncin belirlenmesine olanak sağlar.

Başlıca özellikler şunlardır:

Eğilme Mukavemeti: Bükme mukavemeti olarak da bilinen bu mukavemet, bir malzemenin kırılmadan veya bozulmadan dayanabileceği en yüksek gerilme miktarıdır. Malzemenin kopma anında yaşadığı maksimum gerilmedir.

Eğilme Modülü (Esneklik Modülü): Bu özellik, malzemenin sertliğini veya bir kuvvet uygulandığında elastik olarak (yani kalıcı olmayan şekilde) deforme olmaya karşı direncini ölçmektedir. Daha yüksek bir bükme modülü daha sert bir malzemeyi gösterir.

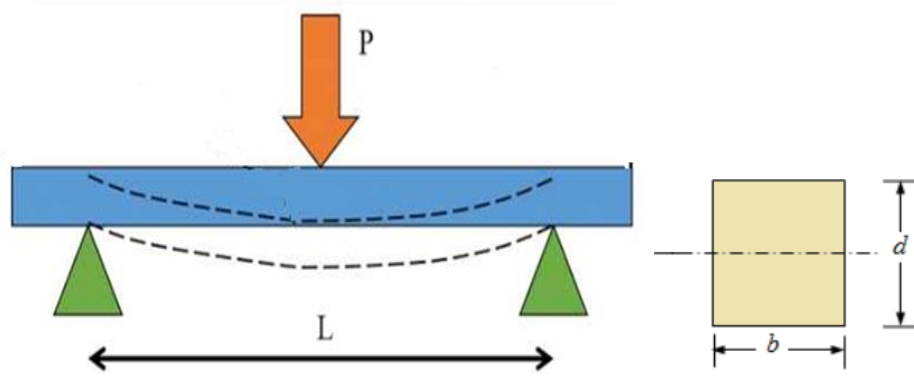
Akma Dayanımı: Bu, bir malzemenin plastik olarak deforme olmaya başladığı gerilmedir. Akma noktasından önce malzeme elastik olarak deforme olur ve uygulanan gerilme kaldırıldığında orijinal şekline geri dönmektedir.

Süneklik: Bükme testleri, bir malzemenin kırılmadan deformasyona dayanma derecesi olan malzemenin sünekliğini ölçmeye yardımcı olmaktadır. Yüksek sünekliğe sahip malzemeler kırılmadan önce önemli ölçüde bükülebilmektedir.

Kırılma Tokluğu: Bir malzemenin çatlakların yayılmasına karşı direncini bükme testleriyle belirlenebilir [146].

Üç nokta eğilme deneyi çok çeşitli yükleri içerir. Deney malzemeleri geniş bir yelpazede (metaller, kompozitler ve plastikler), çeşitli geometrilere sahip daire veya dikdörtgen kesittedirler. Deney, ortasına sabit yönde kuvvet uygulanırken numuneler her iki uçtan da desteklenmektedir bunun sonucunda ortaya çıkan şekil değiştirmesinin tanımıdır. Eğilme deneyinin amacı ortaya çıkan verilerle malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmektir. Deneyde malzeme basit kiriş modeli olarak kabul edilir. İdeal moment durumuna göre kiriş denklemi kirişte ortaya çıkan kayma gerilmesinin normal gerilmeler göre ihmal edilebilir sınırdan olması arzu edilmektedir [147].

Üç nokta eğilme deneyi iki desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının yön değiştirmeksizin ortasına bir kuvvet uygulandığında oluşan biçim değiştirmesi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3. 30. Üç nokta eğilme deneyi şematik görünümü

Yük-sehim eğrisi üzerindeki herhangi bir nokta için bu gerilimi hesaplamak üzere aşağıdaki denklem kullanılabilir:

Eğilme Gerilmesi (σ_f):

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.6)$$

Burada:

σ_f : orta noktada kiriş yüzeyindeki gerilme, MPa

P : yük-sehim eğrisinin belirli bir noktasındaki yük, N

L : iki destek arası mesafe, mm

b : test edilen kirişin genişliği, mm

d : test edilen kirişin derinliği, mm

Eğilme Gerinimi (ϵ_f):

Maksimum gerinimin meydana geldiği orta açıklıktaki test numunesinin dış yüzeyindeki bir elemanın uzunluğundaki nominal kesirli değişim herhangi bir sehim için hesaplanabilir:

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3.7)$$

Burada:

ε_f : dış yüzeyin gerinimi, mm/mm

D_m : giriş merkezinin maksimum sehim, mm

L : İki destek arası mesafe, mm

d : test edilen girişin derinliği, mm

Burada, üç nokta eğilme testinin amacı yapıştırıcı, bağlantı tipi ve kullanılan farklı kompozit malzemelerin etkilerini değerlendirmektir. Test, bağlantı ve yapıştırıcı arayüzünün kesişimi boyunca başlayacak hasarın belirlenmesine ve dolayısıyla deniz suyunun etkisiyle kompozit malzemenin mekanik özelliklerindeki değişikliklerin hangi aşamada meydana geleceğini daha iyi anlamaya yardımcı olur.

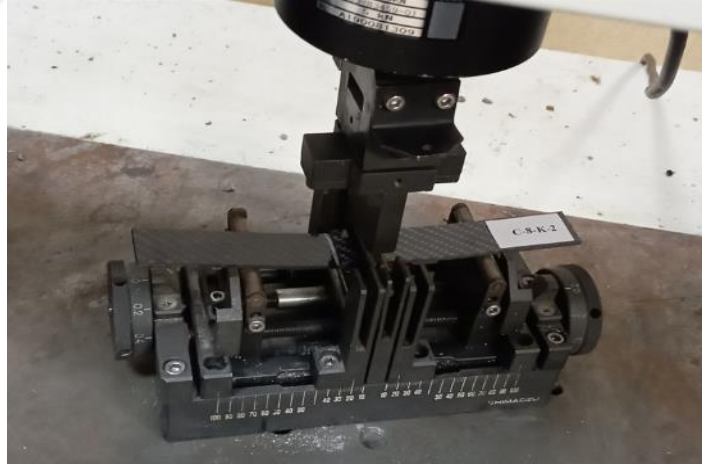
Teste başlamadan önce yük, test hızı ve numunenin boyut verileri programa girilerek hesaplamalar otomatik olarak yapılır ve istenilen grafikler elde edilir. Tüm numuneler hem deniz suyu hem de kuru koşullar için ayrı ayrı test edilmiş ve gerilme-gerinim grafikleri bilgisayar programı kullanılarak çizilmiştir. Üç nokta eğilme testi ASTM D790'a göre, genellikle dairesel veya dikdörtgen kesitli düz bir test parçasının merkezine, yön değiştirmeden iki destek üzerinde serbestçe duran bir kuvvet uygulanır.

Üç nokta eğilme deneyi Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Biyomekanik Laboratuvarı 100 kN yükleme kapasitesine sahip Shimadzu AG-100'de çekme deney cihazına uygun eğilme ucu aparatı takılarak 5 kN yük ve 1 mm/dk hızı seçilerek gerçekleştirilmiştir. Burada, 0,2 mm yapıştırma kalınlığına sahip pürüzsüz GFRP ve CFRP tek bindirmeli yapıştırılmış bağlantılar ASTM D790'a göre eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Şekil 3.31'de deneylerde kullanılan üç nokta eğilme deney cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3. 31. Üç nokta eğilme deney cihazı

Bu test, dışbükey tarafta çekme gerilimi ve içbükey tarafta basınç gerilimi üretir. Bu da orta sınır boyunca bir kayma gerilimi bölgesi oluşturur. Tek bindirmeli bağlantılarda bunu en aza indirmek ve numunenin sol ve sağ taraflarının test aparatı üzerinde aynı seviyede durmasını sağlamak için, mesnetler arasındaki boşluk ayarlanarak numuneler ortalanmıştır (Şekil 3.32).



Şekil 3. 32. Üç nokta eğilme deney cihazında numunenin konumlandırılması

3.3.3. Kuru Ortam Numunelerinin Üç Nokta Eğilme Deneyleri

Bağlantıları oluşturulmuş kuru ortam (deniz suyunda bekletilmeyen) için GFRP ve CFRP numuneler üç nokta eğilme testi için hazırlandıktan sonra deney gerçekleştirilmiştir.

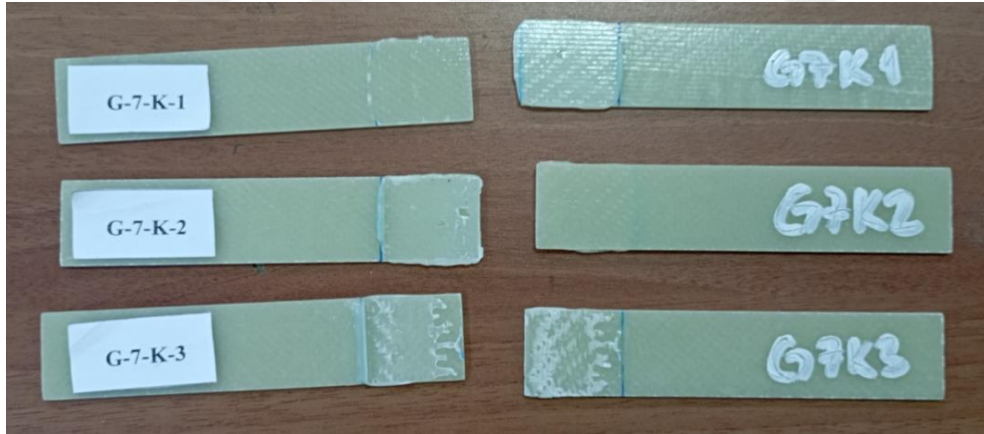
Deney kuru numunelerden GFRP için 3'er adet numune ve CFRP için 3'er adet numune olmak üzere toplamda 6 adet numune ile yapılmıştır.

3.3.4. GFRP ve CFRP Kuru Ortam Numuneleri

Bağlantıları oluşturulmuş kuru ortam için GFRP numuneler G-7-K-1, G-7-K-2 ve G-7-K-3 olmak üzere 3 kez ve C-8-K-1, C-8-K-2 ve C-8-K-3 olmak üzere 3 kez deney tekrarlanmıştır.

➤ Kuru Ortam GFRP Numuneleri (G-7-K-1, G-7-K-2 ve G-7-K-3)

Bağlantıları oluşturulmuş G-7-K-1, G-7-K-2 ve G-7-K-3 numuneleri öncelikle üç nokta eğilme deney cihazına bağlanmıştır. Ardından üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilen G-7-K-1, G-7-K-2 ve G-7-K-3 numunelerinin deney sonrası hasar görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.33).



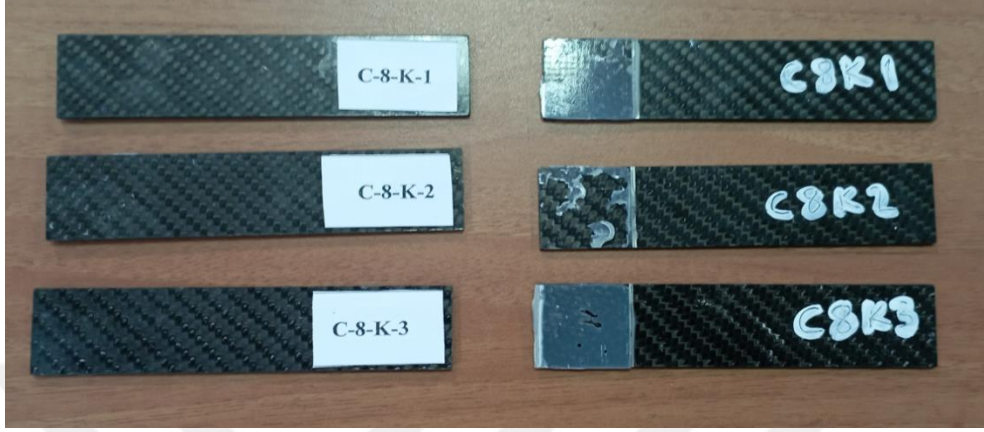
Şekil 3. 33. G-7-K-1, G-7-K-2 ve G-7-K-3 deney sonrası görüntüleri

Şekil 3.33'de GFRP kuru ortam numunelerinde görülen hasar kopma şeklindedir. Numuneler yapıştırma bağ hattından itibaren birbirinden ayrılmıştır.

➤ Kuru Ortam CFRP Numuneleri (C-8-K-1, C-8-K-2 ve C-8-K-3)

Bağlantıları oluşturulmuş C-8-K-1, C-8-K-2 ve C-8-K-3 numuneleri öncelikle üç nokta eğilme deney cihazına bağlanmıştır. Ardından üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilen C-

8-K-1, C-8-K-2 ve C-8-K-3 numunelerinin deney sonrası hasar görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.34).



Şekil 3. 34. C-8-K-1, C-8-K-2 ve C-8-K-3 deney sonrası görüntüleri

Şekil 3.34’de CFRP kuru ortam numunelerinde hasar yapışma bağlantı noktasında yapışma kopması olarak gerçekleşmiştir.

3.3.5. Deniz Suyunda Bekletilen GFRP ve CFRP Numuneler

Bağlantıları oluşturulmuş deniz suyunda 1 ay bekletilen G-7-1A-1, G-7-1A-2 ve G-7-1A-3 olmak üzere 3 kez ve C-8-1A-1, C-8-1A-2 ve C-8-1A-3 olmak üzere 3 kez deney tekrarlanmıştır.

➤ 1 Ay Deniz Suyunda Bekletilen GFRP Numuneleri (G-7-1A-1, G-7-1A-2 ve G-7-1A-3)

Bağlantıları oluşturulmuş G-7-1A-1, G-7-1A-2 ve G-1A-K-3 numuneleri üç nokta eğilme deney cihazına bağlanmıştır. Şekil 3.35’de üç nokta eğilme deneyi ile gerçekleştirilen G-7-1A-1, G-7-1A-2 ve G-7-1A-3 numunelerinin deney sonrası hasar görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.35).



Şekil 3. 35. G-7-1A-1, G-7-1A-2 ve G-7-1A-3 deney sonrası görüntüleri

1 ay deniz suyuunda bekletilmiş numunelerde yapıştırma bağ hattından itibaren başlayarak herhangi bir kopma meydana gelmemiştir.

➤ **1 Ay Deniz Suyunda Bekletilen CFRP Numuneleri (C-8-1A-1, C-8-1A-2 ve C-8-1A-3)**

Bağlantıları oluşturulmuş C-8-1A-1, C-8-1A-2 ve C-8-1A-3 numuneleri üç nokta eğilme deney cihazına bağlanmıştır. Şekil 3.36’da üç nokta eğilme deneyi ile gerçekleştirilen C-8-1A-1, C-8-1A-2 ve C-8-1A-3 numunelerinin deney sonrası hasar görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.36).

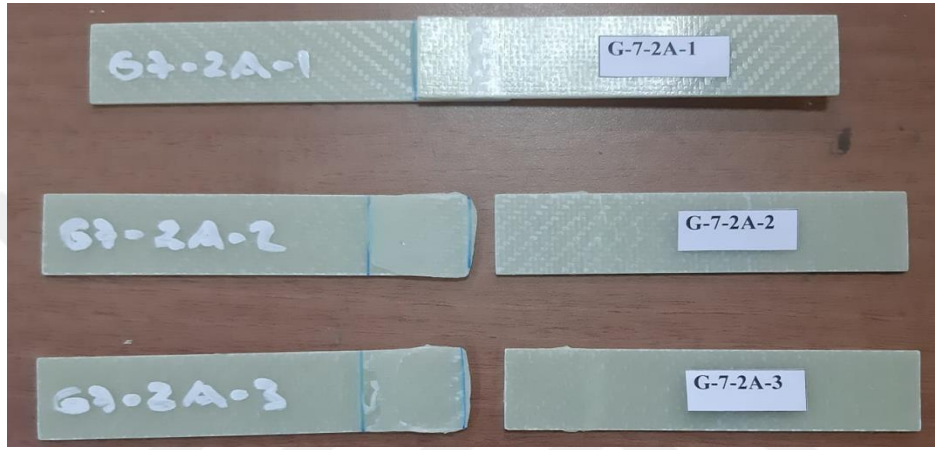


Şekil 3. 36. C-8-1A-1, C-8-1A-2 ve C-8-1A-3 deney sonrası görüntüleri

1 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerde deniz suyu emiliminden dolayı yapışma bağlantısında yapışma kopmasının olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde hasarın olduğu yüzeyler daha uzun sürede gerçekleştiği görülmüştür.

➤ **2 Ay Deniz Suyunda Bekletilen GFRP Numuneleri (G-7-2A-1, G-7-2A-2 ve G-7-2A-3)**

Bağlantıları oluşturulmuş G-7-2A-1, G-7-2A-2 ve G-7-2A-3 numuneleri üç nokta eğilme deney cihazına bağlanmıştır. Şekil 3.37’de üç nokta eğilme deneyi ile gerçekleştirilen G-7-2A-1, G-7-2A-2 ve G-7-2A-3 numunelerinin deney sonrası hasar görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.37).

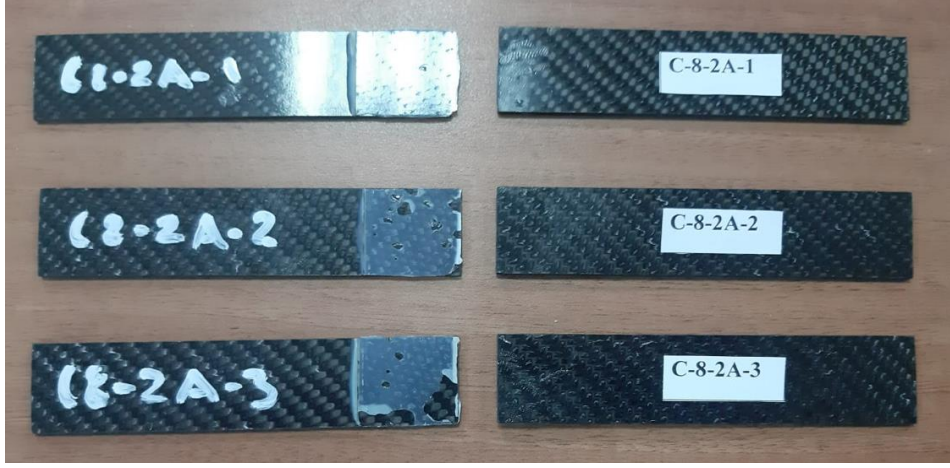


Şekil 3. 37. G-7-2A-1, G-7-2A-2 ve G-7-2A-3 deney sonrası görüntüleri

İlk numunede kopma hasarı gerçekleşmemiştir. Fakat diğer iki numunede durum farklıdır. Bu numunelerde meydana gelen her iki yapıştırıcı yüzeyinde kalan yapıştırıcı ile yapıştırma hattında kopma hasarı meydana gelmiştir.

➤ **2 Ay Deniz Suyunda Bekletilen CFRP Numuneleri (C-8-2A-1, C-8-2A-2 ve C-8-2A-3)**

Bağlantıları oluşturulmuş C-8-2A-1, C-8-2A-2 ve C-8-2A-3 numuneleri üç nokta eğilme deney cihazına bağlanmıştır. Şekil 3.38’de üç nokta eğilme deneyi ile gerçekleştirilen C-8-2A-1, C-8-2A-2 ve C-8-2A-3 numunelerinin deney sonrası hasar görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.38).



Şekil 3. 38. C-8-2A-1, C-8-2A-2 ve C-8-2A-3 deney sonrası görüntüleri

2 ay deniz suyu bekletilen numunelerde deniz suyu emiliminden dolayı hasar tabaka ayrılması ve kırılkan yapışma kopması olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde fiber-matris ara yüzü bağını etkilemiş ve hasarın üst yüzeyde olduğu gözlemlenmiştir.

➤ **3 Ay Deniz Suyunda Bekletilen GFRP Numuneleri (G-7-3A-1, G-7-3A-2 ve G-7-3A-3)**

Bağlantıları oluşturulmuş G-7-3A-1, G-7-3A-2 ve G-7-3A-3 numuneleri üç nokta eğilme deney cihazına bağlanmıştır. Şekil 3.39’da üç nokta eğilme deneyi ile gerçekleştirilen G-7-3A-1, G-7-3A-2 ve G-7-3A-3 numunelerinin deney sonrası hasar görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.39).

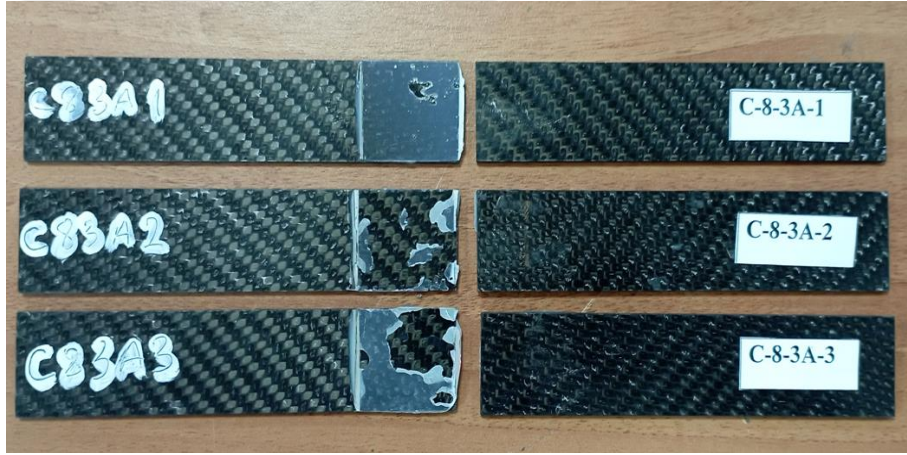


Şekil 3. 39. G-7-3A-1, G-7-3A-2 ve G-7-3A-3 deney sonrası görüntüleri

3 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerde deniz suyu emilimi 1. ve 2. aydaki kadar olmamıştır. Burada görülen hasar yapıştırma hattında kopmasıdır. Hasar ilk iki numune G-7-3A-1 ve G-7-3A-2’de üst yüzeyde olduğu gözlemlenirken G-7-3A-3 numunede ise her iki yüzeyde olduğu gözlemlenmiştir.

➤ **3 Ay Deniz Suyunda Bekletilen CFRP Numuneleri (C-8-3A-1, C-8-3A-2 ve C-8-3A-3)**

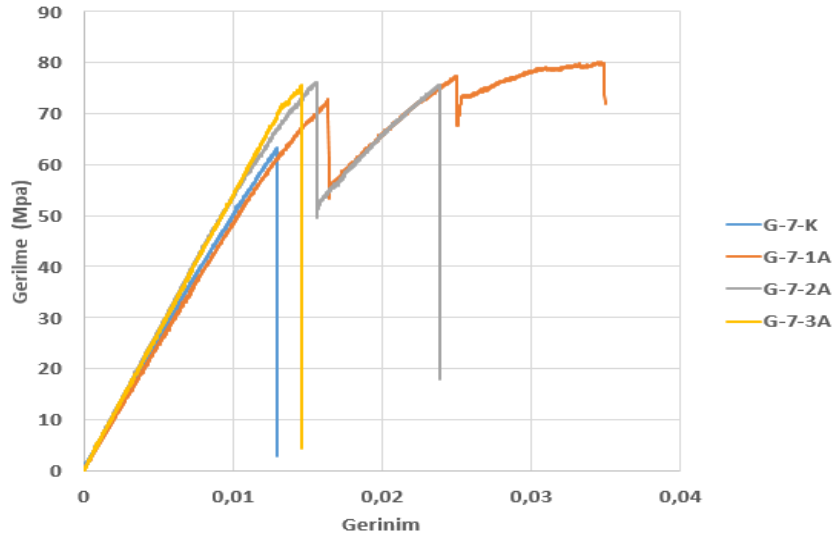
C-8-3A-1, C-8-3A-2 ve C-8-3A-3 bağlantıları oluşturulmuş numuneleri üç nokta eğilme deney cihazına bağlanmıştır. Şekil 3.40’da üç nokta eğilme deneyi ile gerçekleştirilen C-8-3A-1, C-8-3A-2 ve C-8-3A-3 numunelerinin deney sonrası hasar görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.40).



Şekil 3. 40. C-8-3A-1, C-8-3A-2 ve C-8-3A-3 deney sonrası görüntüleri

3 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerde kopma yapışkan tabakanın büyük kısmında meydana gelmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde fiber-matris ara yüz bağının etkilenmiş olduğu gözlemlenmiştir.

Gerilme-gerinim değerlerinin sonuçları elde edilmeden önce, GFRP kompozit numuneler kuru ortamda ve deniz suyuunda 1, 2 ve 3 ay bekletildikten sonra eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 3.41’de verilmiştir.



Şekil 3. 41. Kuru ortamda,1, 2 ve 3 ay deniz suyunda bekletilen GFRP numunelerinin gerilme-gerinim grafiği

Eğilme deneyi sonuçları incelendiğinde G-7-K için eğilme gerilimi 63.0726 MPa ve gerinim değeri 0.0129'dur. G-7-K bindirmeli bağlantıda liflerde kırılma ve çatlamlar gözlenmiştir. G-7-1A için ilk eğilme gerilimi 72.2704 MPa ve gerinim değeri 0.0163'tür, daha sonra en düşük eğilme gerilimi 54.4886 MPa ve gerinim değeri 0.0113'tür. En yüksek eğilme gerilimi 80.0818 MPa ve gerinim değeri 0.0347'dir. Şekil 3.41'de görüldüğü gibi, G-7-1A'ya uygulanan gerilme, gerinim ile orantılı olarak artmıştır. Bir süre sonra dalgalı bir düşüş olarak devam etmiş ve bağlantı gerilmeye karşı direnç göstermiştir. G-7-1A bindirmeli bağlantıda önemli bir hasar gözlenmemiş, ancak liflerde kırılma ve çatlamlar gözlenmiştir.

G-7-2A için ilk ve en yüksek eğilme gerilimi 75.8136 MPa'dır ve gerinim değeri 0.0156'dır. Daha sonra eğilme gerilimi 0.0094'lük bir gerinim ile 50.8163'e düştü. Son olarak eğilme gerilimi 0.0154'lük bir gerinim ile 75.6766 MPa'ya yükselmiştir.

G-7-2A bağlantısındaki gerilim gerinim ile orantılı olarak arttı ve belirli bir gerilim değerine ulaşıldığında ilk düşüş görüldü. Daha sonra gerilim arttı ve maksimum hasar gerilimine ulaşıldıktan sonra bağlantı koptu. G-7-1A bağlantısında olduğu gibi, lif kırılması ve kopması devam ettikçe delaminasyon da gözlemlendi.

G-7-3A için başlangıçtaki en yüksek eğilme gerilimi 75.6723 MPa'ydı ve gerinim 0.0146'ydı.

G-7-3A bağlantısında, G-7-1A ve G-7-2A bağlantılarında olduğu gibi, gerilim-gerinim ile orantılı olarak artmış ve belirli bir gerilim değerine ulaşıldığında ani bir düşüş gözlemlenmiş ve kopmuştur. G-7-1A ve G-7-2A'daki hasara ek olarak, fiber-matris ayrımı daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 3.41'de, GFRP kuru ortam numunelerinin gerilimi 63.0726 MPa ve gerinim 0.0128'dir. Bu, GFRP bağlantılarda sünekliğin artmaya başladığını göstermiştir.

GFRP numunelerinde, 2. ayda deniz suyu molekülleri yapıştırıcı ve GFRP malzemesinin arayüzüne ve matrisine yayılmaya başlamıştır. Bağlantının taşıdığı gerilim deniz suyu emilimiyle azalmıştır.

3 aylık bekletilmeden sonra, deniz suyu lifler arasındaki epoksi reçine içeriğini azalttı. Ancak, GFRP bağlantılarında, kuru ortam, 1., 2. ve 3. aylarda bağlantının dayanabileceği maksimum hasar gerilimine ulaştıktan sonra gerilim azaldı ve bağlantı kopması meydana geldi. Bu, tek bindirmeli yapıştırma bağlantıların genel davranışına uygundur.

"Young modülü" (E) terimi, bir malzemenin sertliğini veya rijitliğini ifade eder [148].

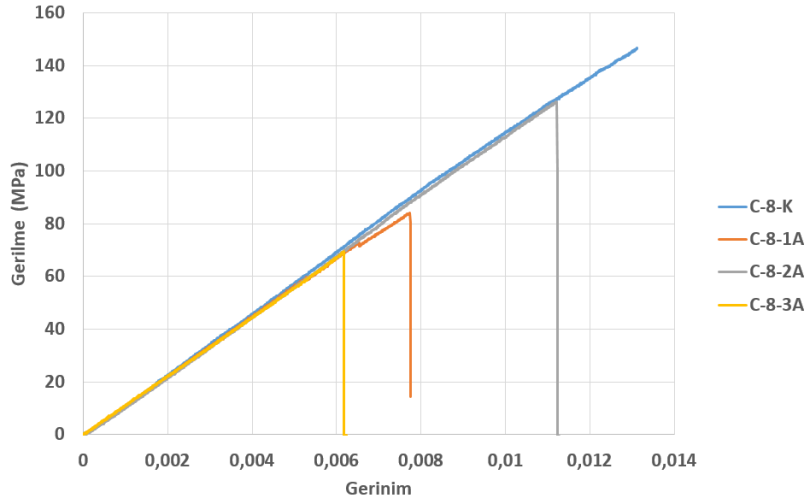
Elastisite modülü, Şekil 3.41'deki değerler kullanılarak gerilme-gerinim eğrisinin doğrusal kısmının eğimi alınarak hesaplanmıştır (Tablo 3.11).

Buna göre E (young's modülü) sonuçları aşağıdaki gibidir:

Tablo 3.11. GFRP Tek Bindirmeli Bağlantı Numuneleri için Young Modülü (E)

Malzeme (GFRP Tek Bindirmeli)	E (GPa)
G-7-K	5.39
G-7-1A	5.07
G-7-2A	4.91
G-7-3A	4.69

Gerilme-gerinim değerlerinin sonuçları elde edilmeden önce, CFRP kompozit numuneler kuru ortamda ve deniz suyunda 1, 2 ve 3 ay bekletildikten sonra eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 3.42'de verilmiştir.



Şekil 3. 42. Kuru ortamda,1, 2 ve 3 ay deniz suyuunda bekletilen CFRP numunelerinin gerilme-gerinim grafiği

Eğilme deneyi sonuçları incelendiğinde C-8-K için ilk ve en yüksek eğilme gerilimi 146.5976 MPa ve gerinim 0.0131'dir. Burada C-8-K bağlantılarında lif kırıkları ve lif ayrılmaları gözlemlendi.

C-8-1A için eğilme gerilimi 72.4395 MPa ve gerinim değeri 0.0065'tir. Ardından, en yüksek eğilme gerilimi 83.6555 MPa ve gerinim değeri 0.0077'dir. Uygulanan gerilim gerinim ile orantılı olarak artarken, çok küçük bir azalma gözlemlendi. Bağlantı gerilime direnmeye devam etti. Gerilim artmaya devam ettikçe, ani bir düşüş gözlemlendi ve bağlantı koptu. Bağlantıda belirgin lif kırıkları olmadığı gözlemlenmiştir. C-8-2A için başlangıçtaki en yüksek eğilme gerilimi 126.2889 MPa ve gerinim 0.0112'ydı. İlk başta, gerilim gerinim ile orantılı olarak arttı. Ancak uygulanan gerilim artmaya devam ettikçe matris deforme olmaya başlamıştır. Gerilim-gerinim grafiği orantılı olarak devam edememiş ve en yüksek gerilim değerine ulaştığında bağlantı kopmuştur.

C-8-3A için ilk ve en yüksek eğilme gerilimi 69.1586 MPa ve gerinim 0.0061'dir. Burada, gerilim gerinim grafiğiyle orantılı olarak artmış ve maksimum hasar gerilimine ulaşıldığında aniden düşmüş ve bağlantı kopmuştur. Bağlantı, lif kırılmaları ve lif kopmalarıyla sonuçlanmıştır.

Şekil 3.42'de, GFRP numunelerinde olduğu gibi, CFRP numunelerinde gerinim değerleri başlangıçta tüm numunelerde gerilme ile doğrusal olarak artmıştır.

Kuru numunelerde ve 1 aylık numunelerde artış veya azalma olmaksızın kopmalar görülmüştür. Bu da CFRP'nin daha kırılgan olduğunu göstermiştir. 1. ayda, kuru

numuneden farklı gerilmenin nedeni, deniz suyu moleküllerinin yapıştırıcı ve CFRP malzemesinin arayüzüne ve matrisine yayılmaya başlamasıdır. Bu durumun etkisi 2. ve 3. ayda giderek artmaya başlamıştır. Ek olarak, gerilme ile birlikte gerinimde bir artış-azalış gözlemlenmiştir. Bu, nem doygunluğuna ulaştıkça bağlantının sünekleşmesidir.

3. ayda, kuru numunelere kıyasla, deniz suyu emilimi lifler arasındaki epoksi reçine içeriğini azaltmıştır. Ancak bu azalma, CFRP malzemenin sertliği nedeniyle GFRP bağlantılardaki kadar fazla olmamıştır. Buna ek olarak, CFRP bağlantısındaki gerilme daha yüksek ve gerinim GFRP'den daha azdır.

Kuru ortam ve deniz suyunda bekletilen 1.2. ve 3. aylarda bağlantının dayanabileceği maksimum hasar gerilmesine ulaştıktan bir süre sonra gerilme azalmış ve bağlantı kopması meydana gelmiştir. Bu durum tek bindirmeli bağlantıların genel davranışı ile uyumludur.

Elastisite modülü, Şekil 3.42'deki değerler kullanılarak gerilme-gerinim eğrisinin doğrusal kısmının eğimi alınarak hesaplanmıştır (Tablo 3.12).

Tablo 3.12. CFRP tek bindirmeli bağlantı numuneleri için young modülü (E)

Malzeme (CFRP Tek Bindirmeli)	E (GPa)
C-8-K	11.50
C-8-1A	11.36
C-8-2A	11.11
C-8-3A	11.07

Tablo 3.11 ve Tablo 3.12'de gösterilen sonuçlar, hem GFRP hem de CFRP numuneleri için E (young modülü) karşılaştırıldığında, deniz suyunda bekletme süresi arttıkça düzenli bir düşüş gözlemlendiğini göstermektedir.

Tablo 3.11'de GFRP numuneleri arasındaki fark, Tablo 3.12'de CFRP numunelerine kıyasla young modülündeki düşüşten daha fazladır.

Bu düşüşün nedeni reçine matrisinin yumuşamasıdır. Bu, fiberler ve matris arasındaki bağlantıyı zayıflatmıştır. Ayrıca yük aktarım verimliliğini de azaltmıştır [145].

Sonuç olarak, GFRP tek bindirmeli yapıştırılmış numunelerin mukavemetinin CFRP numunelerden daha az olduğu bulunmuştur.

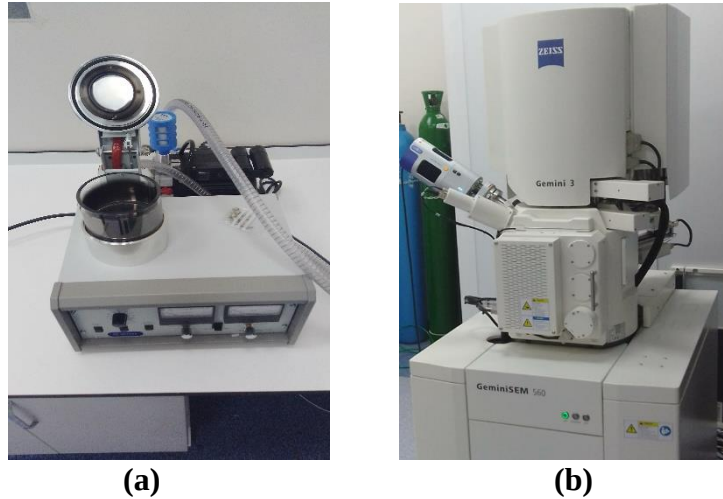
Bilindiği gibi eğilme modülünde eğilme gerilimi uygulanır. Bu modül yapıştırıcıların sertliğinin veya esnekliğinin bir ölçüsüdür [149]. GFRP tek bindirmeli bağlantılarda daha az yük altında kopmaların nedeni budur.

3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntü Analizi

Kompozit yapılarıdaki düşük hızlı darbelerde, çıplak gözle hasarlar tam görülememektedir. Bu hasarlara zor görülebilen darbe hasarı (BVID) denilmektedir. Darbe hasarı kompozit yapılarda mukavemeti etkilemektedir. Düşük hızlı darbelerden sonra elyaf kırılması, elyaf çekilmesi, matris çatlaması ve delaminasyon görülen hasar türlerindendir [150].

Eksenel darbe deneyleri ve üç nokta eğilme deneyleri yapılan GFRP ve CFRP numunelerinde deneyler sonrası oluşan hasarlı kesitlerden kuru ortam ve 1, 2 ve 3. ay olmak üzere her deney için iki farklı numune kullanılarak toplamda 16 numuneye SEM analizleri yapılmıştır. Analizler Şekil 3.43 (a)-(b)'de gösterilen DEU Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde ZEISS GEMINESEM 560 taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) yapılmıştır.

CFRP ve GFRP numuneler (a)'da gösterilen altın bileşeni ile püskürtüldükten sonra (b)'de hasar analiz görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), odaklanan bir elektron ışınıyla kompozit numunelerin kırık yüzeylerinin arayüzey özelliklerini ve içyapısını gözlemlemek için boydan boya tarayarak görüntüleri elde etmiştir.



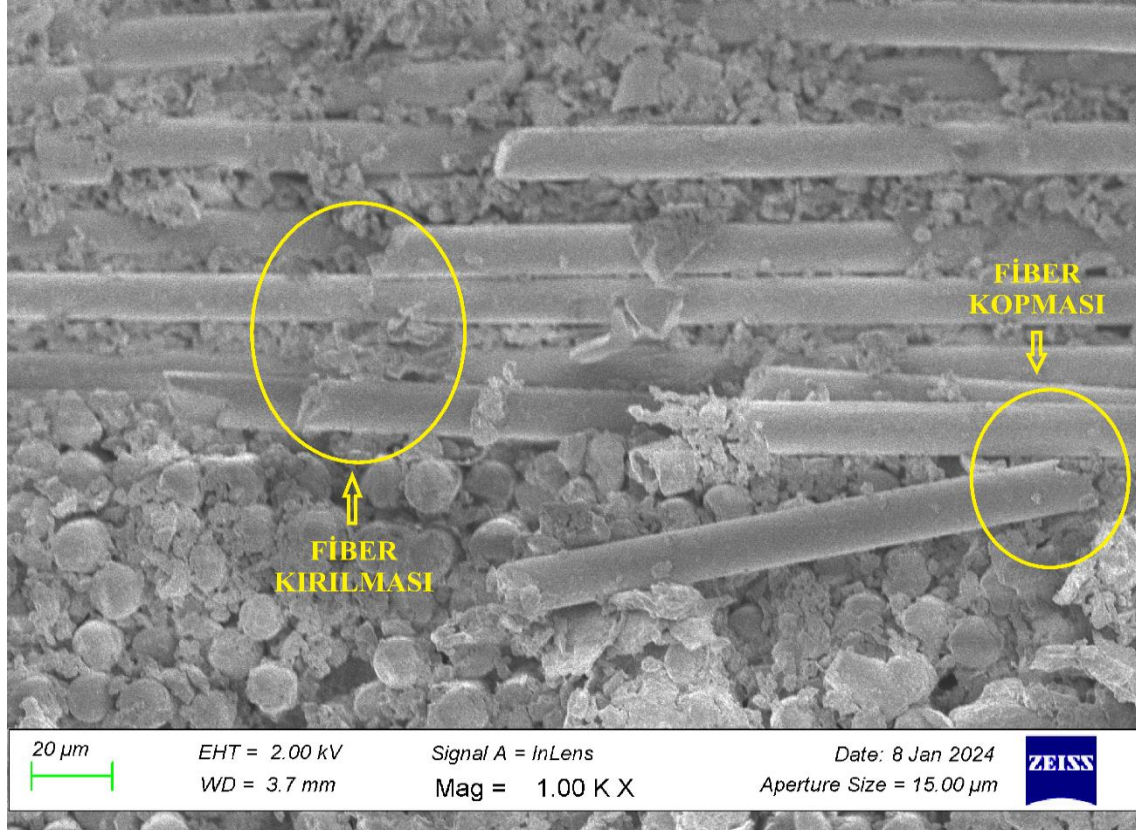
Şekil 3. 43. (a)-(b) ZEISS GEMINESEM 560 taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.4.1. Eksenel Darbe Deneyi Sonrası GFRP Numunelerinin SEM Görüntüleri

Eksenel darbe deneyi altında kompozitin dinamik tepkisini araştırmak için kompozit yapının darbesiyle ilgili çeşitli hasar mekanizmalarını anlamak artık önemli hale

gelmiştir. Kompozitteki hasar süreci, anizotropik davranış ve gerilmelerin eşit olmayan dağılımı nedeniyle oldukça karmaşıktır. Fiber kopması, delaminasyon ve matris çatlaması gibi kat içi hasarlar kompozitin ana hasarlarıdır [151].

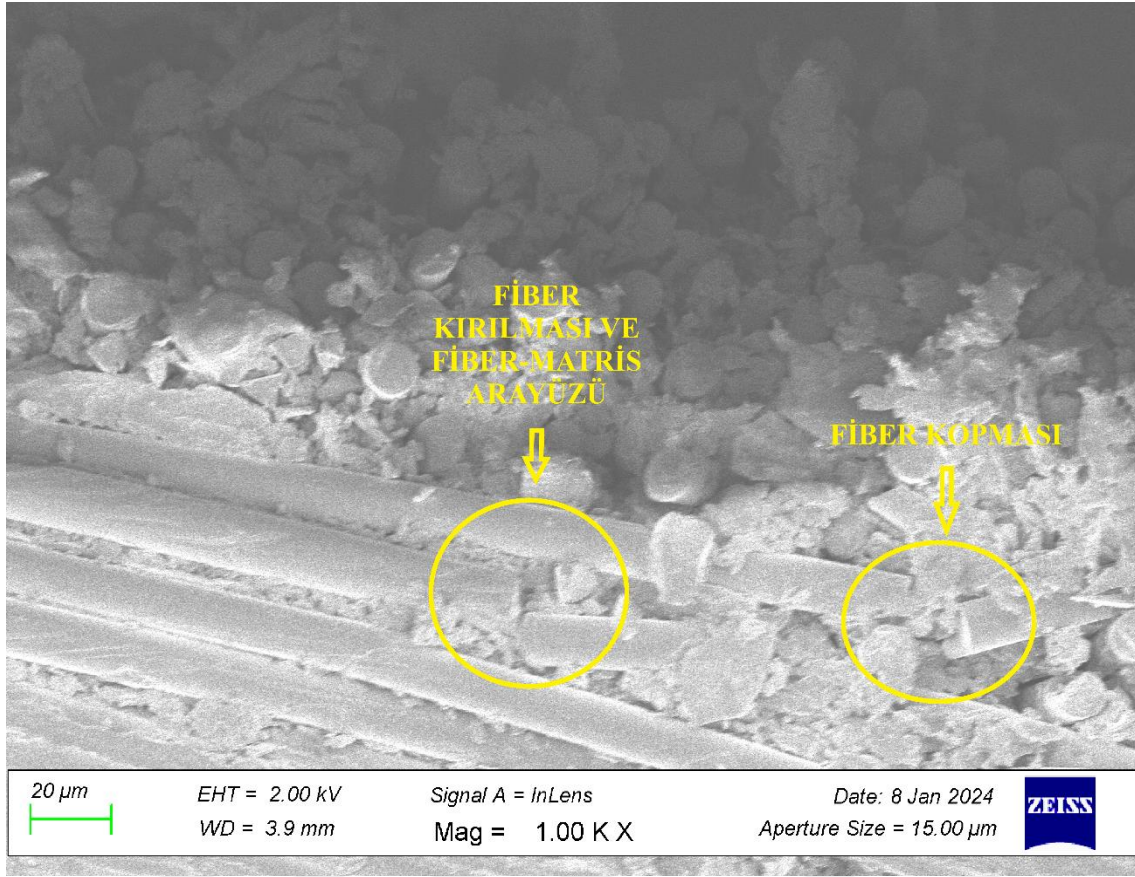
Bağlantıları oluşturulmuş kuru numune (G-7-K)'nin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüsü verilmiştir (Şekil 3.44).



Şekil 3. 44. G-7-K numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.44'de eksenel darbe deneyi G-7-K numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde düzensiz matris parçaları, fiberlerin pürüzlü dikine ve enine kesit yüzeyleri matris ve fiberler arasında göstermektedir. Burada daha çok fiber kırılmaları ve fiber kopmaları gözlemlenmiştir.

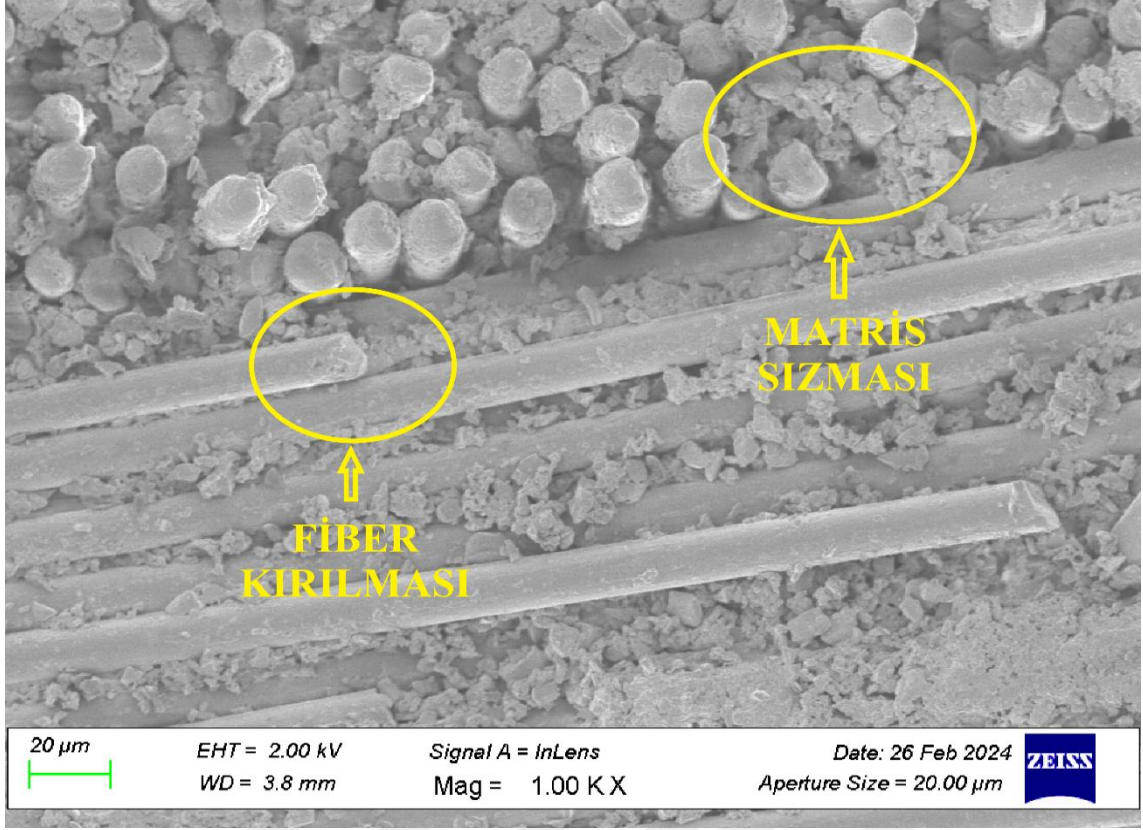
Şekil 3.45'de 1 ay deniz suyunda bekletilmiş numunenin (G-7-1A) eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 45. G-7-1A numunesinin aksel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.45’de G-7-1A numunesinde matris yüzeyinin bozulmasıyla fiberlerin kopmaları ve fiber-matris ara yüz bağında kuru ortamda bekletilen numuneye göre daha fazla boşlukların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum kuru ortam (G-7-K) ve bir ay boyunca deniz suyunda bekletilen (G-7-1A) GFRP numuneleri için 1.39J ile 2.73J arasında gerçekleşmiştir.

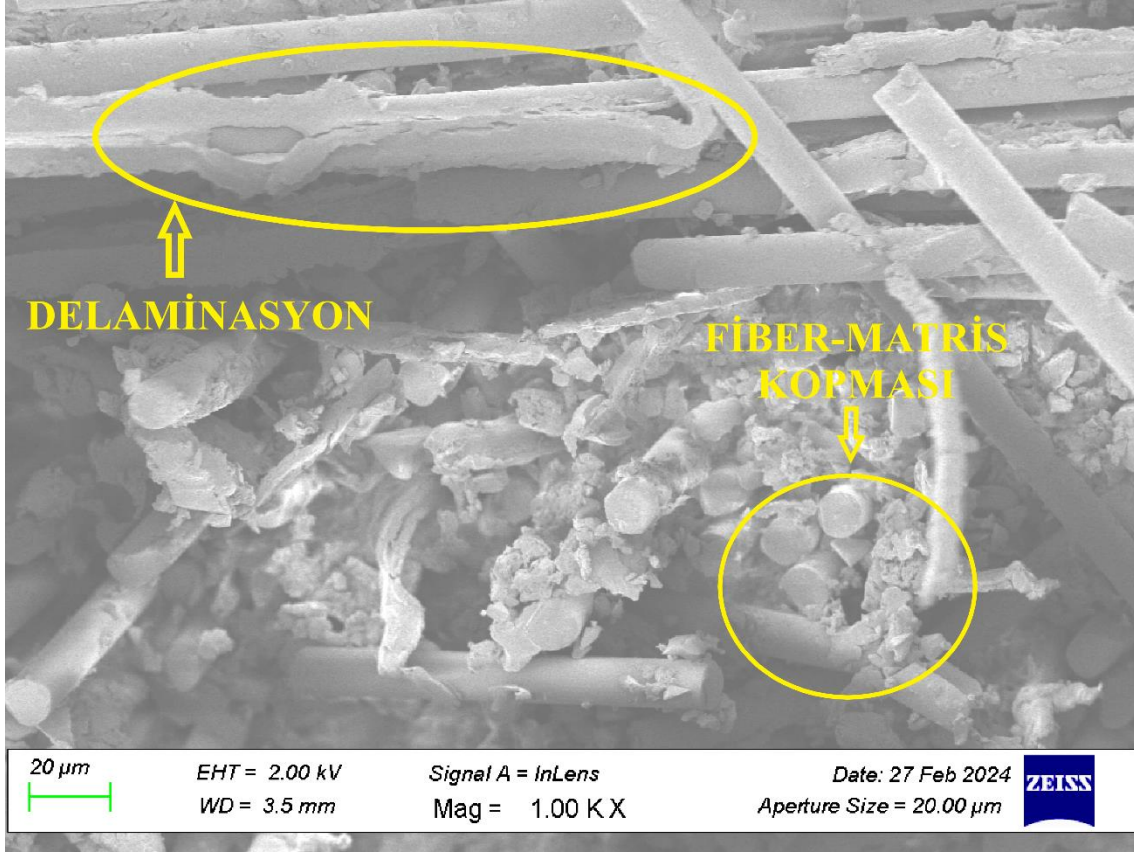
Şekil 3.46’da 2 ay deniz suyunda bekletilmiş numunenin (G-7-2A) aksel darbe deneyi sonrası SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 46. G-7-2A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.46'da G-7-2A numunesinde 4.42J'de fiber kopmaları, matris sızıntısı ve fiber-matris arayüzey bağı arasındaki boşluk daha da artmıştır.

Şekil 3.47'da 3 ay deniz suyunda bekletilmiş numunenin (G-7-3A) eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 47. G-7-3A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.47’de G-7-3A numunesi matrise deniz suyu çözeltisinin nüfuz etmesinden dolayı fiber matris bağların açılmasının biraz daha ilerlediğini göstermiştir. 3 ay boyunca deniz suyunda bekletilen G-7-3A numunesinde, 3.73J’de delaminasyon meydana geldi ve bu da matrisin çatlamaya başlamasına neden oldu. Ayrıca, fiber-matris arasındaki boşluklar arttı, fiber kırılması devam etti ve matris sızıntısı enine ve düşey yönlerde fiberlerin etrafında yoğunlaştı. Bu delaminasyonun başlaması kompozit malzemenin yapısını bozacak ve fiberlerin kopmasını daha da hızlandıracaktır [152],[153].

Kompozit malzemenin içindeki polimerik matris, enerjiyi dağıtarak darbe enerjisinin absorbe edebilmesini sağlar. Düşük hızlı bir darbe durumu, delinmeye neden olmaz, ancak yüzeylerde görünür bir hasar olmazken katmanlar arasında delaminasyonlar oluşturur [154]. Darbe yüklemesi altında kompozit malzemelerde görülen delaminasyonun başlama nedenleri matris çatlaması ve kayma gerilmeleridir [155],[156]. Delaminasyondan dolayı enerjinin dağılması fiberlerin translaminar kırılma enerjisini

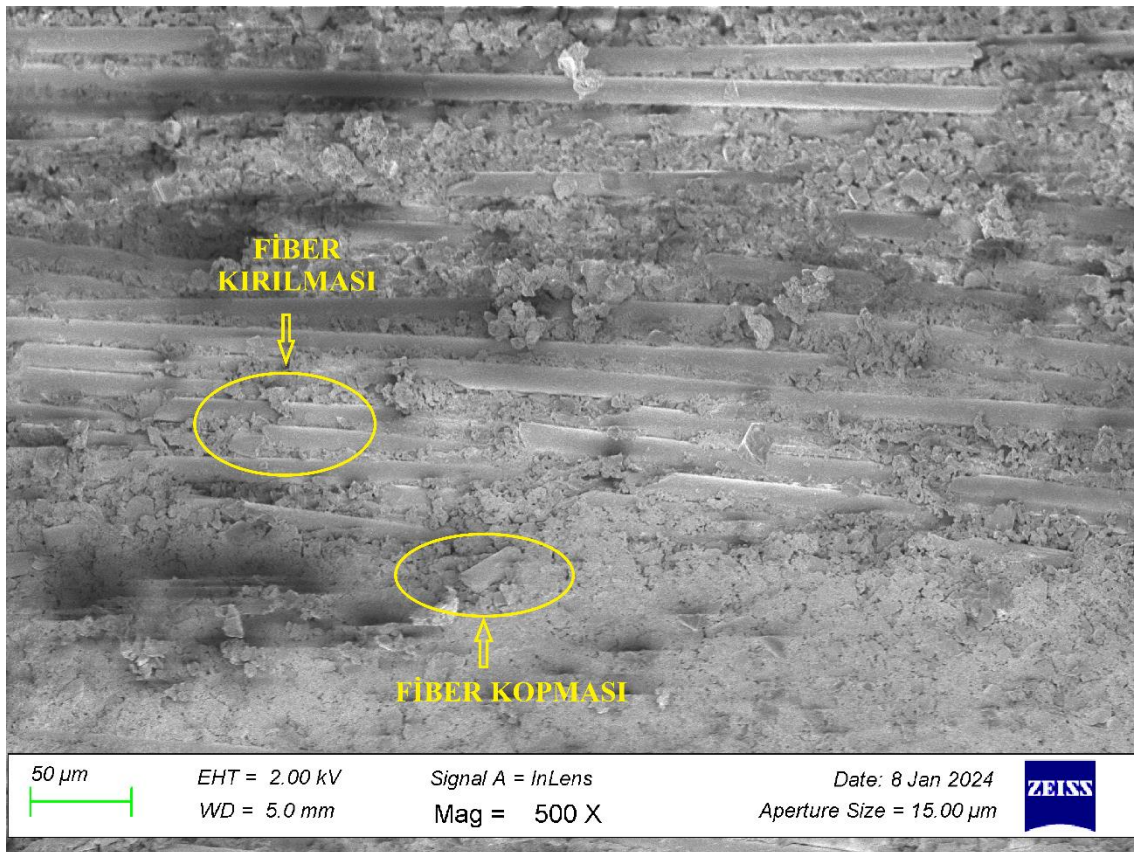
aştığından fiber kırılması meydana gelir [157]. Matris çatlaması kompozit bir malzemede oluşabilecek en ciddi hasar türüdür. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini azaltmanın yanı sıra, dış katlarda fiber-matris bağının ayrılmasına da neden olmaktadır [158].

Ardından fiber matris bağlarının ayrılması fiber kopması ve fiber kırılması sebep olmaktadır [159],[160],[161],[162].

3.4.2. Üç Nokta Eğilme Deneyi Sonrası GFRP Numunelerinin SEM Görüntüleri

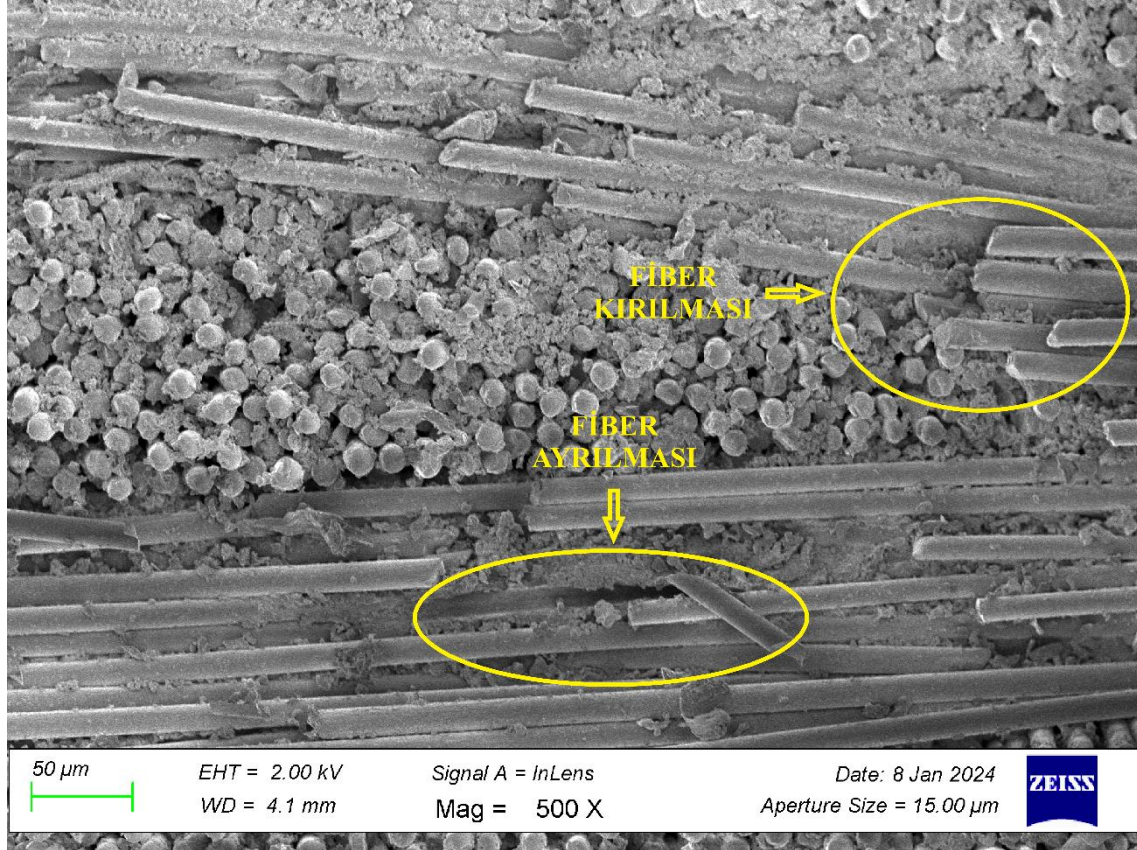
Eğilme deneyi sonrası ortaya çıkan eğilme hasarı durumunda, matris çatlaması, fiber-matris ara yüzünün ayrılması, delaminasyon ve fiber kırılması gibi hasar özelliklerinin ortaya çıkması gerekir [163].

Şekil 3.48’de kuru numunenin (G-7-K) üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 48. G-7-K numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri

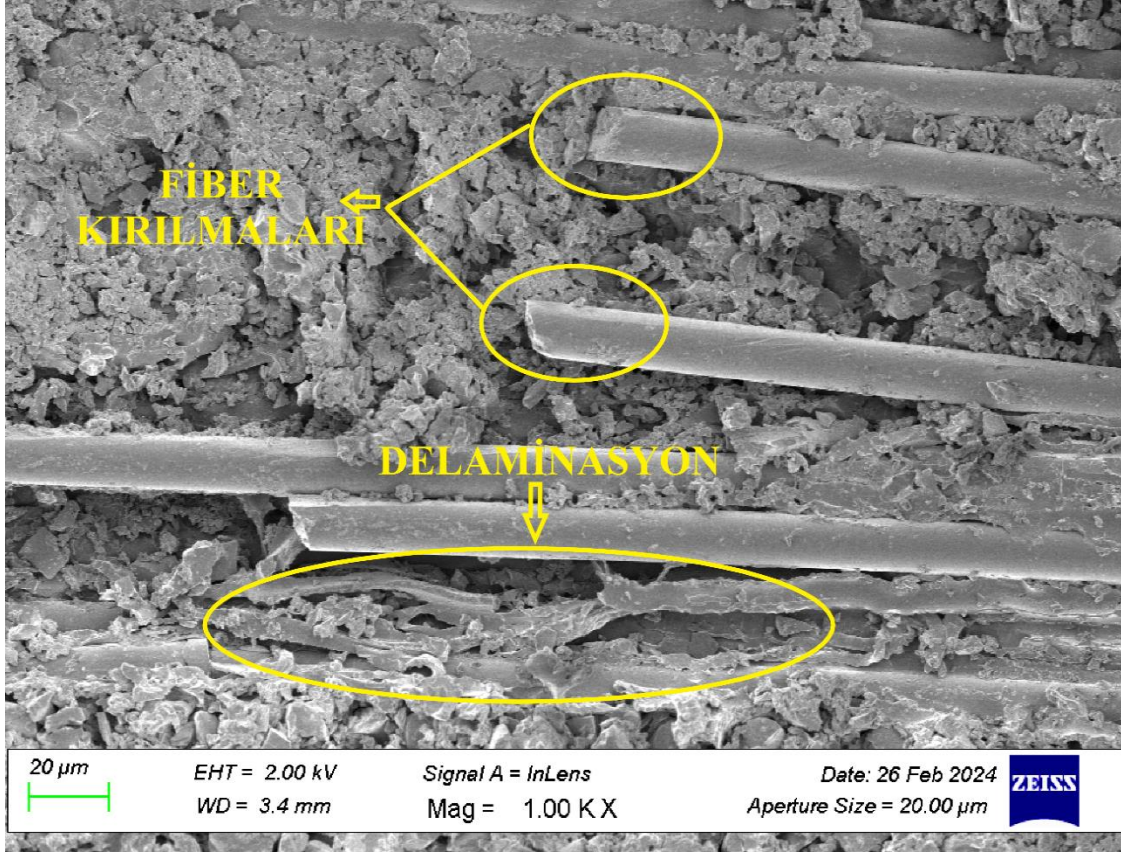
Şekil 3.48’de G-7-K numunesinde fiber kırılması ve fiber kopması hasarları gözlenmiştir. Şekil 3.49’da 1 ay deniz suyunda bekletilen (G-7-1A) üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 49. G-7-1A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.49’da G-7-1A numunesinde fiber kırılması devam ederken, enine ve dikey yönlerde fiber ayrılmaları görülmektedir.

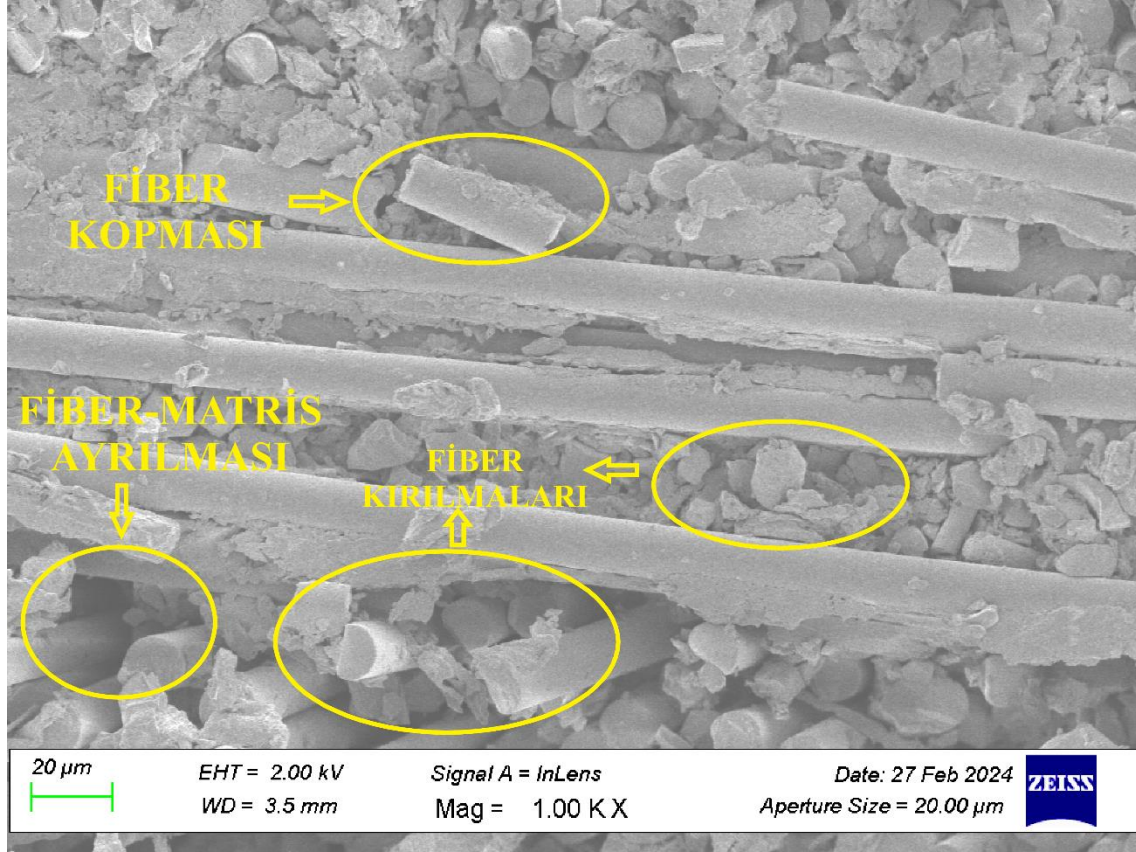
Şekil 3.50’de 2 ay deniz suyunda bekletilen (G-7-2A) üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 50. G-7-2A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.50’de G-7-2A numunesinde Şekil 3.49’de G-7-1A numunesine göre en yüksek deniz suyu emilimi 2. ayda meydana gelmiştir. Şekil 3.50’de G-7-2A numunesinde fiber kırılmaları, matris sızıntısının arttığı ve delaminasyon hasarı gözlemlenmiştir.

Şekil 3.51’de 3 ay deniz suyunda bekletilen (G-7-3A) üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüsü verilmiştir.

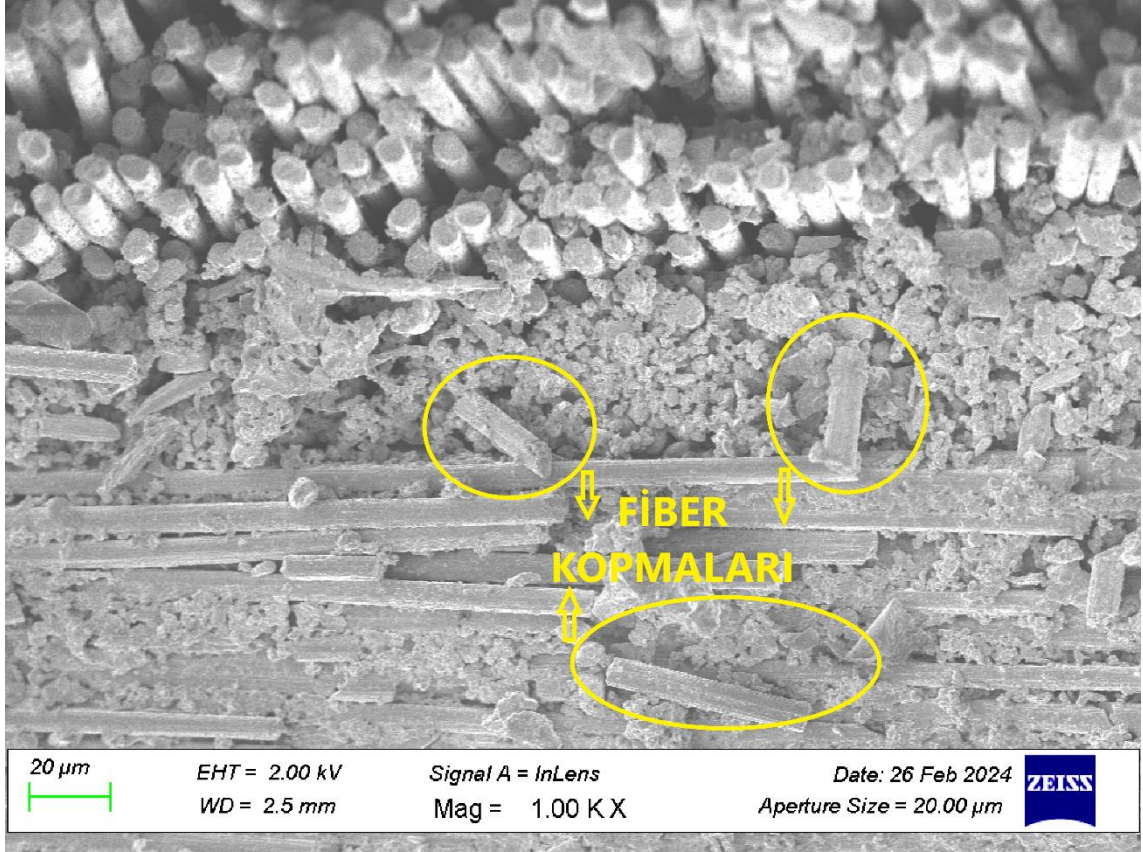


Şekil 3. 51. G-7-3A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.51’de G-7-3A numunesinde deniz suyu bekletilen numunelerin deniz suyu emiliminin 3. ayda yavaşladığı görülmektedir. Ancak fiber kopması, fiber kırılması ve fiber-matris ayrılmasının devam ettiği görülmüştür.

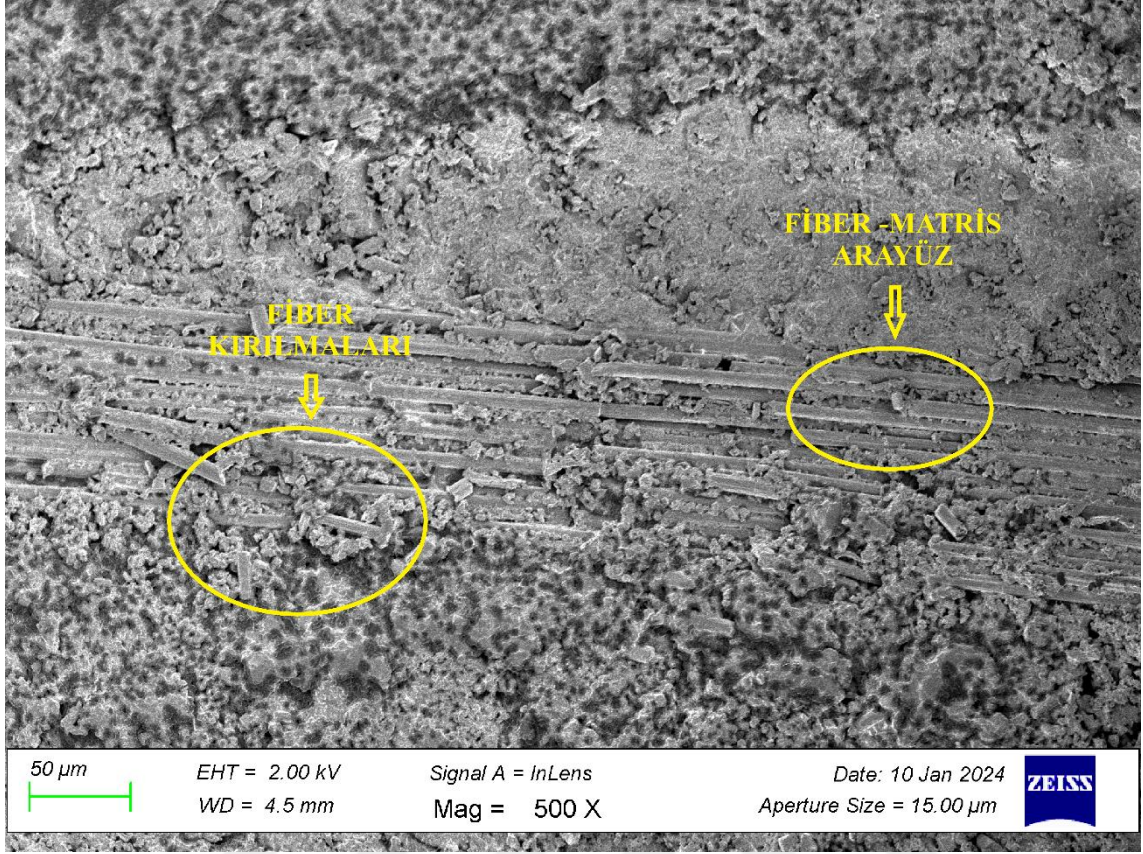
3.4.3. Eksenel Darbe Deneyi Sonrası CFRP Numunelerinin SEM Görüntüleri

Şekil 3.52’de kuru numunenin (C-8-K) Şekil 3.53’de 1 ay deniz suyu bekletilmiş (C-8-1A) numunenin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3. 52. C-8-K numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.52’de C-8-K numunesinde fiber-matris iyi bir ara yüz bağına sahiptir. G-7-K numunelerinde olduğu gibi fiber kırılmaları ve fiber kopmaları görülmektedir. C-8-K numunesinde en fazla fiber kırılmaları gözlemlenmiştir.

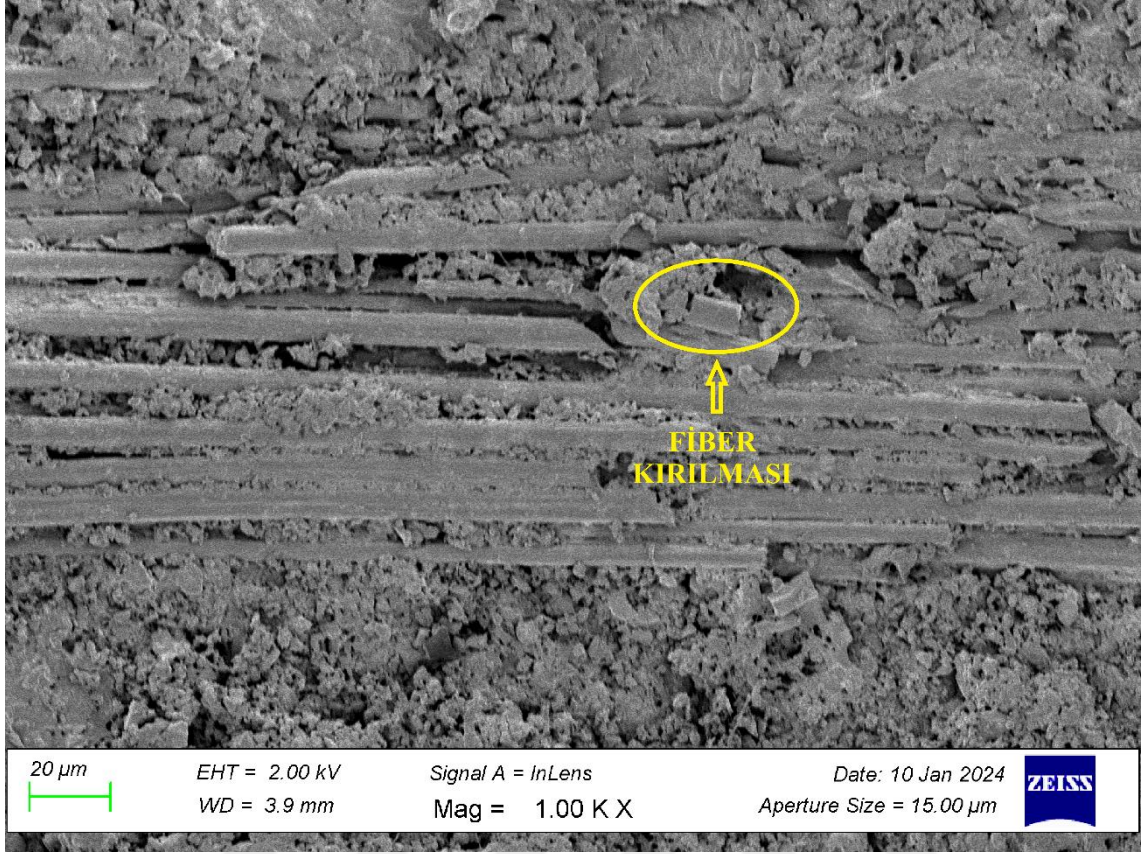


Şekil 3. 53. C-8-1A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.53’de C-8-1A numunesinin deniz suyu emilimiyle fiber kırılmaları, fiber kopmaları görülmüştür. Fiber matris ara yüz bağında boşluklarda fazla değişimin olmadığı gözlemlenmektedir. Bu durum C-8-K ve C-8-1A numuneleri için 1.28J ile 1.59J arasında gerçekleşmiştir.

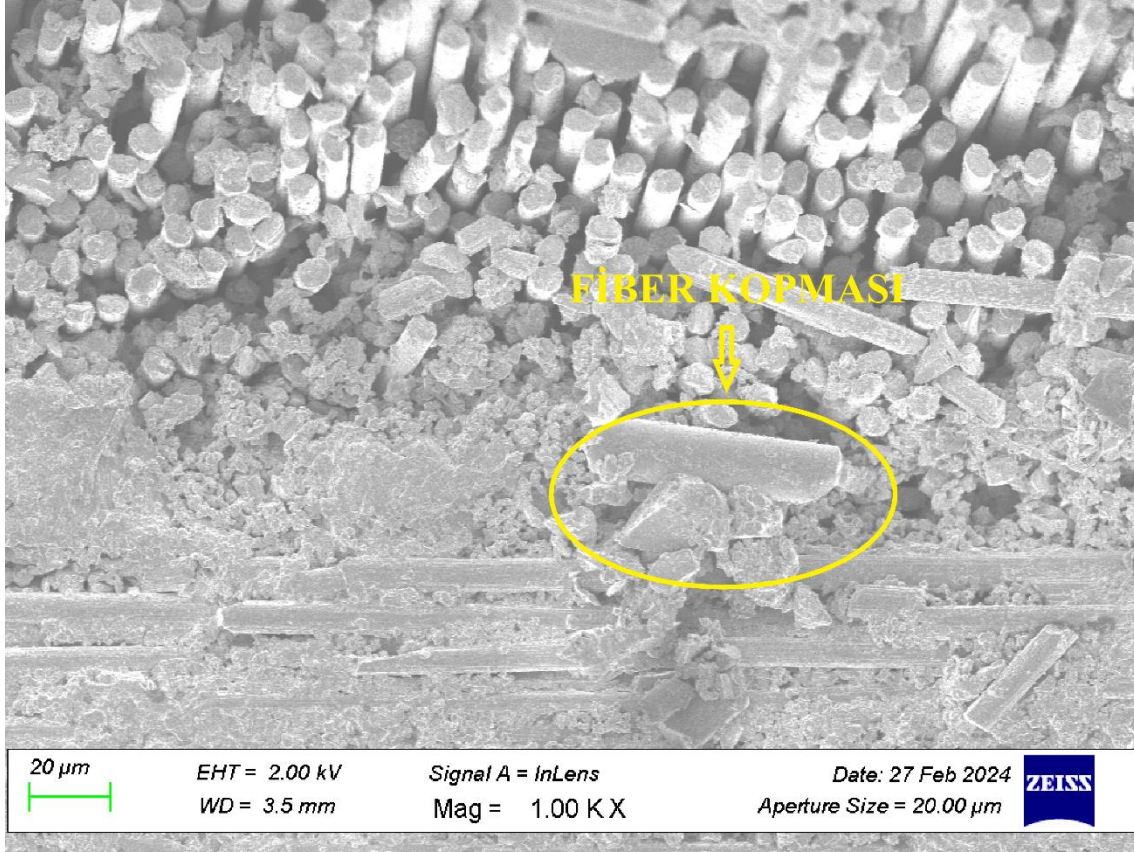
Fakat fiber-matris arayüzey bağındaki boşluklar ilk ay boyunca deniz suyu tutulan GFRP numunelerinde hem fiber kırılmalarının hem de arayüzey bağının CFRP numunelerine göre daha fazla olduğu da gözlemlenmiştir.

Şekil 3.54’de 2 ay deniz suyu bekletilmiş (C-8-2A) numune ve Şekil 3.55’de 3 ay deniz suyu bekletilmiş (C-8-3A) numunenin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3. 54. C-8-2A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.54’de C-8-2A numunesinde 1.93J’de fiber kopmasının bir miktar devam ettiği 1 ay deniz suyu bekletilmiş numunede olduğu gibi devam ettiği fakat fiber-matris ara yüzey bağının 1.28J-1.59J’deki durumdan çok farklı olmadığı gözlenmiştir.



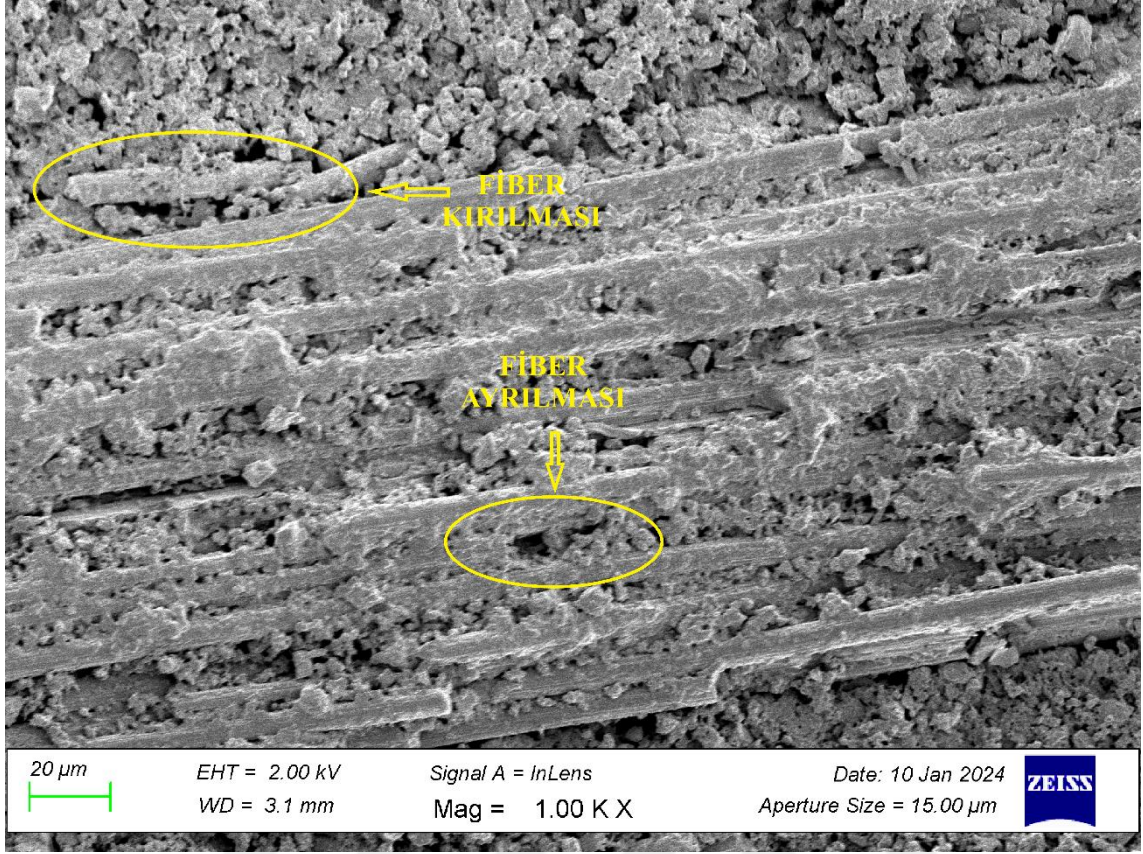
Şekil 3. 55. C-8-3A numunesinin eksenel darbe deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.55’de C-8-3A numunesinde ise fiberlerin kopmasının ve fiber matris ara yüz bağı arasındaki boşluğunda C-8-2A numunesine göre fazla değişiklik göstermediği gözlemlenmiştir. Burada 1.85J’de fiber kırılmaları gözlenmiş ve fiber-matris arayüzey bağı arasındaki boşluk artışı 1.93J’den farklı olmamıştır.

3.4.4. Üç Nokta Eğilme Deneyi Sonrası CFRP Numunelerinin SEM Görüntüleri

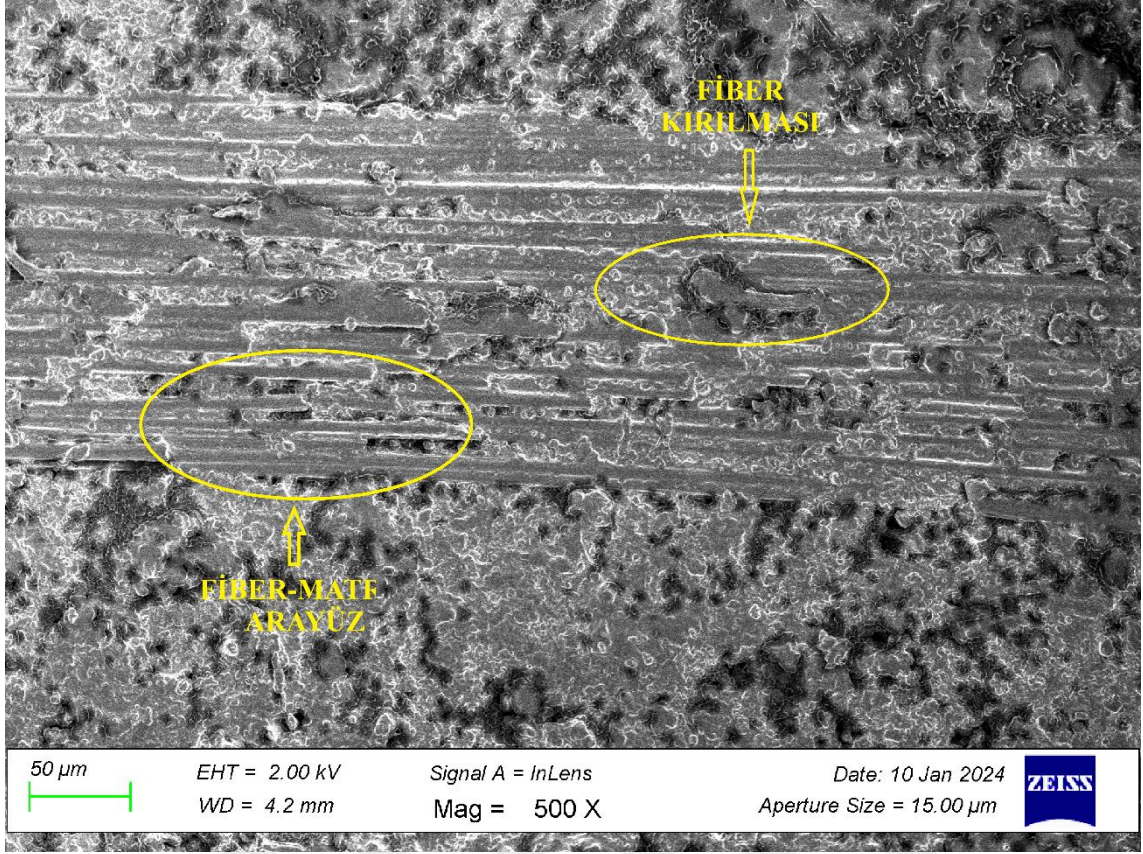
Şekil 3.56’de kuru numunenin (C-8-K) üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.

Şekil 3.57’de 1 ay deniz suyunda bekletilmiş (C-8-1A) numunenin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



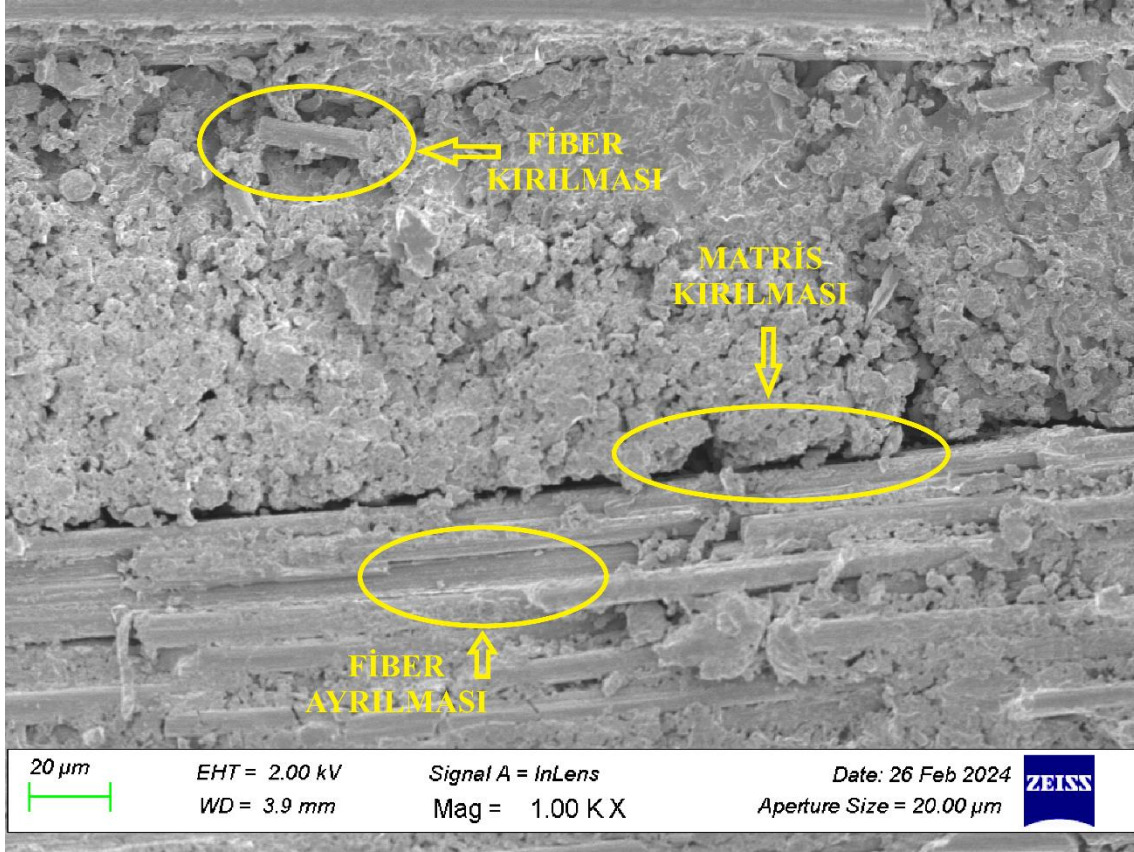
Şekil 3. 56. C-8-K numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri

Üç nokta eğilme deneyi CFRP numunelerinin SEM görüntüleri incelendiğinde Şekil 3.56'da C-8-K numunesinde fiber kopması ve fiber kırılması hasarları gözlemlenmiştir. Fakat fiber-matris ara yüz bağında belirgin bir ayrılma olmadığı görülmüştür.



Şekil 3. 57. C-8-1A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri

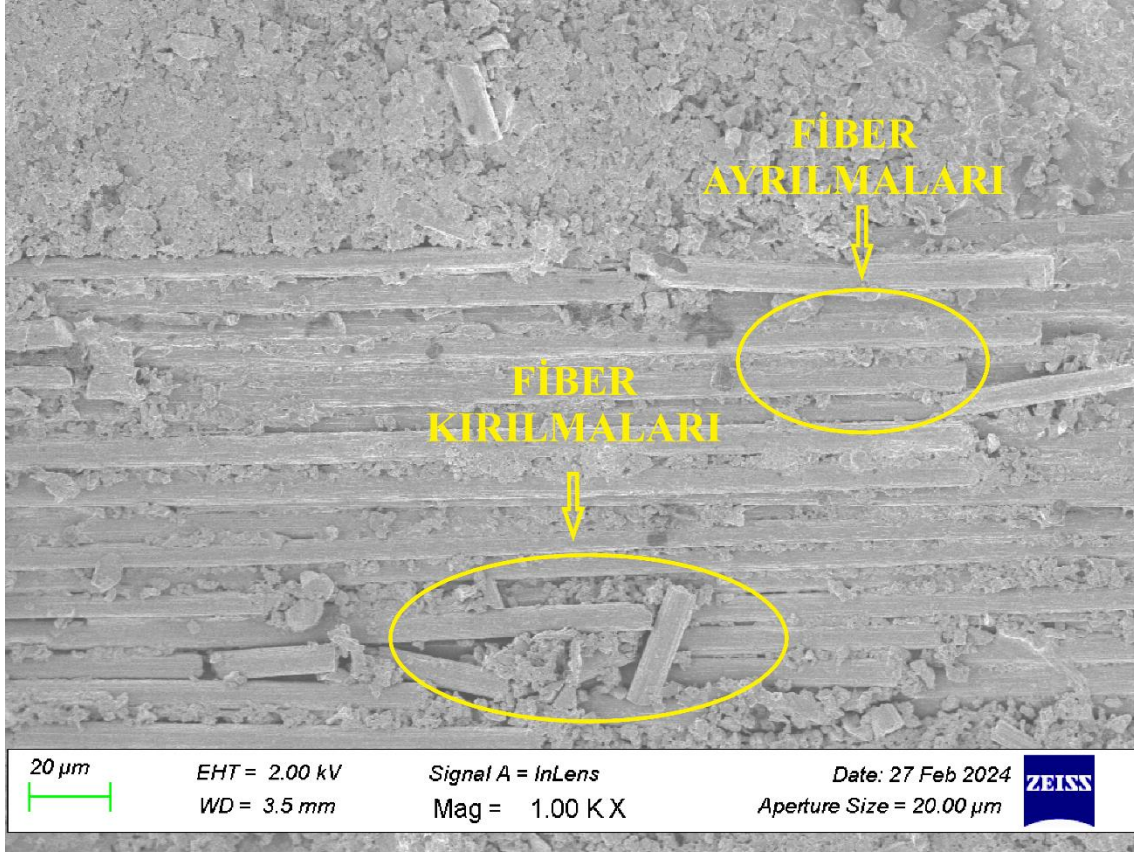
Şekil 3.57’de C-8-1A numunesinde fiber kırılmaları gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, fiber-matris arayüzey bağları arasındaki boşluk G-7-1A ortam numunelerine kıyasla daha azdır. Şekil 3.58’de 2 ay deniz suyunda bekletilmiş (C-8-2A) üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3. 58. C-8-2A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.58’de G-7-2A numunelerinde olduğu gibi en yüksek deniz suyu emiliminin olduğu 2. ayı göstermektedir. Bu ayda, fiber kırılmaları ve fiber boşlukları G-7-2A’ya göre daha azdır. Ayrıca matris kırılması gözlenmiştir.

Şekil 3.59’da 3 ay deniz suyunda bekletilmiş (C-8-3A) numunenin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3. 59. C-8-3A numunesinin üç nokta eğilme deneyi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 3.59’da C-8-3A numunesinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları görülmesine rağmen fiber-matris ara yüz bağları arasındaki boşluk hacminin çok artış göstermediği görülmektedir. Bu durum 3. aydan itibaren deniz suyu emiliminin yavaşladığını göstermektedir.

SEM görüntülerinde, hem GFRP hem de CFRP tek bindirmede üç nokta eğilme kuvvetlerinde gerilmenin etkisi bağlantı numunelerinde önce matriste başlar ve daha sonra fiberde devam eder. Gerilmenin artmasına ve azalmasına göre gerinim kaydedilmiştir. Gerinimin daha az olması matrisin daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Üç nokta eğilme testinin sonuçlarına göre, deniz suyunda bekletme süresi arttıkça arttıkça, CFRP tek bindirmeli bağlantılarda gerinim GFRP bağlantılara kıyasla daha azdır. Bu CFRP tek bindirmeli bağlantının mekanik özelliklerinin daha iyi olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Diğer geleneksel malzemelerden farklı olarak, kompozit malzemelerin mekanik özellikleri bir dizi değişkene bağlıdır. Bununla birlikte çevresel değişkenler olan sıcaklık ve nem kompozitin yapısal özelliklerini etkiler [65].

Deniz uygulamalarında kullanılan kompozitlerin hasara dayanıklı olması gerekir [164]. Daha önce literatürdeki çalışmalar genel olarak kompozit malzemelerle birleştirilen bağlantıları tek kompozit malzeme ve yapay ortam düzeyinde incelenmiştir. Bununla birlikte tek bindirmeli bağlantılarda daha önce yapılan çalışmaların çoğu eğilme gerilimini ilişkilendirmemiştir.

Bu çalışmada tek bindirmeli yapıştırma bağlantı ile oluşturmuş 0,2 mm yapıştırma kalınlığına sahip GFRP ve CFRP kompozitlerin kuru ortam, deniz suyu 1, 2 ve 3 ay bekletilen nem tutma yüzdeleri ölçülmüş, eksenel darbe deneyleri ve üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. Çalışma, iki farklı malzemeyi aynı bağlantı türü, oryantasyon, yapıştırma kalınlığı, deniz suyu ve sıcaklığında karşılaştırarak incelemiştir.

Deniz suyunun emilimi sonucunda GFRP ve CFRP kompozit bağlantılarda kuru ortam ve deniz suyu 1, 2 ve 3 ay bekletilmiş GFRP numunelerinde sırasıyla nem tutma yüzdeleri 0.66, 3.43, 4.16'dır. CFRP numunelerinin ise sırasıyla nem tutma yüzdeleri ise 0.57, 0.86, 0.87'dir. Burada GFRP numuneleri CFRP numunelere göre daha fazla su emilimi davranışı göstermiştir. Bunun nedeni deniz suyu moleküllerinin GFRP'de CFRP'ye göre daha fazla çözülmesi ve fiber-matris arayüzüne sızmasıdır. Bu durum deniz suyu emiliminin GFRP kompozit bağlantılardaki etkisinin daha fazla olduğunu göstermiştir.

Eksenel darbe deneyi sonucunda, 30J darbe enerji seviyesinde, kuru ortamda ve deniz suyu 1, 2 ve 3 ay bekletilen GFRP tek bindirmeli bağlantıların kırılma tokluğu sırasıyla %4.6, %9.1, %14.7 ve %11.23 olarak bulunmuştur. 30J darbe enerji seviyesinde, kuru ortamda ve deniz suyu 1, 2 ve 3 ay bekletilen CFRP tek bindirmeli bağlantıların kırılma tokluğu sırasıyla %4.2, %5.3, %6.4 ve %6.1 olarak bulunmuştur. GFRP ve CFRP birleşim numuneleri için, 2. ayda absorbe enerji miktarındaki artış, deniz suyuna daldırma süresi arttıkça en yüksek olmuştur. 3. aydan itibaren doygunluk oluştuğunda azalma

göstermiştir. Buna göre, deniz suyuna daldırma süresi arttıkça absorbe enerji miktarı azalmıştır.

GFRP numunelerinde eksenel darbe deneyi süresince absorbe edilen enerjinin daha fazla olduğu bu durum GFRP numunelerinin daha çok deformasyona uğradığını göstermektedir.

Üç noktalı eğilme deneyi sonucunda, GFRP bağlantılar 1, 2 ve 3 ay boyunca deniz suyunda tutulan kuru ortam bağlantılara kıyasla young modülünde sırasıyla %5.94, %8.90 ve %12.98 oranında azalma göstermiştir. CFRP bağlantılar 1, 2 ve 3 ay boyunca deniz suyunda tutulan kuru bağlantılara kıyasla young modülünde sırasıyla %1.28, %3.39 ve %3.74 oranında azalma gösterdi. Üç noktalı eğilme deneyinin sonuçları, deniz suyuna daldırma süresinin artmasıyla young modülündeki azalmanın CFRP bağlantılarında GFRP'ye göre daha az olduğunu göstermiştir.

Oryantasyon açısı arttıkça, tabakalı kompozitlerde gerilme değerleri düşer [21]. Bilindiği gibi 0/90 oryantasyon en yüksek performans gösterir [24]. Bu durumdan dolayı 0/90 oryantasyon CFRP ve GFRP malzemesi seçilmiştir. CFRP tek bindirmeli yapıştırma bağlantılı numunelerin deniz suyunda GFRP'den daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmadaki yöntemler ve kompozit malzemelerle yapıştırıcı bağlantılarının kullanımı, deniz ortamında geleneksel bağlantıların yerini alma potansiyeline sahiptir. Böylece, yüksek mukavemetli, hafif ve düşük yakıt tüketimli, düşük karbon ayak izine sahip bir malzeme ortaya çıkabilir [165].

Tezin deneysel çalışma bölümünde takviye elemanı ve matris sistemi seçiminde hibrit malzeme kullanılarak eksenel darbe deneyleri farklı sıcaklıklarda ve farklı darbe enerji seviyelerinde yapılabilir. Üç nokta eğilme deneyleri tek bindirmeli bağlantı için farklı yapıştırıcı malzemesi, farklı yapıştırıcı kalınlığı, farklı laminat oryantasyonu ve deniz suyunda bekletme süresi artırılarak yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Ngo, T., Introduction to Composite Materials, Composite and Nano composite Materials. In Composite and Nanocomposite Materials—From Knowledge to Industrial Applications; InTech Open: London, UK, 2020.
2. Syduzzaman, M., Rumi, S. S., Fahmi, F. F., Akter, M., & Dina, R. B., Mapping the recent advancements in bast fiber reinforced biocomposites: a review on fiber modifications, mechanical properties, and their applications. Results In Materials, 2023.20: p. 100448.
3. Curto, M., Le Gall, M., Catarino, A.I., Niu, Z., Davies, P., Everaert, G., Dhakal, H.N., Long-term durability and ecotoxicity of biocomposites in marine environments: A review. RSC Adv., 2021.11:p.32917–32941.
4. Häussinger P, Lohmüller R, Watson AM., Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. High-Performance Fibers to Imidazole and Derivatives, 2000.13:p.358.
5. Chawla, K. K., Composite materials: science and engineering. Springer Science & Business Media, 2012.
6. Huang, S., Fu, Q., Yan, L., & Kasal, B., Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials—A critical review. journal of materials research and technology, 2021.13:p. 1441-1484.
7. Katsiropoulos, C. V., Chamos, A. N., Tserpes, K. I., & Pantelakis, S. G., Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive. Composites Part B: Engineering, 2012. 43(2):p.240-248.
8. S. Muthirakkal, H.N.R.N. Murthy, M. Krishna, et al., Hygrothermic behaviour of carbon/vinylester, glass/vinylester, carbon/epoxy and glass/epoxy composites, Iran. Polym. J. (Engl. Ed.), 2010.19:p. 89–103.
9. Li, K., Zhou, A., Liu, T., Zou, D., & Yu, Z. (2025). Long-term performance and deterioration mechanism of novel hydrophobic coated fiber reinforced composite in marine environment. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 108716.
10. Arun, K. V., Basavarajappa, S., & Sherigara, B. S., Damage characterisation of glass/textile fabric polymer hybrid composites in sea water environment. Materials & Design, 2010.31(2):p. 930-939.

11. Li, X., van der Heijden, B., Hu, P., Rekik, H. E., & Lubineau, G. (2025). Unveiling the effects of non-local extrinsic mechanisms during delamination in fiber-reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 291, 112026.
12. Afshar, A., Alkhader, M., Korach, C. S., & Chiang, F. P., Effect of long-term exposure to marine environments on the flexural properties of carbon fiber vinylester composites. *Composite Structures*, 2015.126:p. 72-77.
13. Meng, M., Rizvi, M. J., Le, H. R., & Grove, S. M., Multi-scale modelling of moisture diffusion coupled with stress distribution in CFRP laminated composites. *Composite Structures*, 2016.138:p. 295-304.
14. Meng, M., Rizvi, M. J., Grove, S. M., & Le, H. R., Effects of hygrothermal stress on the failure of CFRP composites. *Composite Structures*, 2015.133:p. 1024-1035.
15. Mansouri, L., Djebbar, A., Khatir, S., & Wahab, M. A., Effect of hygrothermal aging in distilled and saline water on the mechanical behaviour of mixed short fibre/woven composites. *Composite Structures*, 2019.207:p. 816-825.
16. Garcia-Espinel, J. D., Castro-Fresno, D., Gayo, P. P., & Ballester-Muñoz, F., Effects of sea water environment on glass fiber reinforced plastic materials used for marine civil engineering constructions. *Materials & Design (1980-2015)*, 2015. 66:p. 46-50.
17. Kim, D. U., Seo, H. S., & Jang, H. Y., Study on mechanical bearing strength and failure modes of composite materials for marine structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021.9(7):p. 726.
18. Afshar, A., Liao, H. T., Chiang, F. P., & Korach, C. S., Time-dependent changes in mechanical properties of carbon fiber vinyl ester composites exposed to marine environments. *Composite Structures*, 2016.144:p. 80-85.
19. Mourad, A. H. I., Abdel-Magid, B. M., El-Maaddawy, T., & Grami, M. E., Effect of seawater and warm environment on glass/epoxy and glass/polyurethane composites. *Applied Composite Materials*, 2010.17:p. 557-573.
20. Banakar, P., Shivananda, H. K., & Niranjana, H. B., Influence of fiber orientation and thickness on tensile properties of laminated polymer composites. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 2012.9(1):p. 61.
21. Yüncüoğlu, E., & İnce, S. T., Farklı Parametreler Işığında Fiber Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Mukavemet Özelliklerinin DeneySEL Olarak Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2021.33(1):p. 243-249.

22. Almeida Jr, J. H. S., Angrizani, C. C., Botelho, E. C., & Amico, S. C., Effect of fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites. *Materials & Design*, 2015. 65:p. 789-795.
23. Nandagopal, R. A., Chai, G. B., & Narasimalu, S., Influence of stress ratio and stress concentration on the fatigue behaviour of hygrothermal aged multidirectional CFRP composite laminate. *International Journal of Fatigue*, 2020. 137:p. 105651.
24. Biswas, R.; Sharma, N.; Singh, K.K., Numerical analysis of mechanical and fatigue behaviour of glass and carbon fibre reinforced polymer composite. *Mater. Today Proc.*, 2023.3:p. 479.
25. Beura, S., Chakraverty, A. P., Pati, S. N., Pradhan, D. D., Thatoi, D. N., & Mohanty, U. K., Effect of salinity and strain rate on sea water aged GFRP composite for marine applications. *Materials Today Communications*, 2023.34:p. 105056.
26. Vizentin, G., & Vukelic, G., Marine environment induced failure of FRP composites used in maritime transport. *Engineering Failure Analysis*, 2022.137:p. 106258.
27. Behera, A., Dupare, P., Thawre, M. M., & Ballal, A., Effects of hygrothermal aging and fiber orientations on constant amplitude fatigue properties of CFRP multidirectional composite laminates. *International Journal of Fatigue*, 2020.136:p. 105590.
28. Khan, Z. I., Arsad, A., Mohamad, Z., Habib, U., & Zaini, M. A. A. ,Comparative study on the enhancement of thermo-mechanical properties of carbon fiber and glass fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 201.39:p. 956-958.
29. Ghabezi, P., & Harrison, N. M., Hygrothermal deterioration in carbon/epoxy and glass/epoxy composite laminates aged in marine-based environment (degradation mechanism, mechanical and physicochemical properties). *Journal of Materials Science*, 2022.57(6):p. 4239-4254.
30. Jesthi, D. K., & Nayak, R. K., Evaluation of mechanical properties and morphology of seawater aged carbon and glass fiber reinforced polymer hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 2019.174:p. 106980.
31. Singh, K. K., Ansari, M. T. A., & Azam, M. S., Fatigue life and damage evolution in woven GFRP angle ply laminates. *International Journal of Fatigue*, 2021. 142:p. 105964.
32. Ray, B. C., Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. *Journal of colloid and interface science*, 2006.298(1):p.111-117.

33. Khalili, S. M. R., Shokuhfar, A., Hoseini, S. D., Bidkhor, M., Khalili, S., & Mittal, R. K., Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in lap joints for composite structures subjected to mechanical loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008. 28(8):p.436-444.
34. Redmann, A., Damodaran, V., Tischer, F., Prabhakar, P., & Osswald, T. A., Evaluation of single-lap and block shear test methods in adhesively bonded composite joints. *Journal of Composites Science*, 2021.5(1):p. 27.
35. Katsiropoulos, C. V., Chamos, A. N., Tserpes, K. I., & Pantelakis, S. G., Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 2012. 43(2):p.240-248.
36. Li, S., Liu, W., Sun, W., & Hou, S. (2023). Effects of adherend notching on the bonding performance of composite single-lap joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023.281:p.109141.
37. Ozdemir, O., & Oztoprak, N., An investigation into the effects of fabric reinforcements in the bonding surface on failure response and transverse impact behavior of adhesively bonded dissimilar joints. *Composites Part B: Engineering*, 2017.126:p. 72-80.
38. Zou, T., Ju, Y., Guan, Y., & Fu, J., Effect of Stacking Sequence on Fatigue Performance of CFRP–Al Single-Lap Adhesive Joints: Experimental Study. *Polymers*, 2022.14(23):p. 5088.
39. Saeedifar, M., Saleh, M. N., Kairi, A., de Freitas, S. T., & Zarouchas, D., Structural integrity assessment of a full-scale adhesively-bonded bi-material joint for maritime applications. *Thin-Walled Structures*, 2023.184:p. 110487.
40. Dehaghani, R. C., Cronin, D., & Montesano, J., Performance and failure assessment of adhesively bonded non-crimp fabric carbon fiber/epoxy composite single lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2021.105:p.102776.
41. Boban, A., Kurian, S., Pooppally, T. J., Kumar, R. R., Gaur, P., & Singh, D., Numerical investigation on the strength of different types of adhesively bonded lap joints. *Materials Today: Proceedings*, 2023.72:p. 2255-2260.
42. Mohabeddine, A., Malik, G., Correia, J., Silva, F., De Jesus, A., Fantuzzi, N., & Castro, J. M., Experimental parametric investigation on the behavior of adhesively bonded CFRP/steel joints. *Composite Structures*, 2023.307:p. 116598.

43. Jairaja, R., & Naik, G. N., Single and dual adhesive bond strength analysis of single lap joint between dissimilar adherends. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019.92:p.142-153.
44. Kim, K. S., Yoo, J. S., Yi, Y. M., & Kim, C. G., Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods. *Composite structures*, 2006.72(4):p. 477-485.
45. Sadeghi, A., Mahshid, R., Heidari-Rarani, M., & Lessard, L., Effect of lamina fiber orientation interfaced with semi-flexible adhesive layer on strength and failure mode of composite single-lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2022.118:p. 103232.
46. Bhardwaj, A. R., Vaidya, A. M., Rawlani, M. V., & Bambhori, S. C., Investigation of Machining Behavior of Metal Matrix Composite: A Review. *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE)*, 2015. 2(8):p.68-70.
47. S. Deutsch, 23rd National SAMPE Symposium, California, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Covina, California, USA., May 2-4, 1978:p.34.
48. Yao R, Pang T, Zhang B, Fang J, Li Q, Sun G. On the crashworthiness of thin-walled multi-cell structures and materials: State of the art and prospects. *Thin-Walled Structures*, 2023.189:p.110734.
49. Mallick, P. K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC press.2007.
50. Alam, S., Habib, F., Irfan, M., Iqbal, W., & Khalid, K., Effect of orientation of glass fiber on mechanical properties of GRP composites. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 2010. 32(3):p.265-269.
51. Chawla K. *Fibrous materials*. Cambridge: Cambridge University Press.2016.
52. R.A. Shenoi, J.F. Wellicome, *Composite materials in maritime structures*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1993.
53. De Lamotte, E., & Perry, A. J., Diameter and strain-rate dependence of the ultimate tensile strength and Young's modulus of carbon fibres. *Fibre Science and Technology*, 1970.3(2):p. 157-166.

54. J.L. Figueiredo, C.A. Bernardo, R. Baker, K. Hüttinger Carbon Fibers Filaments and Composites Springer Science & Business Media, 2013.
55. Gon, D., Das, K., Paul, P., & Maity, S., Jute composites as wood substitute. International Journal of Textile Science, 2012.1(6):p. 84-93.
56. H. Li, Y. Wei, L. Wang, A general model for predicting the off-axis performance of fiber reinforced composite materials Structures, 2021.34:p. 2087-2097.
57. David Müzel, S., Bonhin, E. P., Guimarães, N. M., & Guidi, E. S., Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. Polymers, 2020.12(4):p. 818.
58. Liu, D., Tang, Y., & Cong, W. L., A review of mechanical drilling for composite laminates. Composite structures, 2012.94(4):p. 1265-1279.
59. Xu, J., Mkaddem, A., & El Mansori, M., Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review. Composite Structures, 2016. 135:p.316-338.
60. Gay, D., Composite materials: design and applications. CRC Press. 2022.
61. Lee, S. C., Jeong, S. T., Park, J. N., Kim, S. J., & Cho, G. J., Study on drilling characteristics and mechanical properties of CFRP composites. Acta Mechanica Solida Sinica, 2008.21(4):p.364-368.
62. Tsai, S. W., & Hahn, H. T., Introduction to Composite Materials. (Retroactive Coverage). Technomic Publishing Company, Inc, 851 New Holland Ave, P. O. Box 3535, Lancaster, Pennsylvania 17604, USA, 1980:p. 455.
63. Springer, G. S., Environmental effects of composite materials(Book). Westport, CT, Technomic Publishing Co., Inc., 1981:p. 210.
64. Černý, I., & Mayer, R. M., Evaluation of static and fatigue strength of long fiber GRP composite material considering moisture effects. Composite structures, 2010.92(9):p. 2035-2038.
65. Thori, P., Sharma, P., & Bhargava, M., An approach of composite materials in industrial machinery: advantages, disadvantages and applications. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2013.2(12):p.350-355.
66. Kesarwani, P., Jahan, S., & Kesarwani, K., Composites: Classification and its manufacturing process. Int. J. Appl. Res, 2015.1:p.352-358.
67. Beşergil, B., Doğadan Teknolojiye Kompozitler Temel İlkeler, ISBN 978-605- 344-391-9. Gazi Kitabevi. 2016.

68. Dominic, M., & Nandakumar, C. G., 'Investigations on Strength and Sustainability of Nonmetallic Laminated Composite Ship Structure (Doctoral dissertation, Cochin University of Science and Technology).2016.
69. Delzendehrooy, F.; Akhavan-Safar, A.; Barbosa, A.; Beygi, R.; Cardoso, D.; Carbas, R.; Marques, E.; da Silva, L. A comprehensive review on structural joining techniques in the marine industry. *Compos. Struct.* 2022. 289:p. 115490.
70. Gurit Holding, A. G., Guide to Composites. Available URL <http://www.netcomposites.com>, 74. 2000.
71. Kaw, A.K. *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed.; Taylor & Francis: Boca Raton, FL, USA, 2006.
72. Shelley JS, LeClaire R, Nichols J., Metal-matrix composites for liquid rocket engines. *JOM*. 2001.53(4):p.18–21.
73. Kootsookos, A., & Mouritz, A. P., Seawater durability of glass-and carbon-polymer composites. *Composites science and technology*, 2004.64(10-11):p.1503-1511.
74. Sauer, J. A., & Hara, M., Effect of molecular variables on crazing and fatigue of polymers. In *Crazing in Polymers* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.2:p.69-118.
75. White, S. R., Sottos, N. R., & FI, P., Geubelle, JS Moore, M. R, Kessler, S. R, Sriram. EN Brown, and S. Viswanathan, Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, 2001.409(6822):p.794-797.
76. Chen, X., Dam, M. A., Ono, K., Mal, A., Shen, H., Nutt, S. R., ... & Wudl, F., A thermally re-mendable cross-linked polymeric material. *Science*, 2002. 295(5560), 1698-1702.
77. Baley, C., Davies, P., Grohens, Y., & Dolto, G., Application of interlaminar tests to marine composites. A literature review. *Applied composite materials*, 2004. 11:p. 99-126.
78. Al-Furjan, M. S. H., Shan, L., Shen, X., Zarei, M. S., Hajmohammad, M. H., & Kolahchi, R. , A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar Fiber Reinforced Polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*.2022.
79. Gellert, E. P., & Turley, D. M. , Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999.30(11):p.1259-1265.

80. Siriruk, A., Penumadu, D., & Weitsman, Y. J., Effect of sea environment on interfacial delamination behavior of polymeric sandwich structures. *Composites Science and Technology*, 2009.69(6):p.821-828.
81. Johnson, T., Thermoplastic vs. Thermoset Resins. About. com Composites/Plastics. Np, nd Web, 25.2013.
82. Vaddadi, P., Nakamura, T., & Singh, R. P., Inverse analysis for transient moisture diffusion through fiber-reinforced composites. *Acta materialia*, 2003.51(1):p. 177-193.
83. Melo, R. Q. C., Santos, W. R. G., Barbosa de Lima, A. G., Lima, W. M. P. B., Silva, J. V., & Farias, R. P., Water absorption process in polymer composites: Theory analysis and applications. *Transport Phenomena in Multiphase Systems*, 2018:p.219-249.
84. Bradley, W. L., & Grant, T. S., The effect of the moisture absorption on the interfacial strength of polymeric matrix composites. *Journal of materials science*, 1995.30:P.5537-5542.
85. Kootsookos, A., & Mouritz, A. P., Seawater durability of glass-and carbon-polymer composites. *Composites science and technology*, 2004.64(10-11):P. 1503-1511
86. Vodicka, R., Accelerated environmental testing of composite materials. Defence Science and Technology Organisation Canberra (Australia), 1998.
87. Idrisi, A. H., & Mourad, A. H. I., Fiber reinforced polymer composites sustainability under prolonged exposure to hot seawater: Experimental and prediction study. *Materials Letters*, 2021.304:P.130689.
88. Weitsman, Y. J., & Weitsman, Y. J., Effects of Fluids on Mechanical Properties and Performance. *Fluid Effects in Polymers and Polymeric Composites*, 2012:P.123-144.
89. Zheng, Q., & Morgan, R. J., Synergistic thermal-moisture damage mechanisms of epoxies and their carbon fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 1993. 27(15):P. 1465-1478.
90. DeIasi R, Whiteside JB. Effect of moisture on epoxy resins and composites. *Adv Compos Mater-Environ Effects*. ASTM, 1978:p. 2–20.
91. Adams, R. D., & Singh, M. M., The dynamic properties of fibre-reinforced polymers exposed to hot, wet conditions. *Composites Science and Technology*, 1996.56(8):p. 977-997.

92. Soutis, C., & Turkmen, D., Moisture and temperature effects of the compressive failure of CFRP unidirectional laminates. *Journal of Composite Materials*, 1997.31(8):p. 832-849.
93. Shen, C. H., & Springer, G. S., Moisture absorption and desorption of composite materials. *Journal of composite materials*,1976.10(1):p.2-20.
94. Fick, A.,Ueber diffusion. *Annalen der Physik*, 1855.170(1):p. 59-86.
95. Saidane, E. H., Scida, D., Assarar, M., & Ayad, R., Assessment of 3D moisture diffusion parameters on flax/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*,2016. 80:p. 53-60.
96. Bonniau, P. A., & Bunsell, A. R. , A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 1981.15(3):p.272-293.
97. Ellyin, F., & Rohrbacher, C., Effect of aqueous environment and temperature on glass-fibre epoxy resin composites. *Journal of reinforced plastics and composites*,2000. 19(17):p.1405-1427.
98. Ray, B. C.,Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. *Journal of colloid and interface science*, 2006.298(1):p. 111-117.
99. Visco, A. M., Calabrese, L., & Cianciafara, P., Modification of polyester resin based composites induced by seawater absorption. *Composites part A: applied science and manufacturing*, 2008.39(5):p. 805-814.
100. Abdurohman, K., Adhitya, M., & Nugroho, A., Durability Study of Glass/Carbon Hybrid Composites Immersed in Seawater for Marine Application. *Key Engineering Materials*,2023. 941:p. 241-247.
101. Bhat, R., Mohan, N., Sharma, S., & Rao, S., Influence of seawater absorption on the hardness of glass fiber/polyester composite. *Journal of Computers, Mechanical and Management*,2022. 1(1):p. 01-11.
102. Beura, S., Chakraverty, A. P., Pati, S. N., Pradhan, D. D., Thatoi, D. N., & Mohanty, U. K., Effect of salinity and strain rate on sea water aged GFRP composite for marine applications. *Materials Today Communications*,2023. 34:p. 105056.
- 103.Loos, A. C., & Springer, G. S., Curing of epoxy matrix composites. *Journal of composite materials*, 1983.17(2):p. 135-169.

104. White, S. R., & Hahn, H. T., Process modeling of composite materials: residual stress development during cure. Part II. Experimental validation. *Journal of composite materials*,1992.26(16):p. 2423-2453.
105. Czaderski, C., Martinelli, E., Michels, J., & Motavalli, M., Effect of curing conditions on strength development in an epoxy resin for structural strengthening. *Composites Part B: Engineering*,2012. 43(2):p. 398-410.
106. Kini, M. V., & Pai, D., The ageing effect on static and dynamic mechanical properties of fibre reinforced polymer composites under marine environment-A review. *Materials Today: Proceedings*, 2022.52:p.689-696.
107. Joshi, O. K., The effect of moisture on the shear properties of carbon fibre composites. *Composites*, 1983.14(3):p. 196-200.
108. Berketis, K., & Tzetzis, D., Long-term water immersion ageing characteristics of GFRP composites. *Journal of materials science*,2009. 44:p.3578-3588.
109. Cao, S., Zhis, W. U., & Wang, X.,Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures. *Journal of composite materials*,2009. 43(4):p. 315-330.
110. Bazli, M., Ashrafi, H., & Oskouei, A. V., Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. *Composites Part B: Engineering*, 2016.99:p.203-215.
- 111.Baghad, A., El Mabrouk, K., Vaudreuil, S., & Nouneh, K., Effects of high operating temperatures and holding times on thermomechanical and mechanical properties of autoclaved epoxy/carbon composite laminates. *Polymer Composites*,2022.43(2):p.862-873.
112. Beura, S., Pradhan, D. D., Chakraverty, A. P., Thatoi, D. N., & Mohanty, U. K., Moisture effects leading to Tg depression in GFRP composites: An analysis. *Materials Today: Proceedings*,2022. 62:p. 5987-5991.
113. Xu, T., Li, G., & Pang, S. S., Effects of ultraviolet radiation on morphology and thermo-mechanical properties of shape memory polymer based syntactic foam. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*,2011. 42(10):p. 1525-1533.

114. Shokrieh, M. M., & Bayat, A., Effects of ultraviolet radiation on mechanical properties of glass/polyester composites. *Journal of Composite materials*, 2007.41(20):p. 2443-2455.
115. Lu, T., Solis-Ramos, E., Yi, Y., & Kumosa, M. , UV degradation model for polymers and polymer matrix composites. *Polymer degradation and stability*, 2018.154:p.203-210.
116. Wolff, E. G., Moisture effects on polymer matrix composites. *SAMPE Journal(USA)*, 1993.29(3):p.11-19.
117. Liao, K., Schultesiz, C. R., Hunston, D. L., & Brinson, L. C., Long-term durability of fiber-reinforced polymer-matrix composite materials for infrastructure applications: a review.,1998.
118. Hinderliter, B., & Croll, S., Monte Carlo approach to estimating the photodegradation of polymer coatings. *JCT research*, 2005.2(6):p. 483-492.
119. Karbhari, V. M., *Durability of Composites for Civil Structural Applications*, Abington Cambridge.2007.
120. Mouzakis, D. E., Zoga, H., & Galiotis, C., Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs). *Composites part B: engineering*, 2008.39(3):p. 467-475.
121. Litherland, K. L., Oakley, D. R., & Proctor, B. A. (1981). The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites. *Cement and concrete research*, 11(3), 455-466.
- Litherland, K. L., Oakley, D. R., & Proctor, B. A. (1981). The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites. *Cement and concrete research*, .1981.11(3):p.455-466.
122. Zor,M. Kompozit Malzemeler Ders Notları,DEU Makine Mühendisliği Bölümü,2023.
123. Kesarwani, P., Jahan, S., & Kesarwani, K., Composites: Classification and its manufacturing process. *International Journal of Applied Research*, 2015.1(9):p. 352-358.
124. Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F., & Carlone, P., Marine application of fiber reinforced composites: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*,2020.8(1):p. 26.

125. Malekinejad, H., Carbas, R. J., Akhavan-Safar, A., Marques, E. A., Castro Sousa, F., & da Silva, L. F., Enhancing Fatigue Life and Strength of Adhesively Bonded Composite Joints: A Comprehensive Review. *Materials*, 2023.16(19):p. 6468.
126. Delzendehrooy, F., Akhavan-Safar, A., Barbosa, A. Q., Beygi, R., Cardoso, D., Carbas, R. J. C., ... & Da Silva, L. F. M., A comprehensive review on structural joining techniques in the marine industry. *Composite Structures*, 2022.289:p.115490.
127. Li, G., Pang, S. S., Woldesenbet, E., Stubblefield, M. A., Mensah, P. F., & Ibekwe, S. I., Investigation of prepreg bonded composite single lap joint. *Composites Part B: Engineering*, 2001.32(8):p.651-658.
128. Budhe, S., Banea, M. D., De Barros, S., & Da Silva, L. F. M., An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2017.72:p. 30-42.
129. Anekar, N., Shaikh, S., Kanase, P., Patil, A., & Tarate, S., Single Lap Adhesive Joint (SLAJ): A Study. *International Journal of Current Engineering and Technology*.4,2017.
130. Özkan, Ö. Z., & Halil, Ö. Z. E. R., Hibrit Yapıştırma-Düzeninin Bindirme Bağlantı Mukavemetine Etkileri. *Mühendis ve Makina*, 2016.57(679):p. 63-72.
131. Jeevi, G., Nayak, S. K., & Abdul Kader, M., Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2019. 33(14):p.1497-1520.
132. Banea, M. D., & da Silva, L. F., Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2009.223(1):p. 1-18.
133. Campbell FC. *Joining: understanding the basics*. Cleveland, OH: ASM International, 2011:p.336.
134. Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F., & Carlone, P., Marine application of fiber reinforced composites: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020.8(1):p. 26.
135. Sutherland, L. S., A review of impact testing on marine composite materials: Part I– Marine impacts on marine composites. *Composite Structures*, 2018.188:p. 197-208.
136. Wang, X. E., Kanani, A. Y., Gu, Z., Yang, J., Ye, J., & Hou, X., Investigation on the transitional micromechanical response of hybrid composite adhesive joints by a novel adaptive DEM model. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023.124:p. 103760.

137. Croccolo, D., De Agostinis, M., Fini, S., & Olmi, G., Influence of the engagement ratio on the shear strength of an epoxy adhesive by push-out tests on pin-and-collar joints: Part I: Campaign at room temperature. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016. 67:p. 69-75.
138. Öndürücü, A., & Muzoğlu, M., Doğal Lif Takviyeli Kompozitlerin Burkulma Davranışına Deniz Suyunun Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2019. 23(1):p. 30-39.
139. Al Azzawi, W. S., Kadhim, H., & Jomah, A. J. S., Mechanical Properties Characterization of Glass/Carbon Fiber Hybrid Multilayer Composite under Environmental Aging Condition. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 2024.94:p.102.
140. Alam, P., Robert, C., & Brádaigh, C. M. Ó., Tidal turbine blade composites-A review on the effects of hygrothermal aging on the properties of CFRP. *Composites Part B: Engineering*, 2018. 149:p.248-259.
141. Ashcroft, I. A., Hughes, D. J., & Shaw, S. J., Adhesive bonding of fibre reinforced polymer composite materials. *Assembly Automation*, 2000. 20(2):p. 150-161.
142. Sjoblom, P. O., Hartness, J. T., & Cordell, T. M., On low-velocity impact testing of composite materials. *Journal of composite materials*, 1988.22(1):p. 30-52.
143. Zainudin, M., Diharjo, K., Kaavessina, M., Setyanto, D., & Ubaidillah, U. (2022). Industrial Implementation of Aluminum Trihydrate-Fiber Composition for Fire Resistance and Mechanical Properties in Glass-Fiber-Reinforced Polymer Roofs. *Polymers*, 14(7), 1273.
144. Kayalı, E. S. (1996). Metalik malzemelerin mekanik deneyleri. İTÜ.
145. Brostow, W., & Hagg Lobland, H. E., Brittleness of materials: implications for composites and a relation to impact strength. *Journal of materials science*, 2010.45:p. 242-250.
146. Bend Testing: Evaluation of Strength and Ductility of Materials, biopdi, 2023. [Erişim tarihi: 21 Eylül 2023]; Erişim yeri: <https://biopdi.com/bend-testing/>
147. ASTM D790; Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017.
148. Sun, L.; Gibson, R.F.; Gordaninejad, F.; Suhr, J. Energy absorption capability of nanocomposites: A review. *Compos. Sci. Technol.* 2009, 69, 2392–2409.

149. Vaidya, A.; Pathak, K. Mechanical stability of dental materials. In *Applications of Nanocomposite Materials in Dentistry*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2019; pp. 285–305.
150. Sultan, M. T. H., Hodzic, A., Staszewski, W. J., & Worden, K., A SEM-based study of structural impact damage. *Applied Mechanics and Materials*, 2010.24:p. 233-238.
151. Kaware, K., & Kotambkar, M., Low velocity impact response and influence of parameters to improve the damage resistance of composite structures/materials: a critical review. *International journal of crashworthiness*, 2022.27(4):p. 1232-1256.
152. Iannucci, L., Dechaene, R., Willows, M., & Degrieck, J., A failure model for the analysis of thin woven glass composite structures under impact loadings. *Computers & Structures*, 2001.79(8):p. 785-799.
153. Li, Y., Mai, Y. W., & Ye, L., Effects of fibre surface treatment on fracture-mechanical properties of sisal-fibre composites. *Composite Interfaces*, 2005.12(1-2):p. 141-163.
154. Meola, C., & Carlomagno, G. M., Impact damage in GFRP: new insights with infrared thermography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010. 41(12):p.1839-1847.
155. Sun, X. C., Wisnom, M. R., & Hallett, S. R., Interaction of inter-and intralaminar damage in scaled quasi-static indentation tests: Part 2–Numerical simulation. *Composite Structures*, 2016.136:p. 727-742.
156. Wagih, A., Maimí, P., Blanco, N., & Costa, J., A quasi-static indentation test to elucidate the sequence of damage events in low velocity, 2016.
157. Safri, S.N.A.B.; Sultan, M.T.H.; Jawaaid, M. Damage Analysis of Glass Fiber Reinforced Composites. In *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*; Jawaaid, M., Thariq, M., Saba, N., Eds.; Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2019;p. 133–147.
158. Ogin, S.L.; Brøndsted, P.; Zangenberg, J. Composite materials: Constituents, architecture, and generic damage. In *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*; Talreja, R., Varna, J., Eds.; Elsevier Ltd.: London, UK, 2016; p. 3–23.

159. Kistler, L. S., & Waas, A. M., On the response of curved laminated panels subjected to transverse impact loads. *International journal of solids and structures*, 1999.36(9):p.1311-1327.
160. Ganapathy, S., & Rao, K. P., Failure analysis of laminated composite cylindrical/spherical shell panels subjected to low-velocity impact. *Computers & structures*, 1998.68(6):p. 627-641.
161. Tuo, H., Lu, Z., Ma, X., Xing, J., & Zhang, C., Damage and failure mechanism of thin composite laminates under low-velocity impact and compression-after-impact loading conditions. *Composites Part B: Engineering*, 2019.163:p. 642-654.
162. Liao, B., Zhou, J., Li, Y., Wang, P., Xi, L., Gao, R., ... & Fang, D., Damage accumulation mechanism of composite laminates subjected to repeated low velocity impacts. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020.182:p.105783.
163. Ramesh, M., Palanikumar, K., & Reddy, K. H., Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites. *Composites Part B: Engineering*, 2013.48:p. 1-9.
164. Sen, R. (2003). Durability of advanced composites in a marine environment. *International Journal of Materials and Product Technology*, 19(1-2), 118-129.
165. Pender, K., & Yang, L. (2024). Glass fibre composites recycling using the fluidised bed: a comparative study into the carbon footprint in the UK. *Sustainability*, 16(3), 1016.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Dudu MERTGENÇ YOLDAŞ

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : Ayfon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Bölümü (2007-2009)

Lisans : Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü (2003-2007)

İŞ TECRÜBESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Meslek Yüksekokulu, Öğretim Görevlisi, 2010-Devam Ediyor

PROJELER

TÜBİTAK, Elektromekanik Ürünler için Bir Tasarım Sistemi Geliştirilmesi, 2008-2009

YÖNETİMSEL GÖREVLER

Program Koordinatörü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 2016-2020

VERDİĞİ DERSLER

Makine Elemanları, Mekanizma Tekniği, Meslek Resim, Bilgisayar Destekli Tasarım, Aparat Tasarımı, Makine Tasarımı, Saç Metal Kalıp Tasarımı, Projelendirme Tekniği

AKADEMİK YAYINLAR

Makale:

Atakok, G., & Mertgenc Yoldas, D. (Aralık 2024). Comparison of GFRP (Glass Fiber-Reinforced Polymer) and CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymer) Composite Adhesive-Bonded Single-Lap Joints Used in Marine Environments. *Sustainability*, 16(24), 11105. <https://doi.org/10.3390/su162411>

Kitap Bölümleri:

MERTGENÇ YOLDAŞ, D., (2024). Investigation of Teeth in Connection Used in Marine Oil Extraction. *INTERDISCIPLINARY ADVANCES IN ENGINEERING, AGRICULTURE, AND APPLIED SCIENCES* (pp.53-75), Delaware: BZT TURAN PUBLISHING HOUSE.

ATAKÖK, G., & MERTGENÇ YOLDAŞ, D., (2024). An Overview of Composite Materials for Marine Applications. *INTERDISCIPLINARY ADVANCES IN ENGINEERING, AGRICULTURE, AND APPLIED SCIENCES* (pp.20-41), Delaware: BZT TURAN PUBLISHING HOUSE.

Bildiri:

Otobüs Koltuklarının İncelenmesi ve Bir Tasarım Modelinin Oluşturulması, 3'rd International Symposium on Industrial Design Engineering (ISIDE 2018), Kasım 2018