



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

POLİETİLEN MATRİSLİ TUZLU SU
ORTAMINDA YAŞLANDIRILAN HİBRİT
KOMPOZİT MALZEMELERİN DÜŞÜK HIZLI
DARBE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Tuncay ATEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Tuncay ATEŞ tarafından hazırlanan “polietilen matrisli tuzlu su ortamında yaşlandırılan hibrit kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe özelliklerinin belirlenmesi” adlı tez çalışması 17/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Mürsel EKREM
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Gürol ÖNAL
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Abdullah ASLAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 241010030 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Tuncay ATEŞ

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANSTEZİ

POLİETİLEN MATRİSLİ TUZLU SU ORTAMINDA YAŞLANDIRILAN HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Tuncay ATEŞ

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

Danışman: Doç. Dr. Gürol ÖNAL

2025, 112 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Gürol ÖNAL
Doç. Dr. Abdullah ASLAN
Doç. Dr. Mürsel EKREM**

Bu çalışmamda, deniz ortamını simüle eden %3 NaCl içeren tuzlu su koşullarında yaşlandırılan polietilen (PE) matrisli hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. PE matris içerisine bazalt, cam ve karbon elyafları tekli ve farklı hibrit kombinasyonlarda takviye edilerek plakalar üretilmiş, numuneler 0, 1, 2, 3 ve 5 ay süreyle yaşlandırılmıştır. ASTM standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen eksenel çekme, üç nokta eğilme ve düşük hızlı darbe testleri sonucunda yaşlandırma süresi arttıkça tüm kompozitlerin eğilme dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Karbon elyaf takviyeli PE kompozitler, 0. ayda yaklaşık 17 MPa olan eğilme dayanımını 5. ay sonunda yaklaşık 10 MPa seviyesinde koruyarak en yüksek çevresel direnç göstermiştir. Cam elyaf takviyeli PE kompozitlerde ise başlangıçta 47 MPa seviyelerinde olan eğilme dayanımı, nem alma ve ara yüzey bağ zayıflığı nedeniyle 5 ay sonunda %60'tan fazla azalarak yaklaşık 17 MPa seviyesine gerilemiştir. Bazalt elyaf takviyeli PE kompozitlerin başlangıç eğilme dayanımı 28 MPa civarında iken, 5. ayda yaklaşık 10 MPa seviyelerine düşerek cam elyaftan daha iyi, karbon elyaftan daha düşük performans sergilemiştir. Düşük hızlı darbe testinde cam-karbon-bazalt hibrit takviyeli kompozitlerde 1. ayda yaklaşık 30 J enerji absorpsiyonu kaydedilmiş, bu değer 5. ayda yaklaşık 22 J seviyesine düşerek %27 oranında bir azalma göstermiştir. Hibrit kompozitlerin, elyaf kombinasyonlarının avantajlarını bir araya getirerek başlangıç mukavemetini iyileştirdiği, yaşlanmaya bağlı deformasyonları kontrol altında tutarak çatlak ilerlemesini geciktirdiği ve enerji absorpsiyon kapasitesini artırdığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, PE matrisli hibrit kompozitlerin deniz ortamı gibi korozyon koşullar altında darbe dayanımı gerektiren uygulamalar için uygun malzeme adayları olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Bazalt, hibrit kompozit, polietilen, tuzlusu

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF LOW-VELOCITY IMPACT PROPERTIES OF POLYETHYLENE MATRIX HYBRID COMPOSITE MATERIALS AGED İİN SALINE ENVIRONMENT

Tuncay ATEŞ

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

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Gürol ÖNAL

2025, 112 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Gürol ÖNAL
Assoc. Prof. Dr. Abdullah ASLAN
Assoc. Prof. Dr. Mürsel EKREM**

In this study, the low-velocity impact behavior of polyethylene (PE) matrix hybrid composites aged in a saline environment was investigated under simulated marine conditions containing 3 wt.% NaCl. Basalt, glass, and carbon fibers were used as reinforcements individually and in hybrid configurations within the PE matrix to fabricate composite plates, which were aged for 0, 1, 2, 3, and 5 months. Following the aging process, axial tensile, three-point bending, and low-velocity impact tests were performed according to ASTM standards. The results revealed a noticeable decline in flexural strength across all composites with increased aging duration. Carbon fiber-reinforced PE composites exhibited the highest resistance to environmental degradation, maintaining a flexural strength of approximately 10 MPa at the end of the 5th month, down from around 17 MPa at the initial state. Glass fiber-reinforced PE composites showed a significant reduction in flexural strength, dropping from about 47 MPa initially to around 17 MPa after 5 months due to moisture absorption and weak interfacial bonding, corresponding to a reduction of over 60%. Basalt fiber-reinforced PE composites demonstrated an initial flexural strength of 28 MPa, which decreased to around 10 MPa by the 5th month, indicating intermediate environmental durability. In low-velocity impact tests, glass-carbon-basalt hybrid composites exhibited an energy absorption of approximately 30 J at the 1st month, which decreased to around 22 J by the 5th month, reflecting a reduction of 27%. The study concluded that hybrid composites provide improved initial mechanical strength, control deformation under aging, delay crack propagation, and enhance energy absorption capacity by combining the advantages of different fiber types. The findings demonstrate that PE matrix hybrid composites are promising candidates for marine and outdoor applications requiring impact resistance under corrosive conditions.

Keywords: Basalt, hybridcomposite, polyethylene, saline

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimde her türlü bilimsel bilgi ve tecrübesiyle desteklerini, görüş ve önerilerini esirgemeyen Doç. Dr. Gürol Önal'a çok değerli katkılarından ötürü teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Tez çalışmam süresi boyunca bana her türlü zamanını ayırıp imalat ve test aşamalarımnda asla tereddüt etmeden destek olan Öğr. Gör. Muhammed Hüseyin Güzel'e, Dr. Öğr. Üyesi Okan Demir' e ve Arş. Gör. Ahmet Caner Tatar'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Necmettin Erbakan Üniversitesi Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi akademisyenlerinden Prof. Dr. Hüseyin Arıkan'a ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kayırcı' ya teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tezi tamamlayabilmem için bana 241010030 nolu proje ile maddi destek sağlayan, Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne (BAP-KTUN) teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her anında yanımda olan desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Arş. Gör. Dr. Fatma Ateş'e, anneme, babama, kardeşlerime ve beni örnek alacaklarını söyleyen çocuklarıma teşekkürlerimi, minnet ve saygılarımı sunarım.

Tuncay ATEŞ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi.....	2
1.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	3
1.2.1. Havacılık, uzay ve savunma sanayi	4
1.2.2. Denizcilik ve deniz taşımacılığı.....	4
1.2.3. Otomotiv sektörü	4
1.2.4. Ulaştırma sektörü	4
1.2.5. İnşaat ve yapı sektörü	4
1.2.6. Diğer endüstriyel ve günlük kullanım alanları	5
1.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	5
1.3.1. Avantajları	5
1.3.2. Dezavantajları	6
1.4. Geliştirilmesi Beklenen Özellikler	6
1.5. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	7
1.5.1. Takviye fazına göre kompozit malzemeler.....	7
1.5.2. Matris fazına göre kompozit malzemeler	9
1.5.3. Hibrit kompozitler.....	10
1.5.4. Nano takviyeli kompozitler	10
1.5.5. Hibrit-nano kompozit malzemeler	10
1.6. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Performansı	12
1.6.1. Darbe etkisi ve hasar oluşumu	12
1.6.2. Darbe testlerinin önemi.....	13
1.6.3. Kullanılan test yöntemleri.....	13
1.6.4. Sonuç ve değerlendirme.....	14
1.7. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Düşük Hızlı Darbe Etkisi	14
1.7.1. Düşük hızlı darbe sonucu oluşan hasar modları	14
1.7.2. Darbe tepkisinin değerlendirilmesi	15
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1. Malzemeler.....	19
3.1.1. Düşük yoğunluklu polietilen.....	19
3.1.2. Bazalt fiber.....	20
3.1.3. Cam fiber	21

3.1.4.	Karbon fiber	23
3.2.	Hibrit Kompozit Malzeme Üretimi	24
3.3.	Deney Numunelerinin Üretimi	29
3.4.	Deney Numunelerinin Markalanması ve Şartlandırılmış Ortam Hazırlığı	30
3.5.	Eksenel Çekme Testi	31
3.6.	Üç Nokta Eğilme Testi	33
3.7.	Düşük Hızlı Darbe Deneyi	36
3.8.	Analizler	38
3.8.1.	Taramalı elektron mikroskobu görüntü analizi	39
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	40
4.1.	Eksenel Çekme Testi	40
4.1.1.	Bazalt - polietilen kompozit eksenel çekme testi	40
4.1.2.	Karbon - polietilen kompozit eksenel çekme testi	42
4.1.3.	Cam - polietilen kompozit eksenel çekme testi	43
4.1.4.	Bazalt - cam – polietilen kompozit eksenel çekme testi	45
4.1.5.	Bazalt -karbon – polietilen kompozit eksenel çekme testi	47
4.1.6.	Cam -bazalt -karbon – polietilen kompozit eksenel çekme testi	49
4.1.7.	Kompozit elyafların aylara göre çekme testi gerilme dağılımı	53
4.2.	Üç Nokta Eğilme Testi	55
4.2.1.	Bazalt–polietilen kompozit üç nokta eğilme testi	55
4.2.2.	Karbon–polietilen kompozit üç nokta eğilme testi	57
4.2.3.	Cam–polietilen kompozit üç nokta eğilme testi	59
4.2.4.	Bazalt-cam–polietilen kompozit üç nokta eğilme testi	60
4.2.5.	Bazalt-karbon–polietilen kompozit üç nokta eğilme testi	62
4.2.6.	Cam–karbon–bazalt–polietilen kompozit üç nokta eğilme testi	64
4.2.7.	Kompozit elyafların aylara göre eğilme testi gerilme dağılımı	67
4.3.	Düşük Hızlı Darbe Testi	69
4.3.1.	Bazalt – polietilen kompozit düşük hızlı darbe testi	70
4.3.2.	Karbon – polietilen kompozit düşük hızlı darbe testi	73
4.3.3.	Cam – polietilen kompozit düşük hızlı darbe testi	75
4.3.4.	Bazalt - cam – polietilen kompozit düşük hızlı darbe deneyi testi	78
4.3.5.	Bazalt - karbon – polietilen kompozit düşük hızlı darbe deneyi testi	80
4.3.6.	Cam - karbon - bazalt - polietilen kompozit düşük hızlı darbe deneyi testi	83
4.4.	Cam – PE ve Cam – Karbon – Bazalt PE Hibrit Kompozitelerinin Eğilme Deney Numunesi Sem Analizi	88
4.5.	Numunelerin Aylara Göre Su Alım Oranları	90
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
5.1.	Sonuçlar	93
5.2.	Öneriler	95
KAYNAKLAR	97	

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ρ :	Yoğunluk (g/cm ³ veya kg/m ³)
σ :	Gerilme (MPa)
ε :	Birim uzama
E :	Elastisite modülü, Young modülü (MPa)
F :	Kuvvet (N)
A :	Kesit alanı (mm ²)
ΔL :	Uzama miktarı (mm)
L_0 :	Başlangıç uzunluğu (mm)
a :	Numune genişliği (mm)
h :	Numune kalınlığı (mm)
d :	Delik çapı (mm)
t :	Zaman (saniye)
T :	Sıcaklık (°C)
v :	Darbe hızı (m/s)
J :	Darbe enerjisi (Joule)
m :	Kütle (g veya kg)
g :	Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s ²)
W :	Ağırlık (N)
D :	Delinme kuvveti (N)
α :	Isıl genleşme katsayısı (1/°C)
μ :	Poisson oranı

Kısaltmalar

ASTM :	American Society for Testing and Materials
CFRP :	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Elyaf Takviyeli Polimer)
CNT :	Carbon Nanotube (Karbon Nanotüp)
CTP :	Cam Takviyeli Plastik
DIC :	Digital Image Correlation (Dijital Görüntü Korelasyonu)
EPDM :	Etilen Propilen Dien Monomer
FTIR :	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi)
LDPE :	Low Density Polyethylene (Düşük Yoğunluklu Polietilen)
MD :	Machine Direction (Makine Yönü)
MWCNT :	Multi-Walled Carbon Nanotube (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp)
PE :	Polietilen
PEEK :	Polyether Ether Ketone
PMK :	Polimer Matrisli Kompozit
PVC :	Polivinil Klorür
SEM :	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SWCNT :	Single-Walled Carbon Nanotube (Tek Duvarlı Karbon Nanotüp)
TD :	Transverse Direction (Enine Yön)
TPU :	Termoplastik Poliüretan
VARTM :	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama)

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, son yıllarda malzeme mühendisliğinde önemli bir araştırma ve uygulama alanı haline gelmiştir. Farklı fazlardaki malzemelerin bir araya getirilerek elde edildiği bu yapılar, bireysel bileşenlerinin sahip olmadığı üstün mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler sunabilmektedir. Özellikle elyaf takviyeli polimer kompozitler, yüksek özgül mukavemetleri, hafiflikleri, korozyona karşı dirençleri ve kolay şekillendirilebilirlikleri sayesinde otomotiv, havacılık, denizcilik, inşaat ve savunma sanayi gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerde kullanılan elyaf türü, nihai ürünün performansını doğrudan etkilemektedir. Cam elyaf, düşük maliyeti ve iyi mekanik özellikleri ile yaygın olarak tercih edilirken; karbon elyaf, yüksek çekme dayanımı ve rijitliği ile öne çıkmaktadır. Bazalt elyaf ise doğal bir kaynak olması, yüksek sıcaklık dayanımı ve iyi kimyasal direnç özellikleri ile son yıllarda giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Bu elyaf türlerinin belirli oran ve dizilimlerde birlikte kullanılmasıyla oluşturulan hibrit kompozit yapılar, bireysel elyafların avantajlarını bir araya getirerek dengeli mekanik ve fiziksel özellikler sunabilmektedir. Bu sayede maliyet-performans optimizasyonu sağlanabilirken, farklı uygulama alanları için özelleştirilmiş çözümler geliştirilebilmektedir. Kompozit malzemelerde matris fazı da en az elyaf kadar önemlidir. Geleneksel olarak kullanılan termoset reçineler, yüksek mekanik özellikler sunsa da geri dönüştürülemez olmaları ve üretim sırasında çevreye zarar verebilecek kimyasal bileşenler içermeleri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından bazı dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle, çevre dostu, geri dönüştürülebilir ve düşük işleme sıcaklıklarına sahip termoplastik polimerler alternatif matris malzemeleri olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir seçenek olup aynı zamanda iyi işlenebilirlik, darbe dayanımı ve nem direnci gibi avantajlar sunmaktadır. Kompozit yapıların uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi için, çevresel koşullar altında zamanla maruz kaldıkları değişimlerin anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Tuzlu su gibi korozif ortamlarda gerçekleşen yaşlanma süreçleri, özellikle polimer matrisli kompozitlerde su alımı, matriste plastikleşme, elyaf-matris ara yüzeyinin zayıflaması gibi etkilerle mekanik özelliklerin zamanla bozulmasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda, yaşlandırma testleri ve bu testler sırasında malzemede meydana gelen mekanik performans değişimlerinin belirlenmesi, kompozitlerin denizcilik ve açık hava

uygulamaları gibi zorlu çevresel koşullardaki davranışlarının öngörülebilmesi açısından kritik rol oynamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, cam, karbon ve bazalt elyaflarının farklı dizilimlerle (Bazalt-PE, cam – PE, karbon – PE, bazalt cam – PE, bazalt – karbon – PE, cam – karbon – bazalt – PE) LDPE matris içerisinde birleştirilmesiyle hibrit kompozit plakalar üretilen numuneler, ağırlıkça %3 tuz konsantrasyonuna sahip tuzlu su ortamında 6 aylık yaşlanmaya tabi tutulacak ve belirli aralıklarla (0, 1, 2, 3 ve 5 ay) aksel çekme, üç nokta eğilme ve düşük hızlı darbe deneyleri uygulanarak mekanik özelliklerdeki değişimler gözlemlenecektir. Elde edilen sonuçlar hem hibrit yapının performansına hem de çevresel koşulların etkisine ışık tutacak ve literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırılarak değerlendirilecektir. Böylece, çevre dostu termoplastik matrisli hibrit kompozitlerin deniz ortamı gibi zorlu koşullar altındaki davranışları hakkında daha bütüncül bir anlayış geliştirilmesi hedeflenmektedir.

1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi oldukça eskiye, insanlık tarihinin ilk yerleşik toplumlarına kadar uzanmaktadır. Bu malzemelerin ilk örneklerinden biri antik Mısır'da milattan önceki dönemlerde çamur ve saman karışımı kullanılarak yapılan tuğlalardır. Bu yapı malzemesi, samanın çamur içerisinde elyaf takviyesi olarak görev yapmasıyla daha yüksek dayanım ve çatlak direnci sağlamıştır. Böylece günümüzde “kompozit” olarak tanımlanan yapıların ilkel örnekleri ortaya çıkmıştır. Kompozit kullanımının ikinci dikkat çekici örneği ise, milattan sonra 1200'lü yıllarda Moğollar tarafından geliştirilen kompozit yaylardır. Bu yaylar, ahşap, kemik ve hayvan sinirlerinin belirli bir teknikle bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş ve üstün mekanik performansları sayesinde dönemin savaş teknolojisinde devrim niteliği taşımıştır. Sanayi Devrimi'ne kadar kompozit malzemelerde genellikle doğal kaynaklı reçineler (bitkisel ve hayvansal kökenli) kullanılmıştır. Ancak 20. yüzyılın başlarından itibaren sentetik polimerlerin geliştirilmesiyle birlikte, kompozit malzeme teknolojisi büyük bir ivme kazanmıştır. Vinil, polistiren, fenolik ve polyester gibi sentetik reçineler, doğal muadillerine kıyasla daha üstün mekanik ve termal özellikler sunmuş, bu da kompozit malzemelerin çeşitli sanayi dallarında kullanımını yaygınlaştırmıştır.

1935 yılında Owens Corning firması, cam elyaf takviyeli plastik (fiberglas) üretimini gerçekleştirmiş ve bu malzemenin hafifliği, yüksek dayanımı ve korozyon direnci sayesinde birçok uygulama alanında tercih edilmesine olanak sağlamıştır. 1946

yılında ise ilk cam elyaf takviyeli plastikten yapılmış ticari tekne gövdesi piyasaya sürülerek, kompozitlerin denizcilik sektörüne de entegre edilmesi sağlanmıştır. 1970’li yıllara gelindiğinde kompozit endüstrisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş, özellikle reçine teknolojisindeki gelişmeler ve yeni nesil takviye elemanlarının geliştirilmesi bu alanda büyük sıçramalara neden olmuştur. Bu dönemde DuPont firması tarafından geliştirilen ve ticari adı Kevlar olan aramid elyaf, yüksek çekme dayanımı, düşük yoğunluğu ve üstün enerji sönümleme kapasitesi sayesinde özellikle kişisel koruyucu ekipmanlarda (örneğin balistik yeleklerde) yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Kevlar’ın başarısının ardından karbon elyaf malzemelere olan ilgi artmış ve bu malzemeler, çeliğe göre çok daha hafif ve yüksek dayanımlı olmaları sayesinde otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde metal parçaların yerini almaya başlamıştır. Günümüzde kompozit malzemeler; savunma sanayi, uzay teknolojileri, otomotiv, inşaat, havacılık, spor ekipmanları ve enerji üretimi gibi pek çok alanda kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle rüzgâr enerjisi sektöründe, yüksek dayanımlı ve hafif yapılar gerektiren rüzgâr türbini kanatlarında kompozitlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin geçmişten günümüze uzanan gelişim süreci, teknolojik ilerlemeler ve malzeme bilimi alanındaki yeniliklerle birlikte daha da çeşitlenmekte ve gelecekte birçok alanda metalik malzemelere sürdürülebilir alternatifler sunmaya devam edeceği öngörülmektedir.

1.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanları hızla artmakta ve gelişen üretim teknolojileri sayesinde bu malzemeler, savunma sanayinden sağlık sektörüne kadar birçok alanda kritik öneme sahip hale gelmektedir. Kompozitlerin sunduğu yüksek performans, hafiflik, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi avantajlar, onları geleneksel malzemelere göre daha cazip kılmıştır. Nitekim, bu durum kompozitlerin pek çok uygulama alanında tercih edilmesini adeta kaçınılmaz hale getirmiştir. Ancak kompozit malzeme üretiminde, parçadan beklenen mekanik ve fiziksel özelliklerin yanı sıra, kullanım alanı, maruz kalacağı çevresel koşullar ve tercih edilecek üretim yöntemi gibi faktörler dikkatle değerlendirilmelidir. Aksi takdirde, beklenen performansa ulaşmak mümkün olmayabilir. Kompozitlerin kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir:

1.2.1. Havacılık, uzay ve savunma sanayi

Kompozit malzemeler, yüksek özgül mukavemet (dayanım/ağırlık oranı) ve yüksek elastiklik modülü gibi üstün mekanik özellikleri sayesinde havacılık, uzay ve savunma sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, düşük yoğunlukları sayesinde uçak ve uzay araçlarında yakıt tasarrufu sağlanmakta, bu da operasyonel verimliliği artırmaktadır. Geleneksel metalik malzemelere kıyasla daha düşük özgül ağırlığa sahip olmaları, bu sektörlerde kompozitlerin kullanımını daha da cazip hale getirmektedir (Yeşildal, 2010).

1.2.2. Denizcilik ve deniz taşımacılığı

Denizcilik sektöründe kullanılan malzemelerden beklenen temel özellikler arasında yüksek korozyon direnci, düşük ağırlık ve hidrodinamik performans yer almaktadır. Bu ihtiyaçlara yanıt veren kompozit malzemeler, özellikle yat ve tekne gövdelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam elyaf takviyeli plastik (CTP) ile birlikte Balsa ve PVC köpük gibi çekirdek malzemelerin kullanıldığı sandviç yapılar, deniz taşıtlarının hem dayanıklılığını artırmakta hem de performansını iyileştirmektedir (Türkmen ve Durmuş, 2013).

1.2.3. Otomotiv sektörü

Otomotiv sektöründe kompozit malzemelerin öncelikli tercih edilme nedenleri arasında yakıt verimliliğini artırma ve güvenlik standartlarını karşılayabilme yetenekleri yer almaktadır. Hafif ve yüksek dayanımlı yapıları sayesinde, kompozit malzemeler araçların genel ağırlığını azaltarak enerji tüketimini düşürmektedir. Günümüzde pedallar, far muhafazaları, filtre kutuları, araç kaportaları ve cam silecekleri gibi birçok parça kompozitlerden üretilmektedir (Kıratlı, 2012; Baş, 2015).

1.2.4. Ulaşım sektörü

Toplu taşıma ve demiryolu araçlarında kullanılan kompozitler, özellikle hafiflikleri sayesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca tren, otobüs ve metro gibi araçlarda, darbelere ve çevresel etkilere maruz kalan parçaların sıklıkla değiştirilmesi gerekmektedir. Kompozit malzemeler bu noktada düşük maliyetli, uzun ömürlü ve dayanıklı çözümler sunmaktadır. Araç kabinleri, koltuklar, dış kaplamalar ve iç paneller gibi pek çok bileşen artık kompozitlerden imal edilmektedir (Onat, 2015).

1.2.5. İnşaat ve yapı sektörü

Kompozit malzemeler, inşaat sektöründe bina cephe kaplamaları, otobüs durakları, soğuk hava depoları, geçici yapı kalıpları ve taşıyıcı olmayan mimari elemanlarda kullanılmaktadır. Hafiflikleri, kolay taşınabilirlikleri, düşük bakım

gereksinimleri ve esnek tasarım olanakları, onları geleneksel yapı malzemelerine kıyasla oldukça avantajlı hale getirmektedir (Yeşildal, 2010).

1.2.6. Diğer endüstriyel ve günlük kullanım alanları

Kompozitlerin kullanım alanları yalnızca ağır sanayi ile sınırlı kalmamaktadır. Sağlık sektöründe protezler, ortopedik destekler ve tıbbi cihaz parçalarında; tarımda ekipman üretiminde, müzik aletlerinde ses performansını iyileştirmek için; eğlence ve lunapark ekipmanlarında ise darbe dayanımı ve esneklik sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Elektrik ve ısı yalıtımı gerektiren uygulamalarda da kompozit malzemeler, yüksek performans sunarak geleneksel malzemelere karşı üstünlük sağlamaktadır.

1.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki ya da daha fazla bileşenin makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşturulan, yeni ve işlevsel özellikler kazandırılmış malzeme türleridir. Bu malzemeler, modern mühendislik uygulamalarında yüksek performans beklentilerini karşılaması açısından genellikle yüksek kaliteli çözümler olarak kabul edilmektedir. Teknolojik ilerlemeler ve üretim tekniklerindeki gelişmeler sayesinde, kompozit malzemelerin üretim maliyetleri düşmekte ve kullanım alanları giderek genişlemektedir.

Kompozitler, özellikle düşük ağırlık, yüksek mukavemet, korozyon direnci, darbe dayanımı ve sertlik gibi kritik özellikleri bir arada sunabilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu malzemelerin her kullanım alanında aynı oranda avantaj sağlamadığı da unutulmamalıdır. Örneğin, kendi ağırlığı ile yük taşımayan ya da sabit pozisyonda çalışan bir yapı elemanında hafiflik, önemli bir özellik olarak kabul edilmeyebilir.

Ayrıca, kompozit bir ürünün değerlendirilmesi yalnızca başlangıç maliyetiyle sınırlı kalmamalı, ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca performansı, bakım ihtiyacı ve geri dönüştürülebilirliği de dikkate alınmalıdır. Örneğin, bir kalıbın üretim maliyeti yüksek olsa da, bu durum uzun vadede ürünün dayanıklılığı ve düşük bakım ihtiyacı ile toplam maliyeti azaltabilir.

1.3.1. Avantajları

Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin iyi yönlerinin bir araya getirilmesiyle elde edildikleri için birçok açıdan önemli avantajlar sunarlar. Bu avantajlardan bazıları şunlardır (Şahin, 2015; Yiğit, 2010; Onat, 2015):

- Yüksek mekanik özellikler (mukavemet, sertlik)
- Tasarım açısından esneklik (biçim ve malzeme seçeneği)
- Üretim kolaylığı ve otomasyona uygunluk
- Ağırlık tasarrufu
- Korozyon direnci
- Yüksek darbe ve yorulma dayanımı
- Titreşim sönümleme özelliği
- Yüksek ısı dayanımı
- Kolay ve kalıcı renklendirme imkanı
- Düşük bakım maliyeti
- İyi elektriksel ve termal özelliklerin kombine edilebilmesi

1.3.2. Dezavantajları

Her ne kadar kompozitler birçok açıdan avantajlı olsa da, bazı sınırlayıcı yönleri de bulunmaktadır. Bu dezavantajların giderilmesi yönündeki çalışmalar devam etmekte olup bu sorunların aşılması durumunda kompozitler, metalik malzemelere daha üstün bir alternatif haline gelecektir (Sezen, 2015; Nijssen, 2015):

- Yüksek başlangıç (malzeme ve kalıp) maliyeti
- Karmaşık ve özel üretim yöntemleri gerektirmesi
- Geri dönüşüm ve yeniden işleme zorlukları
- Raf ömrünün sınırlı olması
- Sıcaklık dayanımının bazı türlerde düşük olması
- İşleme (kesme, delme, taşlama vb.) sırasında yapısal hasar riski
- Anizotropik davranış (farklı yönlerde farklı mekanik özellikler göstermesi)
- Hava koşullarına duyarlılık nedeniyle yorulma ömrünün azalması

1.4. Geliştirilmesi Beklenen Özellikler

Kompozit malzemeler, temel avantajlarının yanı sıra teknolojik ilerlemeler sayesinde aşağıdaki özellikler açısından da daha ileri seviyelere taşınmaktadır:

- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Elektriksel iletkenlik
- Termal iletkenlik

Bu yönleriyle kompozitler, geleneksel metal malzemelere kıyasla bazı açılardan daha üstün performans gösterebilmektedir. Örneğin, kompozitlerin özgül mukavemet

(mukavemet/ağırlık oranı) ve özgül modül (elastiklik modülü/ağırlık oranı) değerleri oldukça yüksektir. Ayrıca, metalik malzemelere göre daha iyi titreşim sönümleme özelliklerine sahiptirler.

Çizelge 1.1. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek mukavemet	Üretimi pahalıdır
Düşük yoğunluk (hafiflik)	Farklı yönlerde farklı mekanik özellikler gösterebilir
Aşınma ve korozyon direnci yüksek	İşleme sırasında liflerde hasar riski oluşabilir
Yüksek yorulma dayanımı	Hava koşullarına karşı duyarlılık göstererek yorulma ömrünü kısaltabilir
Isı ve ateşe dayanıklılık	Geri dönüşüm işlemleri karmaşık ve maliyetlidir

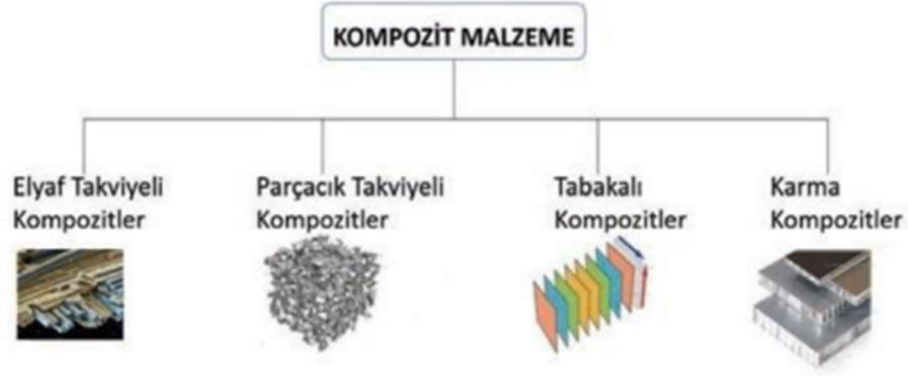
1.5. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, yüksek dayanım ve elastikiyet modülüne sahip bir takviye elemanı ile bu elemanı bir arada tutan ve yük dağılımını sağlayan matris fazından oluşan çok fazlı mühendislik malzemeleridir. Takviye elemanı, yapıya mekanik dayanım kazandırırken; matris, uygulanan yükü takviye fazına ileterek yapıyı bir bütün hâlinde tutar ve çevresel etkilere karşı koruma sağlar (Onat, 2015).

1.5.1. Takviye fazına göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler, takviye fazlarının formuna göre genel olarak dört ana gruba ayrılır. Bu sınıflandırma Şekil 1.1’de sunulmuştur:

- Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozitler
- Parçacık Takviyeli Kompozitler
- Tabakalı Kompozitler
- Karma (Hibrit) Kompozitler



Şekil 1.1. Takviye fazına göre kompozit malzeme sınıflandırması (Kaya, 2016)

1.5.1.1. Elyaf (fiber) takviyeli kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler, genellikle polimer matrisli sistemlerdir ve yüksek mukavemet ile elastikiyet modülüne sahip fiberlerin, düşük dayanımlı matris malzemesi içerisinde dağıtılmasıyla elde edilir. Elyaf, genellikle eksenel yönde dizilir ve bu düzen, kompozit yapının lif yönünde yüksek mukavemet göstermesini sağlar (Gemi, 2004).

Elyafın yönelimi, uzunluğu ve matris içindeki yerleşimi, kompozit malzemenin nihai özelliklerini doğrudan etkiler. Liflerin matris içinde paralel şekilde düzenlenmesi, lif doğrultusunda yüksek dayanım sağlarken; dik doğrultuda mukavemetin düşmesine yol açabilir (Koruvatan, 2008).

1.5.1.2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Parçacık takviyeli kompozitler mikroskobik ya da makroskobik boyutlardaki partiküllerin matris fazı içinde dağılmasıyla oluşur. Bu partiküller metalik veya seramik olabilir ve matris malzemenin özelliklerini geliştirmekten çok, yeni ve fonksiyonel özellikler kazandırmak için kullanılır (Cabioğlu, 2012).

En bilinen örneklerinden biri, çimento, su ve kum karışımıyla elde edilen beton kompozitidir. Bu tür kompozitler döküm yöntemiyle üretilir. Ancak partiküllerin homojen dağılımı zordur. Özellikle toz karışımının yeterince dağılmaması ve porozite gibi üretim hataları ortaya çıkabilir. Bu nedenle ikinci bir işlem olan haddeleme uygulanarak yapı bütünlüğü artırılabilir. Toz metalürji yöntemiyle üretilen kompozitler, daha homojen ve dayanımlı sonuçlar vermektedir.

1.5.1.3. Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozitler, farklı türdeki malzemelerin katmanlar hâlinde üst üste yerleştirilip yapıştırılması ile elde edilen yapılardır. Bu yapılar genellikle en az iki faz içerir: biri yapısal dayanımı sağlayan ana faz, diğeri bu tabakaları bir arada tutan bağlayıcı fazdır.

Metal üzerine yapılan seramik veya organik kaplamalar, cam-plastik-cam sandviç yapılar ve fiber takviyeli polimerler bu tür kompozitlere örnek verilebilir. Tabakalı kompozitlerin başlıca avantajları arasında yüksek mekanik dayanım, düşük ağırlık ve iyi korozyon direnci yer almaktadır. Örneğin, teflon veya kauçuk kaplı metal levhalar, hem esneklik hem dayanım sağlamaktadır.

1.5.1.4. Karma (hibrit) kompozit malzemeler

Karma ya da hibrit kompozitler, birden fazla farklı elyaf türünün tek bir matris içinde bir araya getirilmesiyle oluşur. Bu yapı sayesinde her elyaf türünün avantajlı yönleri kullanılabilir, dezavantajları ise minimize edilebilir.

Örneğin; Kevlar, darbe dayanımı yüksek fakat basma mukavemeti düşük bir elyaftır. Grafit ise daha gevrek, ancak basma yönünde güçlü bir malzemedir. Bu iki elyafın birlikte kullanılmasıyla elde edilen hibrit kompozit, hem grafitten daha tok, hem Kevlar'dan daha yüksek basma dayanımına sahip olurken maliyeti de optimize edebilir (Cabrioğlu, 2012).

1.5.2. Matris fazına göre kompozit malzemeler

Kompozit yapıda matris, yüklerin elyaflara düzgün dağılmasını sağlar ve yapının dış etkilere karşı korunmasında rol oynar. Matrisler üç ana grupta sınıflandırılır: polimer, metal, seramik (Korkut, 2017).

1.5.2.1. Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Endüstride en çok tercih edilen kompozit türüdür. Uygun liflerle (karbon, cam, aramid vb.) takviye edildiğinde yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk ve üretim kolaylığı sunar. Üç alt gruba ayrılır:

1.5.2.1.1. Termoset matrisli kompozitler

Sıvı hâlde olup sertleştirici ilavesiyle katılaşıp ve bir daha geri dönüştürülemez. Düşük viskoziteye sahip olmaları üretimi kolaylaştırır. Ancak kürleme süreleri uzun ve raf ömrü sınırlıdır.

1.5.2.1.2. Termoplastik matrisli kompozitler

Isıtıldığında şekil değiştirip soğutuldukça sertleşebilir. Kimyasal reaksiyona gerek duymamaları, onları hızlı ve tekrar işlenebilir üretim süreçlerine uygun kılar. Sera örtüleri gibi uygulamalarda kullanılır (Korkut, 2017).

1.5.2.1.3. Elastomer matrisli kompozitler

Çekme kuvveti altında uzayabilen ve eski haline dönebilen yapılar olup doğal ve sentetik kauçuk bazlı malzemelerden oluşur. Otomobil lastikleri tipik örnektir.

1.5.2.1.4. Metal matrisli kompozitler (MMK)

Demir, alüminyum, titanyum gibi hafif metaller takviye malzemeleri ile birleştirilir. Üretimi zor ve maliyetlidir. Ancak yüksek sıcaklık dayanımları sayesinde havacılık ve uzay sektörlerinde kritik öneme sahiptir.

1.5.2.1.5. Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamlara dayanıklı yapıları nedeniyle savunma ve uzay uygulamalarında tercih edilir. Ancak gevrek yapıları nedeniyle dikkatli tasarım gerektirir.

1.5.3. Hibrit kompozitler

Farklı liflerin birleştirilmesiyle oluşturulan sistemlerdir. Cam elyafla karbon elyafın kombinasyonu gibi uygulamalar maliyet ve performans dengesini sağlar. Ayrıca elektriksel yalıtkanlık gibi ikincil özellikler kazandırılabilir.

1.5.4. Nano takviyeli kompozitler

Nano ölçekteki takviye elemanları ile kompozit matris fazına ekstra özellikler kazandırılır. En çok tercih edilen nano takviye karbon nanotüplerdir (CNT). Üç tipi vardır (Soni vd., 2020):

- **SWCNT (Tek duvarlı):** En iyi mekanik özellikler, küçük çap.
- **DWCNT (Çift duvarlı):** İki iç içe geçmiş yapı.
- **MWCNT (Çok duvarlı):** Daha kısa form, yüksek korozyon direnci.

CNT'ler; yüksek erime noktası, düşük yoğunluk, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, mükemmel mekanik dayanım gibi özelliklerle dikkat çeker.

1.5.5. Hibrit-nano kompozit malzemeler

Hibrit-nano kompozit malzemeler, birden fazla nano ölçekteki takviye elemanının aynı matris yapısı içerisinde kullanılmasıyla oluşturulan ileri teknoloji kompozit sistemleridir. Bu tür kompozitlerde kullanılan nano takviyeler, belirli

özellikleri geliştirmek amacıyla kombine edilmekte olup; mukavemet, darbe dayanımı, ısı iletkenliği, elektriksel iletkenlik, aşınma direnci gibi özelliklerin eş zamanlı olarak iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

1.5.5.1. Hibrit nano takviye prensibi

Hibrit-nano kompozitlerde kullanılan her nano takviye malzemesi farklı bir işlevi yerine getirir. Örneğin:

- **Zirkonya (ZrO_2)** gibi seramik bazlı bir nano takviye, darbe dayanımı ve yüksek sıcaklık direnci sağlamada etkin rol oynarken,
- **Karbon nanotüpler (CNT)** ise yüksek çekme dayanımı, modül artışı ve elektriksel iletkenlik katkısı sunar.

Bu iki nano malzemenin birlikte kullanılması, tek bir nano takviyenin sağlayamayacağı düzeyde çok yönlü performans artışları sağlar. Bu sinerjik etki, hibrit nano kompozitlerin en önemli avantajlarından biridir.

1.5.5.2. Takviye mekanizması ve konsantrasyon oranı

Hibrit-nano kompozitlerde takviye malzemelerinin hacimsel konsantrasyonu, elde edilecek nihai özellikleri doğrudan etkiler. Takviye malzemelerinin oranı ve dağılımı şu kriterlere göre belirlenir:

- Fonksiyonel özellik hedefi(mekanik, termal, elektriksel)
- Matris ile uyumluluk
- Takviye fazları arasındaki etkileşim
- İstenilen mikro yapı homojenliği

Nano boyuttaki takviyelerin yüksek yüzey alanı sayesinde, düşük konsantrasyonlarda bile malzeme özelliklerinde ciddi değişiklikler elde edilebilmektedir. Ancak takviye oranı arttıkça aglomerasyon riski ve üretim zorlukları da artmaktadır. Bu nedenle doğru oranlamayla maksimum fayda, minimum üretim problemiprensibi gözetilir.

1.5.5.3. Üretim ve Uygulama Alanları

Hibrit-nano kompozitlerin üretimi, genellikle ileri düzey dağıtım teknikleri (ultrasonik dispersiyon, mekanik karıştırma, çözeltiden çöktürme vb.) ile gerçekleştirilir. Üretimdeki temel amaç, nano takviyelerin matrise homojen dağılımının sağlanmasıdır.

Bu kompozitler;

- Uzun ve havacılık sistemleri

- Savunma sanayii (balistik zırhlar)
- Elektronik bileşenler
- Biyomedikal uygulamalar (dental implantlar, yapay kemikler)
- Otomotiv sektöründe hafif ve dayanıklı parça üretimi

gibi yüksek performans ve çok yönlü özelliklerin gerekli olduğu alanlarda kullanılmaktadır.

1.5.5.4. Avantajları

- Geliştirilmiş mekanik özellikler (çekme, darbe, yorulma dayanımı)
- Isıl ve elektriksel iletkenlikte artış
- Korozyon ve oksidasyon direncinin iyileştirilmesi
- Çok yönlü tasarım esnekliği

1.5.5.5. Zorluklar

- Nano parçacıkların homojen dağılması zor olabilir
- Üretim maliyetleri yüksek olabilir
- Aglomerasyon riski performansı düşürebilir
- Uzun vadeli çevresel etkileri hâlen araştırılmaktadır

1.6. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Performansı

Kompozit malzemeler, özellikle mühendislik uygulamalarında mekanik yüklemelere maruz kalan yapılar için tercih edilen gelişmiş malzeme gruplarından. Bu malzemelerin kullanım alanlarında karşılaştığı en önemli yükleme türlerinden biri, dış kaynaklı darbe kuvvetleridir. Kompozit malzemelerin hem tasarımı hem de yapısal bütünlüğü, bu tür ani ve dinamik yüklemelere karşı yeterli dayanımı gösterebilmelidir. Uygulama sahasına göre, darbe altındaki davranışı önceden kestirmek ve buna uygun çözümler geliştirmek kritik bir gerekliliktir (Metin, 2008; Potoğlu, 2012).

1.6.1. Darbe etkisi ve hasar oluşumu

Tabakalı kompozit malzemeler darbe etkisine maruz kaldığında, yüzeyde veya yapının iç kesimlerinde çeşitli hasar mekanizmaları oluşabilir. Hasar, çarpmanın hızı, yönü ve şekline bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bazı durumlarda darbe sonucu oluşan deformasyon yüzeyde açıkça gözlemlenebilirken; özellikle polimer matrisli kompozitlerde, iç yapıda meydana gelen ve dışarıdan fark edilemeyen mikroskobik hasarlar, yapının uzun ömürlü dayanımını ciddi şekilde düşürebilir.

Metalik matrisli kompozitlerde darbe sonrası oluşan deformasyon genellikle elastik uzama veya lokal plastik şekil değişimi şeklinde ortaya çıkar. Bu tür malzemelerde kırılma riski daha düşük olup, hasarın tespiti daha kolaydır. Buna karşılık polimer esaslı kompozit malzemeler, düşük hızlı darbelerle karşı çok daha hassastır. Darbe, görünür bir deformasyon oluşturmada yapının iç katmanlarında delaminasyon (katman ayrılması), matris çatlağı veya lif kırılması gibi yapısal arızalara yol açabilir.

1.6.2. Darbe testlerinin önemi

Kompozit malzemelerin darbe altında göstereceği davranışı belirlemek amacıyla çeşitli deneysel yöntemler uygulanmaktadır. Bu testler, malzemenin servis ömrü boyunca karşılaşılabileceği ani yükleme koşullarına karşı güvenlik değerlendirmesini yapma imkânı sunar. Darbe testleri aynı zamanda kalıcı deformasyon kapasitesi, mukavemet koruma kabiliyeti ve dinamik enerji sönümler performansı gibi kritik mühendislik parametrelerinin ölçülmesine olanak tanır.

Darbe test yöntemleri genel olarak darbe hızına göre sınıflandırılır. Literatürde 10 m/s'nin altındaki darbe hızları düşük hızlı darbe testi, üzerindeki ise yüksek hızlı darbe testi olarak kabul edilmektedir (Cantwell & Morton, 1991). Düşük hızlı darbeler; üretim sırasında, bakım süreçlerinde veya taşıma sırasında meydana gelebilecek çarpma olaylarını simüle eder. Örneğin, montaj sırasında bir parçanın elden kayarak malzemeye çarpması bu kapsamdadır (Sayer, 2009).

1.6.3. Kullanılan test yöntemleri

Darbe dayanımı analizinde yaygın olarak kullanılan yöntemler şunlardır:

- Izod Darbe Testi
- Charpy Sarkaç Darbe Testi
- Ağırlık Düşürme Testi
- Balistik Darbe Testleri (Yüksek hızlı)
- Silah veya Mermi Testleri (Askerî uygulamalar için)

Özellikle ağırlık düşürme testleri, düşük hızlı darbe koşullarının laboratuvar ortamında simülasyonu için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu testlerde, belirli bir yükseklikten bırakılan ağırlığın kompozit malzeme üzerindeki etkisi değerlendirilir. Bu testlerin sonucunda, malzeme yüzeyinde veya içinde oluşan delaminasyon, matris kırığı, lif kopması, kabuk soyulması gibi hasar modları analiz edilir (Sayer, 2009).

1.6.4. Sonuç ve değerlendirme

Tabakalı kompozit malzemelerin darbe altındaki davranışı, yapının güvenliği açısından büyük öneme sahiptir. Özellikle polimer matrisli kompozitlerin iç yapısal hasarlarının gözle tespit edilememesi, bu malzemeler üzerinde ileri seviye hasar tespiti tekniklerinin (ultrason, termografi, akustik emisyon vb.) kullanılmasını gerektirir. Yapının yük taşıma kapasitesini etkileyen bu içsel hasarlar, kompozitlerin servis ömrünü önemli ölçüde azaltabilir.

Bu bağlamda, darbe dayanımına yönelik testlerin yapılması ve elde edilen verilerin tasarım kriterlerine entegre edilmesi, dayanıklı, uzun ömürlü ve güvenli kompozit yapıların geliştirilmesinde vazgeçilmez bir adımdır.

1.7. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Düşük Hızlı Darbe Etkisi

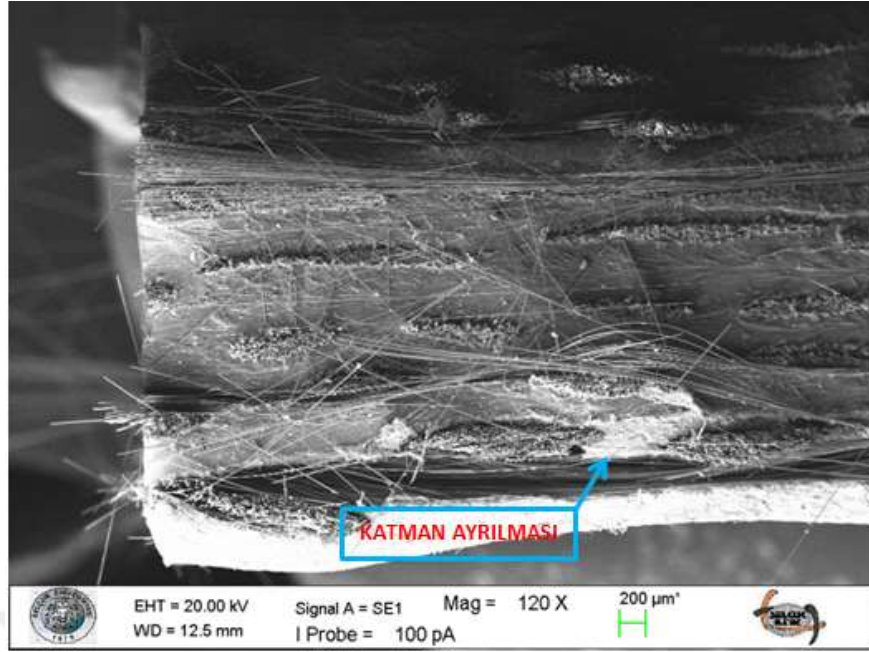
Polimer matrisli tabakalı kompozit yapılar, düşük hızlı darbe etkilerine karşı yüksek hassasiyet göstermektedir. Bu tür darbeler, genellikle görünür yüzey deformasyonlarından çok, yapının iç bölgelerinde ciddi hasarların meydana gelmesine neden olur. Özellikle sandviç yapıdaki polimer esaslı kompozitlerin darbe davranışı, çeşitli yapısal parametrelere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu parametreler arasında çarpışmanın karakteri (hız, kütle, darbe şekli), matris kalınlığı, kullanılan matrisin türü ve takviye elemanlarının yerleşimi yer almaktadır.

Tabakalı yapılarda, eğer takviye elemanlar kalınlık boyunca homojen bir şekilde dağılmamışsa, özellikle elastik özelliklerin enine yönde zayıf olması nedeniyle hasar oluşumu genellikle enine doğrultuda yoğunlaşır. Bu durum, darbe sırasında enerjinin yapının zayıf ekseninde yoğunlaşmasına ve bu yönde çatlakların, delaminasyonların oluşmasına zemin hazırlar (Metin, 2008; Abrate, 2011).

1.7.1. Düşük hızlı darbe sonucu oluşan hasar modları

Düşük hızlı darbe testleri, kompozit malzemenin darbe enerjisini ne ölçüde absorbe edebildiğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilir. Bu testlerin sonucunda malzemenin içyapısında çeşitli hasar türleri meydana gelebilir. Oluşan bu hasarlar, darbenin büyüklüğüne ve malzeme özelliklerine göre değişiklik gösterir. Yaygın olarak gözlemlenen hasar türleri şunlardır (Kara, 2006):

- **Matris çatlağı:** Liflerin çevresini saran matrisin, çekme veya bası gerilmeleri sonucunda kırılması.
- **Delaminasyon (tabaka ayrılması):** Katmanlar arasındaki bağın zayıflaması veya kopması nedeniyle oluşan yapısal ayrılmalar. (Şekil 1.2)



Şekil 1.2. Katman ayrılması

- **Lif kırılması:** Takviye elemanlarının kritik gerilmeye ulaşarak kopması.
- **Delinme:** Darbe enerjisinin malzemenin sınırlarının ötesine geçerek yapının tamamen delinmesine neden olması.

Bu hasar türleri genellikle bir arada meydana gelir ve birbirini tetikler niteliktedir. Örneğin, matris çatlağı tabakalar arası ayrılmanın başlangıcını oluşturabilir, bu da lif kırılmasına zemin hazırlayabilir.

1.7.2. Darbe tepkisinin değerlendirilmesi

Kompozit malzemenin darbe altındaki davranışının incelenmesi, hem kalıcı mukavemet seviyesini hem de servis ömrü boyunca göstereceği dayanımı anlamak açısından oldukça önemlidir. Darbe etkisiyle oluşan hasarın büyüklüğü ve yayılımı, yapının gelecekteki yüklemelere karşı göstereceği performansı doğrudan etkiler. Bu nedenle düşük hızlı darbe testi, malzemenin yapısal güvenilirliğinin değerlendirilmesinde önemli bir kriterdir.

Hasarın oluşumu ve ilerleyişinin anlaşılması, sadece mekanik özelliklerin ölçümü açısından değil, aynı zamanda tasarım optimizasyonu, bakım-onarım planlaması ve yeni nesil kompozit üretimi için de kritik veriler sunar. Bu kapsamda yapılacak deneysel çalışmalar ve testler, malzeme seçiminden üretim sürecine kadar pek çok mühendislik kararını şekillendirebilir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Son yıllarda hibrit kompozit malzemeler, özellikle mekanik performansın artırılması, maliyetin düşürülmesi ve fonksiyonel özelliklerin optimize edilmesi amacıyla birçok çalışmada araştırma konusu olmuştur. Literatürde yapılan çalışmalar, farklı takviye elyafları ve matris sistemlerinin kombine edilmesiyle elde edilen hibrit yapılarla malzeme özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlanabildiğini göstermektedir.

Ary ve ark. (2014), karbon ve bazalt elyafların istifleme sırasının eğilme dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Vakum destekli kalıplama yöntemiyle üretilen kompozitler üzerinde üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve kırılma yüzeyleri mikroskopik olarak incelenmiştir. İstifleme sırasının mekanik performans üzerinde belirleyici olduğu sonucuna varılmıştır.

Tanın (2016), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) matrisli, karbon nanotüp ve cam elyaf katkılı hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini değerlendirmiştir. KNT'ler aseton ortamında ultrasonik yöntemle dağıtılmış ve ekstrüder ile homojenleştirilmiştir. %1 KNT katkısı ve cam elyaf takviyesi birlikte uygulandığında, çekme mukavemetinde ve elastik modülde belirgin artış sağlandığı tespit edilmiştir.

Nisini ve ark. (2016), epoksi matrisli, keten, karbon ve bazalt elyaflardan oluşan hibrit kompozitler üretmiş ve bu yapıların çekme ve eğilme davranışlarını incelemiştir. Elyaf hacim oranlarının malzeme tokluğu üzerindeki etkisi vurgulanmıştır.

Taher (2017), termoplastik poliüretan (TPU) matrisine POSS ve HNT gibi nanoparçacıklar ilave ederek hibrit nanokompozitler üretmiştir. En iyi çekme ve darbe dayanımı, düşük oranda katkı yapılan örneklerde gözlenmiş, SEM analizleri ile mikroyapı değerlendirmesi yapılmıştır.

Doğan (2017), cam elyaf takviyeli kompozitlerin tek bindirme bağlantılarında darbe davranışlarını araştırmıştır. Artan darbe enerjisiyle hasar miktarının arttığı, bindirme uzunluğu ile deformasyonun azaldığı ve dayanımın arttığı ortaya koymuştur.

Doğan ve Arıkan (2017), termoset ve termoplastik yüzey levhalı sandviç panellerin darbe tepkilerini karşılaştırmıştır. Hibrit yapıların darbe altında enerji yutma, maksimum kuvvet ve sapma özellikleri analiz edilmiş, yüzey ve çekirdek malzeme uyumunun önemine vurgu yapılmıştır.

Yüksel Yılmaz (2018), PVC kaplı cam elyaf kompozit malzeme üretmiş, sıcak pres yöntemi ile PVC'nin cam elyafla bağlanması sağlanmıştır. Elde edilen yapıların

mekanik test sonuçları, otomotiv ve teknik tekstil gibi alanlara uygunluğunu göstermiştir.

Güğü (2018), YYPE matrisli karbon nanotüp ve cam elyaf katkılı kompozitlerde mekanik dayanımı değerlendirmiştir. Tüm katkı oranlarında dayanımda iyileşmeler sağlandığı ifade edilmiştir.

Polat (2019), farklı termoplastik matrisler ile cam elyaf takviyeli kompozitler üretmiş ve mekanik testler sonucu en yüksek çekme dayanımına cam elyaf takviyeli ABS kompozitin sahip olduğu belirlenmiştir.

Yıldız (2019), karbon ve cam prepeglerle birlikte bazalt elyaf içeren hibrit kompozitler üretmiş, sıcak pres yöntemiyle elde edilen malzemelerin mekanik özellikleri test edilmiştir.

Chen ve ark. (2019), cam, karbon ve bazalt elyafların hibritlenmesi ile Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM) yöntemi kullanarak kompozit üretmiştir. Eğilme testleri sonucu, bazalt elyaf oranının artırılmasıyla eğilme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Elektron mikroskobu ile mikro yapısal analiz gerçekleştirilmiş, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar klasik laminat teorisi ile desteklenmiştir.

Ünal ve ark. (2021), poliamid 6 matrisli, cam bilya ve cam elyaf içeren hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Cam elyaf, çekme mukavemetini ve elastisite modülünü artırırken; EPDM ilavesi darbe dayanımını iyileştirmiştir.

Çelik (2022), doğal elyaf (bazalt ve aramid) katkılı epoksi bazlı hibrit kompozitlerin CFRP ile karşılaştırmalı değerlendirmesini yapmıştır. Hibrit örneklerin darbe dayanımı daha yüksek bulunmuş, SEM analizleri ile iç yapılar detaylandırılmıştır.

Jin ve ark. (2022), termoplastik kompozit bileşenlerin kalınlık yönündeki mekanik performanslarını iyileştirmeye yönelik çalışmıştır. Fiber-reçine arayüzey modifikasyonları (oksidasyon, plazma, boyutlandırma vb.) ile karbon nanotüp ve buckypaper katkılarının etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Farklı yüzey modifikasyon tekniklerinin avantaj ve sınırlılıkları değerlendirilmiş; özellikle arayüzey bölgesinin iyileştirilmesinin yapısal uygulamalardaki önemine dikkat çekilmiştir.

Pheyseyve Ark. (2024), kısa lif pelletleri ile prepeg tabakalardan oluşan hibrit kompozit malzemeler üretmiştir. Matris malzemesi olarak polieter eter keton (PEEK) kullanılmıştır. Kısa fiberler belirli bir gramajda homojen şekilde el ile dağıtılmış, üç ısıl döngüde üretim gerçekleştirilmiştir. Üretilen panellerin 3,5–4 mm kalınlığında olduğu ve sürekli liflerin mekanik özelliklerde özellikle çekme ve elastisite modülü açısından belirgin iyileştirmeler sağladığı rapor edilmiştir.

Ullahve Ark. (2024), cam/karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerde sözde-sünek davranışları incelemiştir. Çekme testleri dijital görüntü korelasyon (DIC) tekniği ile desteklenmiş, dış eksen C/GFRP numunelerinde metal benzeri enerji yutma davranışları gözlenmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda tez çalışmasında kullanılan kompozit elyafların ve matris malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri ile birlikte üretim aşamaları, test yöntemleri ve analizleri verilmiştir.

3.1. Malzemeler

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan kompozit elyafların ve matris malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri testler yapılmadan önceki durumu verilmiştir.

3.1.1. Düşük yoğunluklu polietilen

Matris malzemesi olarak (Exxon Mobil Chemical firmasının üretmiş olduğu Enable 20-05 Series Metallocene Polyethylene Resin) yaprak rulo şeklinde düşük yoğunluklu polietilen malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme daha iyi işlenebilirlik ve gelişmiş şeffaflık gibi bir dizi avantaja sahiptir. Metallocene katalizörü kullanılarak üretilen bu reçine, dar moleküler ağırlık dağılımı sayesinde yüksek çekme dayanımı, darbe dayanıklılığı ve yırtılma direnci gibi üstün özellikler sunar. Ayrıca, film ve ambalaj uygulamalarında şeffaflık sağlarken, daha iyi esneklik ve delinme direnci gibi performans iyileştirmeleri de gösterir. Çevresel etkilere karşı daha dayanıklı olup, kimyasal, UV bozulması ve çevresel gerilme çatlamalarına karşı dirençlidir. Ayrıca, daha düşük işleme sıcaklıkları ile enerji tasarrufu sağlarken, geri dönüşüm potansiyelini artırarak sürdürülebilirliğe katkı sağlar. Bu özellikleri sayesinde, gıda ambalajı ve koruyucu uygulamalar gibi sektörlerde tercih edilmektedir.



Şekil 3.1. Polietilen yaprak rulo

Polietilene ait teknik özellikler Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Polietilen özellikleri

Özellik	Tipik Değer (SI)	Test Standardı
Yoğunluk	0,920 g/cm ³	ExxonMobil Metodu
Erime İndeksi (190°C/2.16 kg)	0,50 g/10 dk	ASTM D1238
Tepe Erime Sıcaklığı	114 °C	ExxonMobil Metodu
Akma Dayanımı (MD)	9,96 MPa	ASTM D882
Akma Dayanımı (TD)	10,3 MPa	ASTM D882
Kopma Dayanımı (MD)	68,5 MPa	ASTM D882
Kopma Dayanımı (TD)	55,1 MPa	ASTM D882
Kopmada Uzama (MD)	470%	ASTM D882
Kopmada Uzama (TD)	720%	ASTM D882
Secant Modülü (MD) - %1 Secant	193 MPa	ASTM D882
Secant Modülü (TD) - %1 Secant	220 MPa	ASTM D882
Darbe Dayanımı (Dart Drop Impact)	280 g	ASTM D1709A
Elmendorf Yırtılma Dayanımı (MD)	76 g	ASTM D1922
Elmendorf Yırtılma Dayanımı (TD)	550 g	ASTM D1922
Delinme Kuvveti	53,4 N	ExxonMobil Metodu
Delinme Enerjisi	3,73 J	ExxonMobil Metodu

3.1.2. Bazalt fiber

Takviye elemanı olarak kullanılan bazalt kompozit kumaş Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Şti.’ den temin edilmiştir. Yoğunluk olarak 200 g/m²dir. Elyafa ait tedarikçi firmadan temin edilen teknik özellikleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bazalt fiber kimyasal içeriği

Bileşen	Ortalama Miktar (%)
SiO ₂ (Silika)	48 – 56 %
Al ₂ O ₃ (Alümina)	14 – 18 %
Fe ₂ O ₃ + FeO (Demir oksit)	10 – 12 %
CaO (Kalsiyum oksit)	5 – 10 %
MgO (Magnezyum oksit)	4 – 7 %
Na ₂ O + K ₂ O (Alkali oksitler)	2 – 5 %
TiO ₂ (Titanyum dioksit)	0.5 – 2 %
P ₂ O ₅ (Fosfor PEntoksit)	< 1 %

Çizelge 3.3. Bazalt kumaş özellikleri

Özellik	Değer
Dokuma Tipi	Düz (Plain)
Ağırlık	200 g/m ²
Kumaş Eni	100 cm
Elyaf Çapı	13–19 µm
Yoğunluk	2,63 g/cm ³
Elastisite Modülü	≥90 GPa
Kopma Uzaması	3,50%
Reçine Uyumu	Epoksi, polyester, vinilester
Kullanım Alanları	Kompozit takviye, yapı güçlendirme, otomotiv parçaları, denizcilik uygulamaları

Bu özellikler, bazalt fiber kumaşların yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve mekanik mukavemet gibi avantajlarını yansıtır. Ayrıca, çevre dostu ve geri dönüştürülebilir olmaları nedeniyle sürdürülebilir projelerde de tercih edilmektedir. Bazalt fiberin taramalı elektron mikroskop görüntüsü (SEM) Şekil 3.2’ de verilmiştir.

**Şekil 3.2.** Bazalt fiber SEM görüntüsü

3.1.3. Cam fiber

Dost Kimya tarafından temin edilen 200 g/m²cam elyafın teknik özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Cam kumaş teknik özellikleri

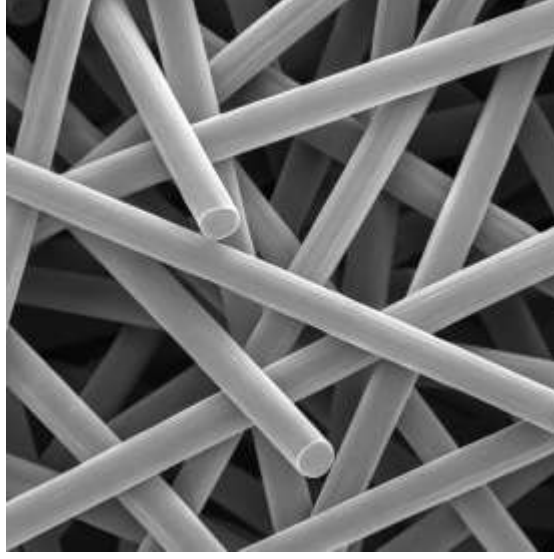
Özellik	Değer
Dokuma Tipi	Düz (Plain)
Ağırlık	200 g/m ²
Kumaş Eni	80–110 cm
Yoğunluk	2,5-2,6 g/cm ³
Kalınlık	0,12–0,18 mm
Elyaf Türü	E-Glass (EC9 136x/6)
Atkı Sıklığı	124 iplik/10 cm
Çözümlü Sıklığı	170 iplik/10 cm
Reçine Uyum	Epoksi, akrilik, polyester, vinilester
Reçine Tüketimi	300–400 g/m ²
Kullanım Alanları	Kompozit takviye, yapı güçlendirme, otomotiv parçaları, denizcilik uygulamaları

Cam elyaf, sahip olduğu çok yönlü özellikler sayesinde kompozit malzeme teknolojisinde yaygın olarak kullanılan bir takviye elemanıdır. En önemli avantajlarından biri, yüksek çekme dayanımı sunmasıdır. Yaklaşık 2000–3500 MPa arasında değişen çekme dayanımı sayesinde, mekanik olarak dayanıklı ve sağlam yapılar elde edilebilir. Buna ek olarak, yoğunluğunun yaklaşık 2.5 g/cm³ olması, cam elyafı hafif yapısıyla öne çıkarır; bu da özellikle taşıma ve havacılık gibi hafifliğin kritik olduğu uygulamalarda tercih edilmesini sağlar.

Cam elyafın bir diğer büyük avantajı ekonomik oluşudur. Karbon ve aramid gibi diğer yüksek performanslı elyaflara kıyasla çok daha düşük maliyetlidir. Bu durum, yüksek mukavemetli kompozitlerin daha düşük bütçelerle üretilebilmesini mümkün kılar. Ayrıca cam elyaf, yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır; 500–600 °C'ye kadar yapısal bütünlüğünü koruyabilir.

Elektriksel yalıtıcılık özelliği, cam elyafın elektrik/elektronik sektöründe kullanılmasını sağlar. Aynı zamanda pek çok kimyasala karşı direnç gösterdiğinden, zorlu çevre koşullarına maruz kalan yapılarda da güvenle kullanılabilir. İşlenmesi oldukça kolaydır; kesilebilir, dokunabilir ve reçinelerle rahatça emdirilebilir. Epoksi, polyester ve vinilester gibi birçok reçine türüyle uyumludur.

Son olarak, cam elyaf çevre dostu bir malzeme olarak da değerlendirilebilir. Geri dönüştürülebilir oluşu, sürdürülebilir üretim süreçlerinde ve çevreci projelerde tercih edilmesini desteklemektedir. Ayrıca boyutsal kararlılığı sayesinde, korozyon ortam, nem ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerden minimum düzeyde etkilenir. Bazalt fiberin taramalı elektron mikroskop görüntüsü (SEM) Şekil 3.3' de verilmiştir.



Şekil 3.3. Cam fiber SEM görüntüsü

3.1.4. Karbon fiber

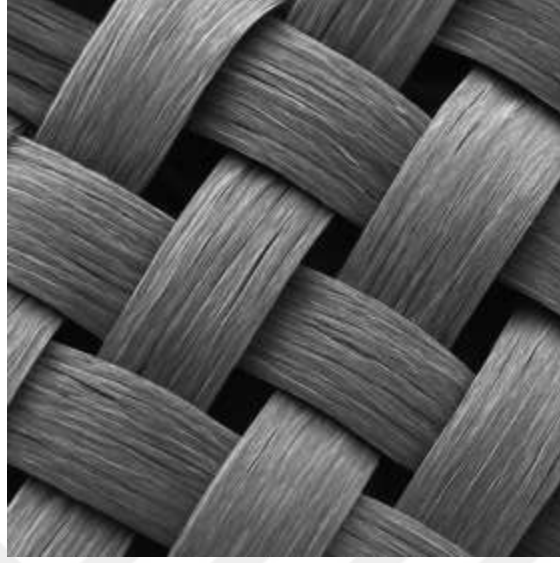
Diğer elyaflar gibi yine Dost Kimya tarafından temin edilen 200 g/m² karbon elyafın teknik özellikleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Karbon kumaş teknik özellikleri

Özellik	Değerler
Yoğunluk	1,6 – 1,8 g/cm ³
Laminasyon Kalınlığı	Yaklaşık 0,2 mm
Çekme Dayanımı	3000 - 6000 MPa
Elastik Modülü	230 - 250 GPa
Kopma Uzaması	%1 - %2
Isı İletkenliği	20 - 50 W/mK
Ateşe Dayanıklılık	300°C - 400°C
Elektriksel İletkenlik	Yüksek (Genellikle iletken)

Karbon elyaf, yüksek dayanıklılık, düşük ağırlık, mükemmel korozyon direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi avantajlara sahip bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık ve inşaat gibi sektörlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca, karbon elyaflar iyi bir termal iletkenlik ve elektriksel iletkenlik sunarak yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilir. Düşük termal genleşme oranı ve estetik görünümleri de tasarım açısından büyük avantajlar sağlar. Karbon elyafın çevre dostu olma potansiyeli ve uzun ömürlü yapısı, bakım ihtiyacını azaltarak daha sürdürülebilir bir çözüm sunar. Bu özellikleriyle, karbon elyaf, modern mühendislik ve

tasarım çözümlerinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Karbon fiberin taramalı elektron mikroskop görüntüsü (SEM) Şekil 3.4’ de verilmiştir.



Şekil 3.4. Karbon fiber SEM görüntüsü

3.2. Hibrit Kompozit Malzeme Üretimi

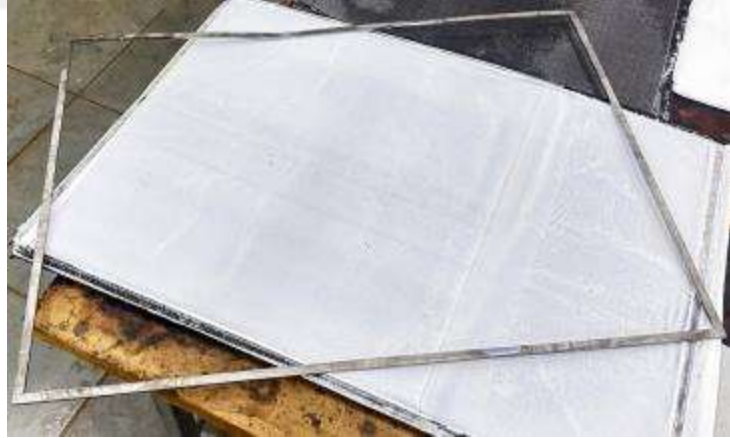
Hibrit kompozitler sıcak preste üretileceğinden dolayı plaka şeklinde üretilecektir. Matris malzemesi olarak kullanılan polietilen; düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) tercih edilmiştir. PE; piyasada granül ve ambalaj malzemesi olarak bulunduğu için dolayı literatür ve temin edilebilirlik araştırmaları sonucu, ambalaj malzemesi olan tercih edilmiştir. Bu tercihin sebebi sıcak preste yük ve ısıdan dolayı homojen dağılımı sağlamaktır.

Sıcak pres olarak Şekil 3.5’ de Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde bulunan pres cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Sıcak pres

Pres çene ölçülerine uygun olarak zaman ve enerji sarfiyatın önüne geçebilmek için 500x700 mm ölçülerinde kalıp ürettirilmiştir. (Şekil3.6)



Şekil 3.6. 500x700 mm kalıp

Malzemeler (PE ve kompozit elyaflar) kalıp ölçülerinde kesilmiştir (Şekil 3.7). Test numunelerini kalınlıkları 3,5 mm olması gerektiğinden dolayı ağırlık ve kalınlıklar hesaplanarak katman sayıları belirlenmiştir. Ölçümlere ait fotoğraflar Şekil 3.8’ de verilmiştir.



Şekil 3.7. PE ve kompozit kesimleri



Şekil 3.8. Ağırlık ölçümleri

Yapılan ölçümler sonucunda PE ve kompozit kumaşlara ait ağırlıklar Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Üretimde kullanılan PE ve kompozit kumaş ağırlıkları

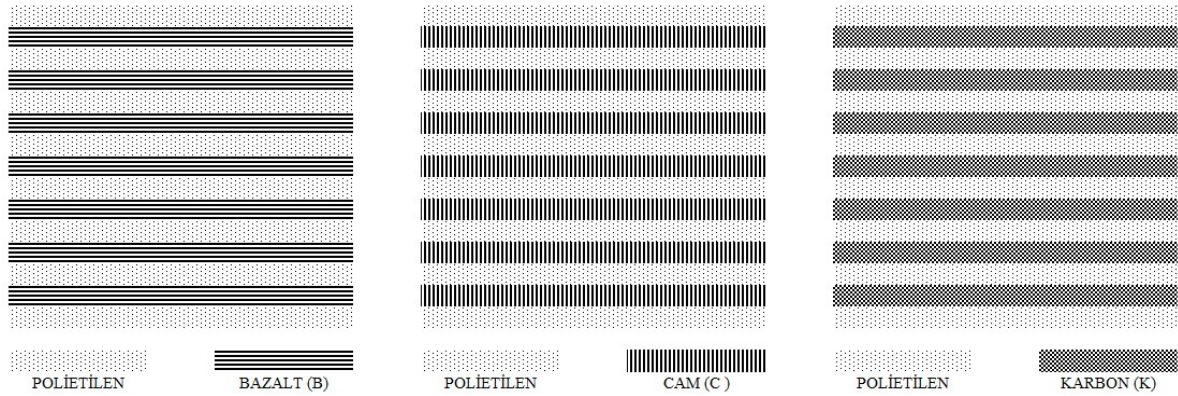
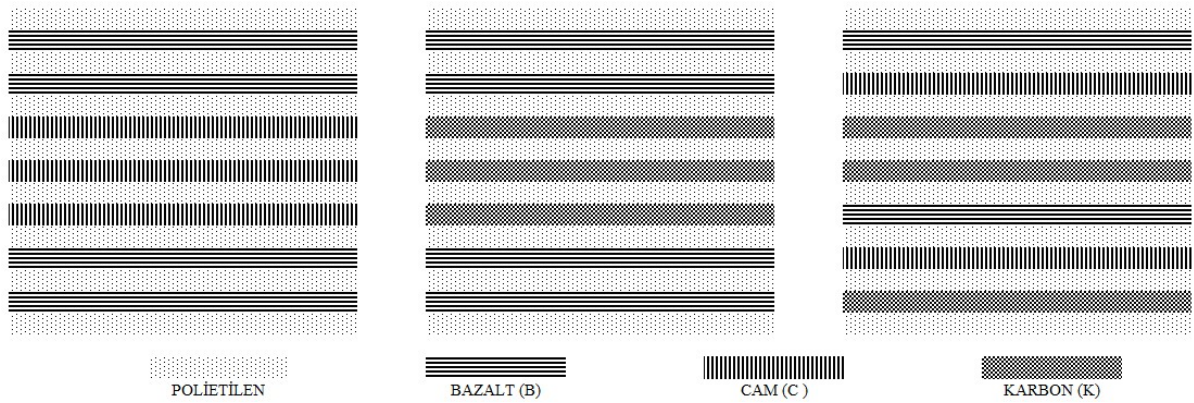
	Brüt Ağırlık (gr)	Net Ağırlık (gr)
Dara ağırlık	92,47	-
Cam Elyaf (500x700)	163,89	71,42
Bazalt Elyaf (500x700)	167,95	75,48
Karbon Elyaf (500x700)	161,25	68,78
Polietilen (500x700)	158,87	66,4

Üretilen plakalarda kalınlık 3,5 mm ve ağırlıklar dikkate alınarak dizilim yaptığımızda 7 kat (500x700mm) kompozit kumaş, 8 kat PE (500x700mm) kalıba sıralanarak üretim yapılmıştır. Ağırlık dengesi ve kat sayısı ile ilgili bilgiler Çizelge 3.6' da verilmiştir.

Çizelge 3.6.PE ve cam elyaf kumaş ağırlıkları- kat sayıları

		Kat Sayısı	Br. Ağırlık (gr)	Toplam Ağırlık (gr)	Ağırlık (%)
Tekli elyaflar	Cam Elyaf (500x700)	7	71,42	499,94	48,48
	Polietilen (500x700)	8	66,4	531,2	51,52
	Bazalt Elyaf (500x700)	7	75,48	528,36	49,87
	Polietilen (500x700)	8	66,4	531,2	50,13
	Karbon Elyaf (500x700)	7	68,78	481,46	47,54
	Polietilen (500x700)	8	66,4	531,2	52,46
Hibrit elyaflar	Cam Elyaf (500x700)	3	71,42	214,26	49,28
	Bazalt Elyaf (500x700)	4	75,48	301,92	
	Polietilen (500x700)	8	66,4	531,2	50,72
	Karbon Elyaf (500x700)	3	68,78	206,34	
	Bazalt Elyaf (500x700)	4	75,48	301,92	48,90
	Polietilen (500x700)	8	66,4	531,2	51,10
	Cam Elyaf (500x700)	2	71,42	142,84	
	Karbon Elyaf (500x700)	3	68,78	206,34	48,49
	Bazalt Elyaf (500x700)	2	75,48	150,96	
	Polietilen (500x700)	8	66,4	531,2	51,51

Üretimde; en üst ve en alt sıra da PE, aralara da birer kat PE ve birer kat kompozit kumaş sıralanmıştır Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 da üretilen plakaların sıralamaları vardır.

**Şekil 3.10** Tekli katmanlar**Şekil 3.11.** Hibrit katmanlar

Parçalar kesildikten sonra kalıba yerleştirilerek sıcak pres çalıştırılmıştır. Prese konulmadan önce iki sac levha arasına pişirme kâğıdı konulmuştur. Bunun nedeni PE sac levhalara yapışmasını önlemektir. Pres 90°C geldikten sonra kalıp iki sac plaka arasında prese konulmuştur. Homojen ergime sağlanması amacıyla sıcaklık belli zaman aralıklarında artırılmıştır. Bölümde önceden yapılan çalışmalar neticesinde belirlenen sıcaklık-zaman matrisine göre çalışmalar devam ettirilmiştir. Sıcaklık – zaman matrisi Çizelge 3.7’ de verilmiştir.

Çizelge 3.7.Sıcaklık – zaman matrisi

	Sıcaklık	Bekleme Süresi
ISITMA	90°C	20 dk
	100°C	10 dk
	110°C	10 dk
	120°C	10 dk
	130°C	30 dk
SOĞUTMA	130°C	8–10 dk
	120°C	8–10 dk
	110°C	8–10 dk
	100°C	8–10 dk
	90°C	8–10 dk

80 dakika kademeli ısıtma sonrasında yaklaşık 50 dk kademeli soğutma sonucu üretilen plakanın oda koşullarına gelmesi için 30 dk boyunca soğutulmuştur. Uniform şeklin çıkması için ani soğumaya bırakılmamıştır. Sıcak presten çıkan plakaya ait görsel Şekil 3.11’ de verilmiştir.



Şekil 3.11. Sıcak presten çıkan plaka

Oda sıcaklıklarına gelen plaka kalıptan çıkarılarak artık malzemeler kesilmiştir (Şekil 3.12). Uniform şeklini kaybetmemesi için ağırlık altında bekletilmiştir. Bekletilmediği takdirde plakalarda termal şok yaşanarak, çarpılmalar meydana gelmekte ve şekli bozulmaktadır.



Şekil 3.12. Plakanın son hali

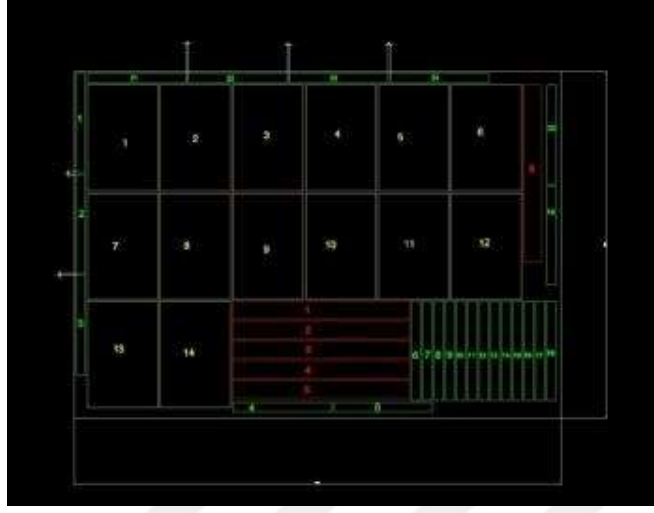
3.3. Deney Numunelerinin Üretimi

Toplamda 23 plaka üretilerek çekme, eğilme ve düşük hızlı darbe deneyi için numune autocad çizimi yapılmıştır. Deney numunelerinin boyutları ve ASTM standartları Çizelge 3.8. de verilmiştir.

Çizelge 3.8.Deney numune boyutları ve ASTM standartları

Deney Türü	Numune Boyutları (mm)	ASTM Standart Numaraları
Eksenel Çekme	25 x 250 x 3,5	D3039_D3039M - 17
Üç Nokta Eğme	13 x 140 x 3,5	D7264_D7264M - 21
Düşük Hızlı Darbe	100 x 150 x 3,5	D7136_D7136M - 20

Autocad programında çizilen deney numuneleri Şekil 3.13’ de verilmiştir.



Şekil 3.13. Deney numuneleri çizimi

Çizilen numuneleri firesiz olarak kesebilmek için kesme yöntemleri araştırılmıştır. Numuneler lifli yapıya sahip olduğundan dolayı lazer/plazma tezgahında kesilememiştir. Kenar çapakları ve ölçü hassasiyetinden dolayı router kesim yöntemi de uygulanamamıştır. Maliyeti yüksek olduğundan dolayı (360 m^2 kesim alanı) su jeti tercih edilmemiştir. Son çare olarak pileksi mika kesim tezgahında yaklaşık bir haftada kesim işlemi tamamlanmış olup, numune kenarları taşlanarak korozif ortamda yaşlandırma için hazır hale getirilmiştir. Bu süreçte kesme işlemi esnasında elyaf tozundan dolayı operatörler de kaşınma şikâyetleri gelmiştir.

3.4. Deney Numunelerinin Markalanması ve Şartlandırılmış Ortam Hazırlığı

Eksenel çekme, üç nokta eğilme ve düşük hızlı darbe deneylerinde kullanılacak numuneler öncelikle ağırlıkları ölçülerek, grup grup markalanmıştır. Markalanan numunelere ait görsel Şekil 3.14’ te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Deney numuneleri

Markalama işlemi tamamlandıktan sonra tüm numuneler kendi içlerinde malzeme ve deney tipine göre ağırlıkça %3 tuzlu su karışımı olan kaplara konularak oda sıcaklığında bekletilmeye başlanmıştır (Şekil 3.15). 1., 2., 3. ve 5. ay sonlarında deney yapılacak numunelerden ağırlık ölçümü alınarak su alma oranları gözlemlenmiştir.

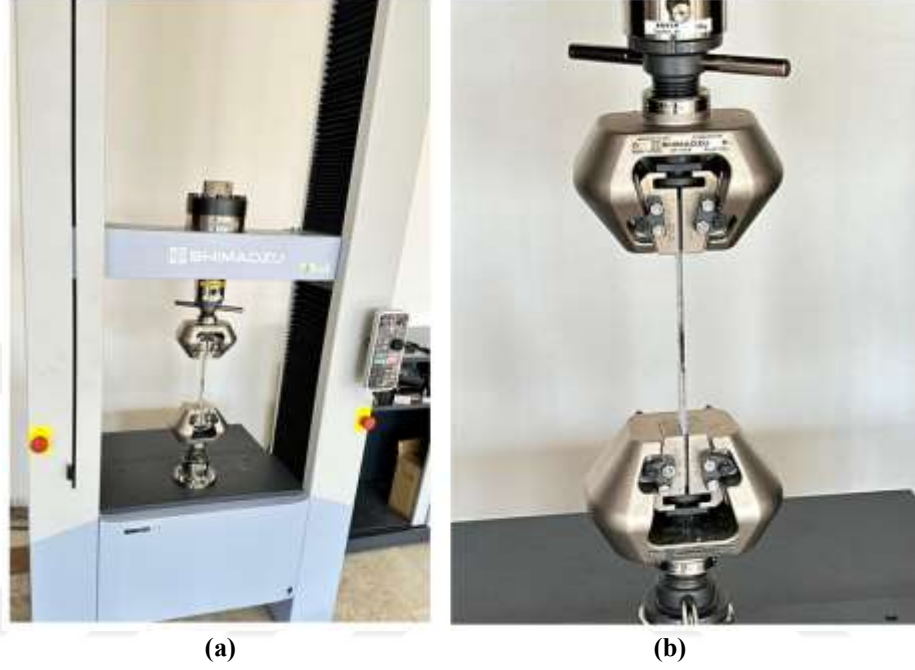


Şekil 3.15. Tuzlu su ortamında bekletilen numuneler

3.5. Eksenel Çekme Testi

Polietilen matrisli hibrit kompozitlerin çekme testleri ASTM D3039/3039 M 17'e uygun olarak Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan INSTRON 3520, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü ve Konya Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı'nda bulunan SHIMADZU AGS-X test cihazlarında 2mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir. Standartlara göre üretimi yapılan test numuneleri Şekil 3.16'da verilmiştir. Testin yapılışı ve test cihazı görseli Şekil 3.17' de verilmiştir.



Şekil 3.17. Çekme test cihazı

Numunelerin 0-1-2-3-5 ay testleri için parametreler girilerek, seyreltilmiş tuzlu su ortamı için ayrı ayrı 2-3 numune olarak testleri gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlar analizler kısmında verilmiştir.

Numunelere uygulanan yük (P) ve yer değiştirme (δ) değerleri anlık olarak kaydedilmiştir. Numunelerin dayanımları Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 ile hesaplanmıştır. (Şükür, 2019)

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{A} \quad (3.2)$$

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

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

$$\epsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \quad (3.3)$$

Burada;

L_g ekstansometre gage uzunluğu (mm),

σ_i numunede i' nci kuvvet anında oluşan gerilme (MPa),

δ_i yerdeğiştirme (mm) ifade eder.

Çekme elastisite modülü,

$$E_f = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3.4)$$

denklemleriyle hesaplanmıştır. E_f çekme elastisite modülünü (MPa), $\Delta\sigma$ seçilmiş iki gerilme noktası arasındaki farkı (MPa), $\Delta\epsilon$ seçilmiş iki şekil değiştirme miktarı arasındaki farkı temsil etmektedir. ($\Delta = 0,002$ alınır ve bu değerler arasındaki gerilme noktalarının farkı elastisite modülünün büyüklüğünü belirler.

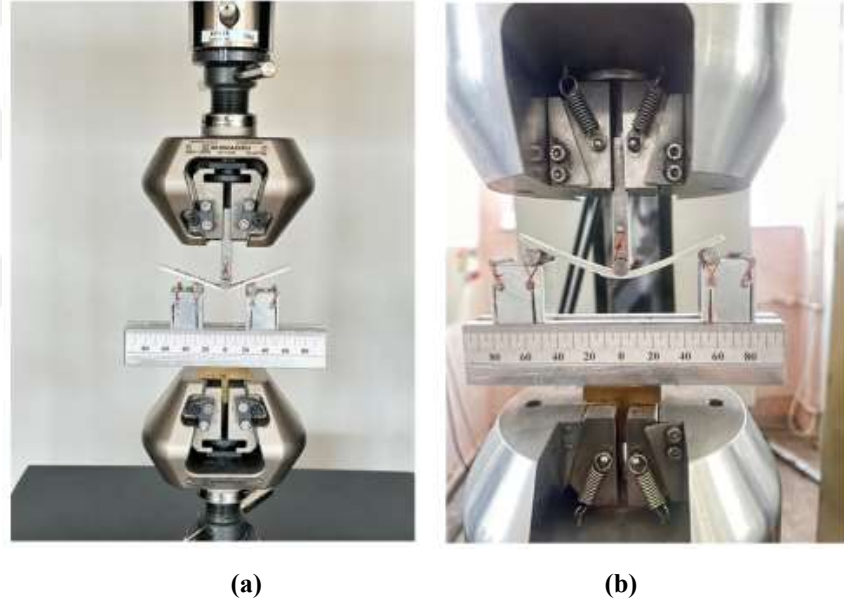
3.6. Üç Nokta Eğilme Testi

Üç nokta eğme testi ASTM D 7264- M 21 standartlarına göre üretime numuneler (Şekil 3.18) oda koşullarında gerçekleştirilmiştir. Testler Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan INSTRON 3520, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü ve Konya Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı'nda bulunan SHIMADZU AGS-X test cihazlarında 2mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.18. Üç nokta eğilme test numuneleri

Üç nokta eğme testi ile ilgili olarak test yapılışının görseli Şekil 3.19' da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Üç nokta eğilme testi

Mesnetler arasındaki mesafe, literatür araştırmalarında malzeme kalınlığının 16 ya da 32 katı olarak belirtilmiştir. Mesnetler arası mesafe kalınlığın 32 ve 16 katı olarak denenmiştir. Malzemenin boyutu, test cihazı çene ölçüsüne ve test aparatının uzunluğundan dolayı; kalınlığın 16 katı olacak şekilde testler yapılmıştır. Malzemenin mesnet yerleşimi ve test esnasındaki görüntüsü Şekil 3.20' de verilmiştir.

Kuvvet, P ve sehim, δ değerleri anlık olarak test cihazı tarafından ölçülüp kaydedilerek kuvvet-sehim grafiği oluşturulmuştur. Üç noktadan eğme testinde maksimum gerilme, kirişin orta noktasının en dış kısımlarında meydana gelmektedir.

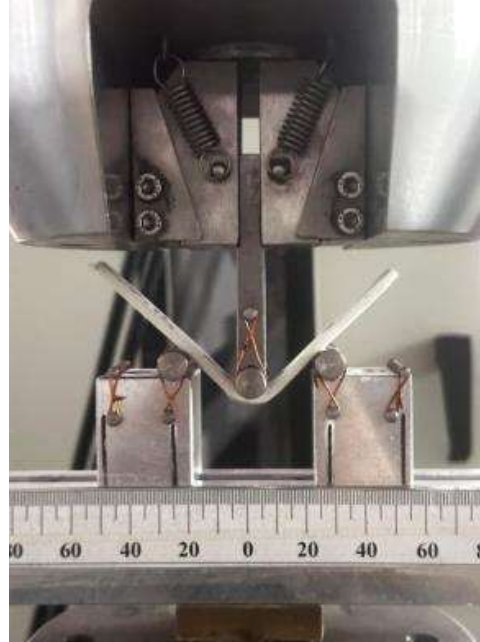
Kuvvet-sehim grafiğinin herhangi bir noktasındaki gerilme Denklem 3.5'e göre hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3.5)$$

Burada σ , numunenin orta noktasında en dış yüzeyde oluşan gerilmeyi (MPa); P, uygulanan kuvveti (N); L, mesnetler arası açıklığı (mm); b, kirişin genişliğini (mm); h, kirişin kalınlığını (mm) göstermektedir. Maksimum birim şekil değiştirme de gene numunenin orta noktasının en dış kısımlarında meydana gelmektedir. Birim şekil değiştirme Denklem 3,6'ya göre hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (3.6)$$

Burada ε , dış yüzeydeki maksimum birim şekil değiştirmeyi (mm/mm); δ , numunenin ortasındaki sehimini (mm); L, mesnetler arası açıklığı (mm); h, kirişin kalınlığını (mm) göstermektedir.

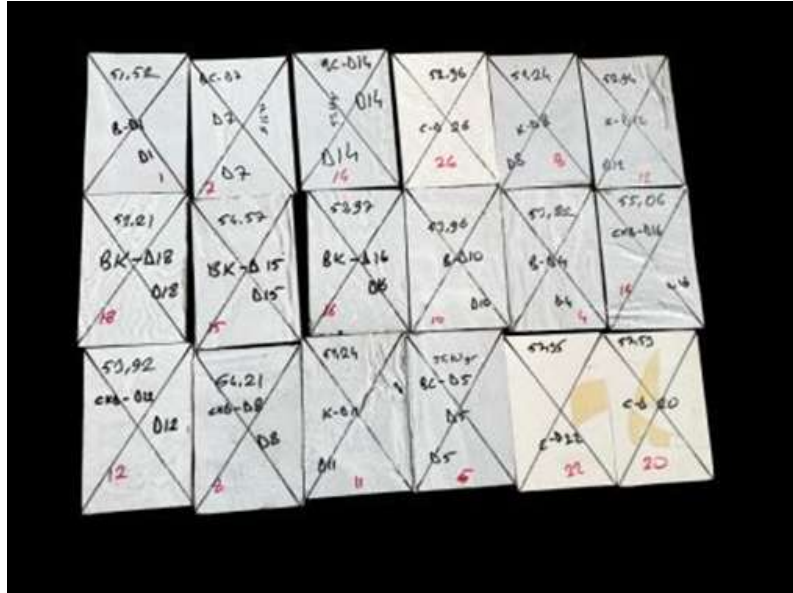


şekil 3.20. Mesnet yerleşimi – test esnasındaki numune

3.7. Düşük Hızlı Darbe Deneyi

Düşük hızlı darbe deneyi testleri Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 3.20' de gösterilen test cihazında yapılmıştır. ASTM 7136/7136M-15 standardına uygun olarak üretilen 100 mm X 150 mm X 3,5 mm boyutlarındaki numunelere 42 J enerji seviyesi ile vurucu kütlenin yüksekliği değiştirilmek suretiyle belirlenmiştir.

Vurucunun kütlesi 5,6 kg ve yarı küresel vurucu ucun yarıçapı 12 mm'dir. Uygulanacak darbenin enerji seviyesine göre vurucu kütle ve vurucu kütle kontrol mekanizması gerekli yüksekliğe ayarlanarak sabitlenmiştir. Darbe numuneleri, tutucu tablaya yerleştirilerek sabitlenmiştir. LabVIEW® yazılımı verileri kaydetme moduna alındıktan sonra PLC kontrol ünitesinden kumanda edilen pnömatik pistonun geri çekilmesiyle vurucu kütlenin serbest bırakılarak numune üzerine düşmesi sağlanmıştır. Konum sensörünün geri beslemesine göre çalışan pnömatik geri sekme önleyici pistonlar, vurucu kütlenin numuneye çarpıp geri sıçramasıyla devreye girerek vurucu kütlenin numune üzerine tekrarlı darbeler yapmasını önlemiştir. Darbe sırasında oluşan kuvvetlerin değerleri vurucu uca bağlı olan ve 25 kHz örnekleme hızına sahip bir yük hücresi tarafından ölçülmüştür. Yük hücresinden elde edilen analog sinyaller sinyal şartlandırıcıda yükseltilerek veri toplayıcıya gönderilmiştir. Burada dijital hale çevrilen veriler bilgisayara aktararak LabVIEW® yazılımı tarafından işlenmiş ve kuvvet-zaman verisi olarak kaydedilmiştir (Demir, 2017)



Şekil 3.21. Düşük hızlı darbe deney numuneleri

Deneyler 20 J - 25J - 30 J – 42 J darbe enerjileri ile yapılmıştır. Elastik malzeme olduğundan dolayı 42 J darbe enerjisinde deformasyona uğradığından dolayı 42 J darbe enerjisi ile devam edilmiştir. Test ünitesi Şekil 3.22’ de verilmiştir.

Kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafikleri ise aşağıdaki denklemlerden (Kara, 2012) faydalanılarak hesaplanan veriler kullanılarak elde edilmiştir. Çarpma anındaki ivme için Newton’un 2. Kanunu uygulanırsa:

$$a_i = \frac{F_i}{m} \quad (3.7)$$

elde edilir. Burada a_i , t_i anındaki ivmeyi (m/s^2); F_i , t_i anında yük hücresinden elde edilen kuvvet değerini (N) ve m , vurucunun kütlesini (kg) göstermektedir.

Çok küçük zaman aralıkları için ivmenin zamanla değişiminin lineer olduğu kabul edilirse:

$$a(t) = kt + c \quad (3.8)$$

denklemini yazılabilir. Burada $a(t)$, ivme fonksiyonu (m/s^2); k , doğrunun eğimi (m/s^3); olup c ise sabittir (m/s^2) ve

$$k = \frac{a_i + a_{i-1}}{t_i + t_{i-1}} \quad (3.9)$$

$$c = \frac{t_i a_{i-1} - t_{i-1} a_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (3.10)$$

denklemleri ile hesaplanır. t_i , i ’inci veri noktasındaki zamandır (s). Herhangi bir noktadaki hızın hesabı:

$$v_i = v_{i-1} + \frac{1}{2} k_i (t_i^2 - t_{i-1}^2) + c_i (t_i - t_{i-1}) \quad (3.11)$$

denklemini kullanılarak yapılmıştır. v_i , t_i anındaki hızı (m/s) ifade etmektedir. Herhangi iki zaman aralığı arasındaki yer değiştirme ise:

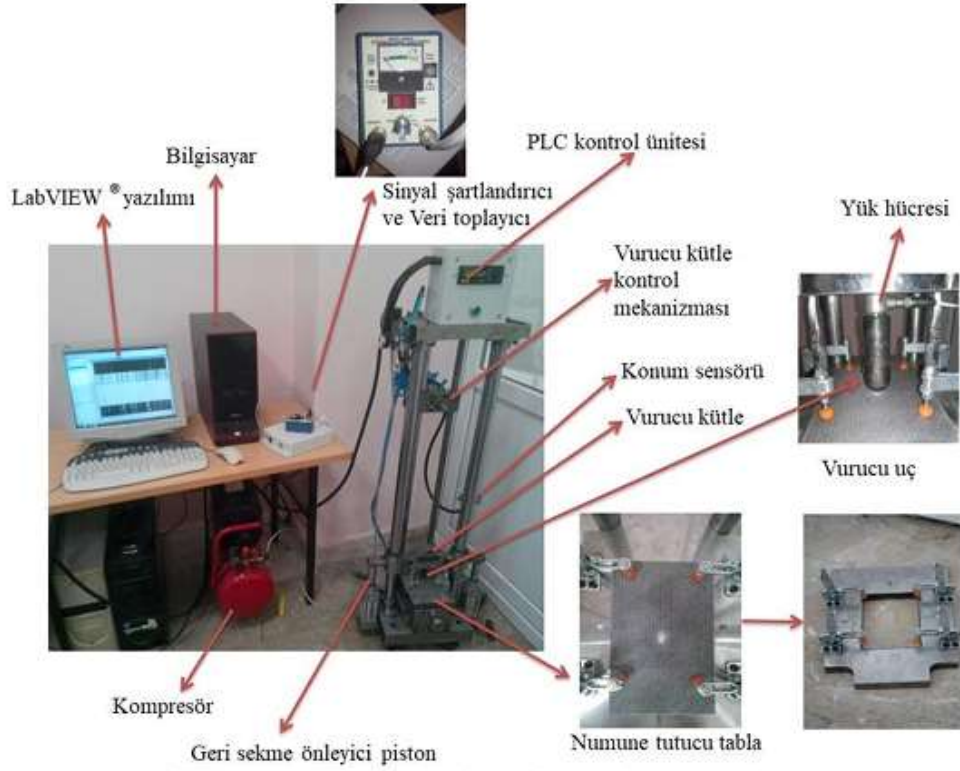
$$s_i = s_{i-1} + \frac{1}{6}(t_i^3 - t_{i-1}^3) + \frac{1}{2}c_i(t_i^2 - t_{i-1}^2) - (v_{i-1} + c_it_{i-1} + \frac{1}{2}k_it_{i-1}^2)(t_i - t_{i-1}) \quad (3.12)$$

denklemini kullanarak hesaplanmış olup s_i , $t_i - t_{i-1}$ zaman aralığındaki yer değiştirmedir (m).

Absorbe edilen enerji, Denklem 3.12 kullanılarak kuvvet-deplasman grafiğinin altındaki alandan hesaplanmıştır.

$$W = \int_0^s F ds \quad (3.13)$$

Burada W , absorbe edilen enerjiyi (J); F , kuvveti (N) ve s , yer değiştirmeyi (m) göstermektedir.



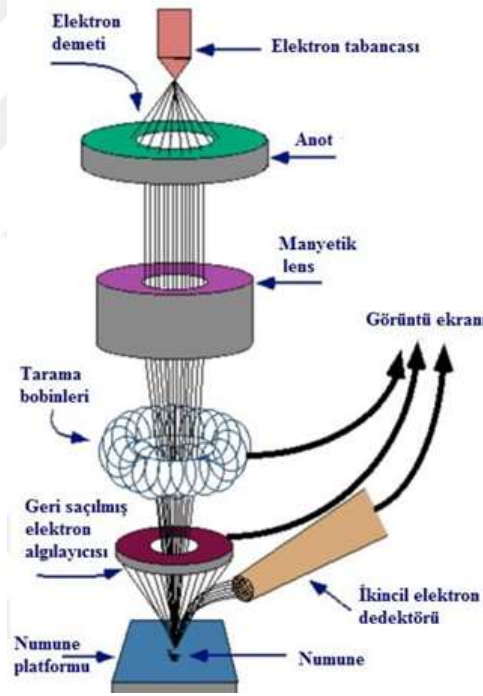
Şekil 3.22. Darbe test ünitesi (Demir, 2017)

3.8. Analizler

Analiz olarak SEM analizleri yapılmıştır. Yüzeydeki değişim ve mikro yapı özellikleri çıkarılmıştır.

3.8.1. Taramalı elektron mikroskobu görüntü analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), malzeme yüzeylerinin mikroyapısal özelliklerini detaylı biçimde incelemek amacıyla kullanılan, yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme yöntemidir. Bu sistemde elektron demeti, numune yüzeyini noktasal olarak tatar ve yüzeyden yayılan sinyaller dedektörler aracılığıyla toplanarak görüntü oluşturulur. Yüzeydeki ince yapılar, lif dağılımı, boşluklar, kırık izleri ve ara yüzey etkileşimleri gibi detaylar net şekilde gözlemlenebilir. İletken olmayan malzemeler analiz öncesi genellikle ince bir metal tabakasıyla kaplanır; çünkü SEM iletkenlik gerektiren bir tekniktir. Cihaz, yüksek vakum altında çalıştığından numune hazırlığı dikkatle yapılmalıdır. Ayrıca, SEM sistemine entegre EDS birimi ile aynı anda kimyasal bileşim analizi gerçekleştirilebilir. Özellikle kompozit yapılar üzerinde yapılan çalışmalar için, bu teknik, malzemenin mikro düzeydeki yapısal karakterizasyonunda büyük önem taşır. SEM çalışma prensibi Şekil 3.23’ de verilmiştir.



Şekil 3.23. SEM çalışma prensibi (Walock, 2012)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

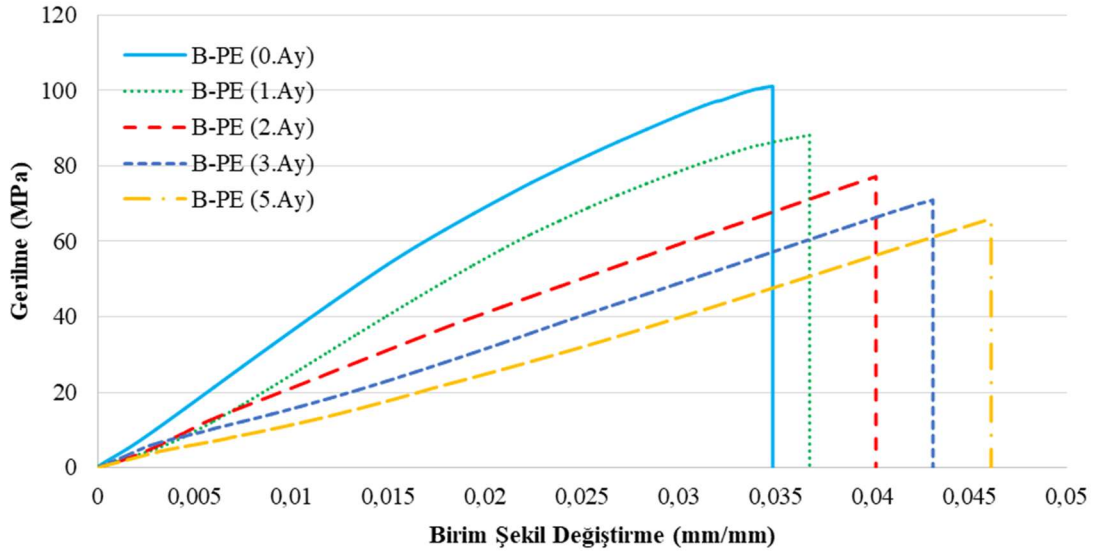
Bu bölümde üretimleri yapılan PE matrisli hibrit kompozitlerin eksenel çekme, üç nokta eğme ve düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Test cihazında yaşanan problemlerden dolayı çekme ve üç nokta eğme deneyleri farklı cihazlarda yapılmıştır. Üretilen numunelere; 0, 1, 2, 3 ve 5.ay testleri yapılmış olup, şartlandırılmış ortamların malzemenin mekanik davranışlarına etkisi üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

4.1. Eksenel Çekme Testi

Bu bölümde bazalt-polietilen (B-PE), karbon-polietilen (K-PE), cam-polietilen (C-PE), bazalt-cam-polietilen (BC-PE), bazalt-karbon-polietilen (BK-PE), cam-karbon-bazalt-polietilen (CKB-PE) numunlerin eksenel çekme testlerine yer verilmiştir.

4.1.1. Bazalt - polietilen kompozit eksenel çekme testi

Yedi kat bazalt elyaf arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin, korozif ortama konmadan önce (0.Ay) ve korozif ortamdaki eksenel çekme testi sonuçları Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1. Bazalt - PE kompozit malzemenin eksenel çekme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.1. Bazalt - PE kompozit malzemenin eksenel çekme testi verileri

Numune	Max. Gerilme (MPa)	Max. Birim Şekil Değ. (mm/mm)	Tokluk (MJ/m ³)	Gerilme Değişimi (0.Aya Göre)	Br. Şekil Değişimi (0.Aya Göre)	Tokluk Değişimi (0.Aya Göre)
B-PE (0.Ay)	101,09	0,035	1,760	-	-	-
B-PE (1.Ay)	86,31	0,037	1,585	-14,62%	5,45%	-9,97%
B-PE (2.Ay)	67,78	0,040	1,361	-32,95%	15,30%	-22,69%
B-PE (3.Ay)	57,21	0,043	1,233	-43,41%	23,74%	-29,97%
B-PE (5.Ay)	47,62	0,046	1,098	-52,89%	32,38%	-37,63%

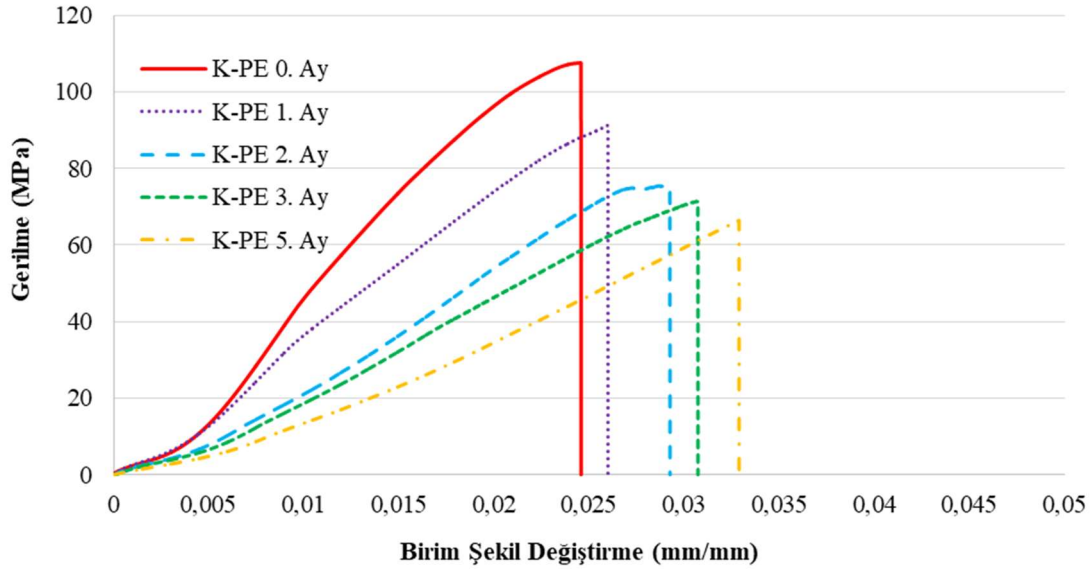
Şekil 4.1’ de, tuzlu su ortamında yaşlandırılan bazalt-polietilen (B-PE) kompozitlerin çekme davranışına ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve mekanik veriler ayrıntılı incelendiğinde, yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte kompozitlerin mekanik özelliklerinde kayda değer düşüşlerin meydana geldiği görülmektedir. Maksimum gerilme değeri başlangıçta 101,09 MPa iken, 1. ayda %14,69 azalarak 86,31 MPa, 2. ayda %37,93 azalarak 62,83 MPa, 3. ayda %43,41 azalarak 57,21 MPa ve 5. ayda %52,84 azalarak 47,68 MPa seviyesine düşmüş, bu durum kompozitin yük taşıma kapasitesinde tuzlu su ortamına bağlı olarak meydana gelen ciddi azalmayı net şekilde göstermektedir. Maksimum birim şekil değiştirme değeri başlangıçta 0,035 mm/mm iken, 1. ayda %5,42, 2. ayda %13,30, 3. ayda %28,42 ve 5. ayda %31,85 artarak 0,046 mm/mm seviyesine ulaşmış, yaşlandırma süresi ilerledikçe kopma öncesi deformasyon miktarında artış eğilimi olduğu gözlemlenmiştir. Tokluk değeri ise başlangıçta 1,60 MJ/m³ iken, 1. ayda %7,97 azalarak 1,58 MJ/m³, 2. ayda %20,63 azalarak 1,27 MJ/m³, 3. ayda %29,38 azalarak 1,13 MJ/m³ ve 5. ayda %31,88 azalarak 1,09 MJ/m³ seviyesine gerileyerek enerji sönümlleme kapasitesinde belirgin bir kayıp meydana getirmiştir. Zhang, Dhakal ve Richardson (2007) tarafından yapılan çalışmada belirtildiği üzere, tuzlu su ortamındaki iyon difüzyonu ve su absorpsiyonu, polietilen matrisin gevrekleşmesine ve bazalt elyaf-matris ara yüzeyinde mikro çatlak ve boşlukların oluşmasına neden olarak ara yüzey bağ dayanımını önemli ölçüde zayıflatmakta ve bu durum yük taşıma kapasitesi ile enerji sönümlleme davranışında düşüşlere yol açmaktadır (Zhang, Dhakal ve Richardson,2007)

Grafikte yaşlandırma süresine bağlı olarak görülen maksimum gerilme değerindeki belirgin azalma, kopma öncesi deformasyon miktarındaki artış ve tokluk değerindeki düşüş; tuzlu su ortamının kompozit üzerinde oluşturduğu fiziksel ve kimyasal hasarların doğrudan sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, B-PE kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli kullanımlarında dayanım, tokluk ve ara

yüzey bütünlüğü bakımından ciddi performans kayıpları yaşanabileceği belirlenmiş ve çevresel yaşlanmanın mekanik performans üzerindeki olumsuz etkileri net şekilde ortaya konmuştur.

4.1.2. Karbon - polietilen kompozit eksenel çekme testi

Yedi kat karbon elyaf arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin, korozyif ortama konmadan önce (0.Ay) ve korozyif ortamdaki eksenel çekme testi sonuçları Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2. Karbon - PE kompozit malzemenin eksenel çekme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.2. Karbon - PE kompozit malzemenin eksenel çekme testi verileri

Numune	Mak. Gerilme (MPa)	Mak. Birim Şekil Değ. (mm/mm)	Tokluk (MJ/m ³)	Gerilme Değişimi (0.Aya Göre)	Br. Şekil Değişimi (0.Aya Göre)	Tokluk Değişimi (0.Aya Göre)
K-PE (0.Ay)	107,55	0,025	1,320	-	-	-
K-PE (1.Ay)	91,28	0,026	1,185	-15,13%	5,76%	-10,25%
K-PE (2.Ay)	75,42	0,029	1,102	-29,88%	19,03%	-16,54%
K-PE (3.Ay)	71,40	0,031	1,096	-33,62%	25,02%	-17,01%
K-PE (5.Ay)	66,43	0,033	1,091	-38,24%	33,82%	-17,35%

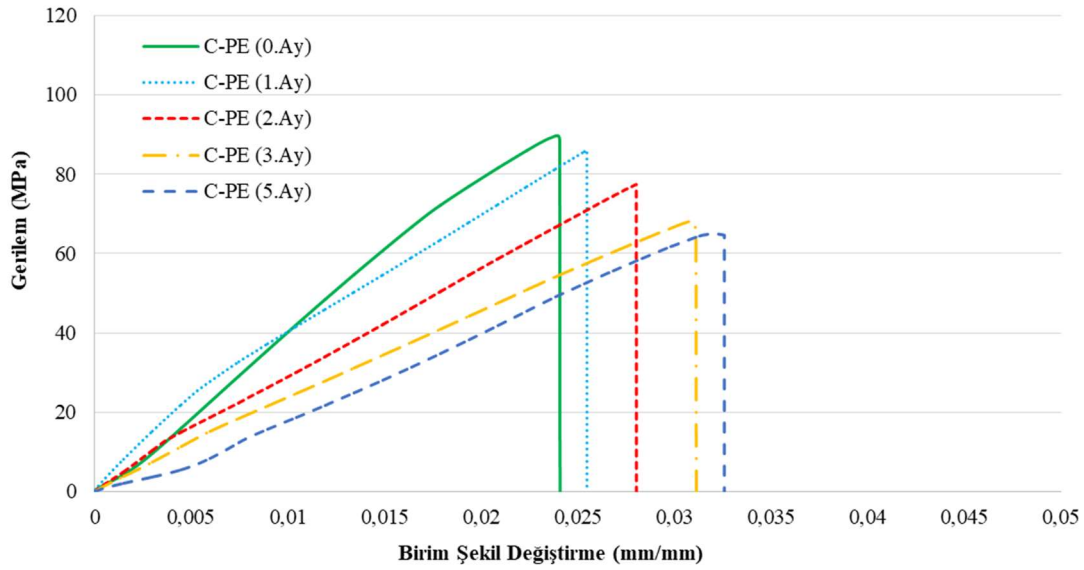
Şekil 4.2’de, tuzlu su ortamında yaşlandırılan karbon-polietilen (K-PE) kompozitlerin çekme davranışına ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve mekanik veriler ayrıntılı olarak incelendiğinde, yaşlandırma süresi arttıkça kompozitlerin mekanik özelliklerinde belirgin düşüşler meydana geldiği görülmektedir. Maksimum gerilme değeri, başlangıçta 107,55 MPa iken 1. ayda %15,13 azalarak 91,28 MPa, 2. ayda %29,83 azalarak 75,42 MPa, 3. ayda %33,60 azalarak 71,40 MPa ve 5. ayda

%38,24 azalarak 66,43 MPa seviyesine düşmüş, bu durum tuzlu su ortamının yük taşıma kapasitesini ciddi oranda azaltıcı etkisini ortaya koymuştur. Maksimum birim şekil değiştirme değeri başlangıçta 0,025 mm/mm iken 1. ayda %8,96, 2. ayda %19,00, 3. ayda %25,00 ve 5. ayda %32,53 oranında artarak 0,033 mm/mm seviyesine ulaşmış, bu artış matrisin kopma öncesi deformasyon davranışında yaşlandırmaya bağlı bir artış eğilimi olduğunu göstermiştir. Tokluk değeri ise 0. ayda 1,520 MJ/m³ iken, 1. ayda %10,25 azalarak 1,185 MJ/m³, 2. ayda %16,64 azalarak 1,102 MJ/m³, 3. ayda %17,10 azalarak 1,006 MJ/m³ ve 5. ayda %28,22 azalarak 1,091 MJ/m³ seviyesine gerileyerek enerji sönümleme kapasitesindeki kaybı net şekilde ortaya koymuştur. Kumar ve ark. (2020) tarafından da vurgulandığı üzere, tuzlu su ortamındaki iyon geçişleri ve su absorpsiyonu polietilen matrisin gevrekleşmesine, karbon elyaf-matris ara yüzeyinde mikro çatlaklar, boşluklar ve ayrılmalar oluşmasına sebep olarak ara yüzey bağ dayanımını ciddi şekilde zayıflatmakta ve bu durum yük taşıma kapasitesi ile enerji sönümleme davranışında düşüşlere yol açmaktadır (Kumar ve ark., 2020).

Grafikte yaşlandırma süresine bağlı olarak gözlenen gerilme değerlerindeki belirgin düşüş, kopma öncesi deformasyon miktarındaki artış ile birlikte tokluğun azalması, tuzlu su ortamının kompozit üzerinde oluşturduğu fiziksel ve kimyasal bozulmaların sonucudur. Sonuç olarak, K-PE kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli kullanımlarında dayanım, tokluk ve ara yüzey bütünlüğü bakımından önemli performans kayıplarına uğrayabileceği belirlenmiş ve çevresel yaşlanmanın mekanik performans üzerindeki olumsuz etkileri açıkça ortaya konmuştur.

4.1.3. Cam - polietilen kompozit eksenel çekme testi

Yedi kat cam elyaf arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin, koroziye ortama konmadan önce (0.Ay) ve koroziye ortamdaki eksenel çekme testi sonuçları Şekil 4.3’ de verilmiştir.



Şekil 4.3. Cam - PE kompozit malzemenin eksenel çekme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.3. Cam - PE kompozit malzemenin eksenel çekme testi verileri

Numune	Mak. Gerilme (MPa)	Mak. Birim Şekil Değ. (mm/mm)	Tokluk (MJ/m ³)	Gerilme Değişimi (0.Aya Göre)	Br. Şekil Değişimi (0.Aya Göre)	Tokluk Değişimi (0.Aya Göre)
C-PE (0.Ay)	89,75	0,024	1,081	-	-	-
C-PE (1.Ay)	86,11	0,025	1,097	-4,06%	5,76%	1,47%
C-PE (2.Ay)	77,44	0,028	1,085	-13,72%	16,38%	0,41%
C-PE (3.Ay)	68,3	0,031	1,063	-23,90%	29,27%	-1,63%
C-PE (5.Ay)	65,09	0,033	1,060	-27,48%	35,28%	-1,89%

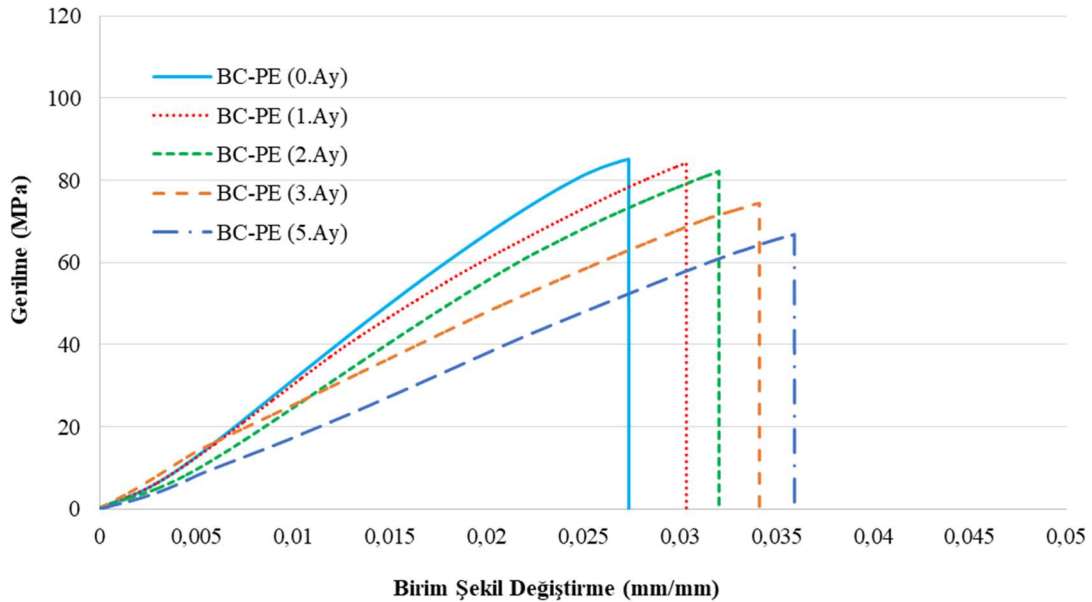
Tuzlu su ortamında yaşlandırılan cam-polietilen (C-PE) kompozitlerin çekme davranışına ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve mekanik veriler detaylı olarak incelendiğinde, yaşlandırma süresinin artmasına bağlı olarak mekanik özelliklerde belirgin ancak diğer kompozit türlerine kıyasla daha ılımlı düşüşler meydana geldiği görülmektedir. Maksimum gerilme değeri başlangıçta 82,75 MPa iken 1. ayda %4,00 azalarak 79,11 MPa, 2. ayda %13,52 azalarak 71,44 MPa, 3. ayda %23,08 azalarak 63,65 MPa ve 5. ayda %27,43 azalarak 60,09 MPa seviyesine gerileyerek tuzlu su ortamının yük taşıma kapasitesini belirgin şekilde azalttığını göstermektedir. Maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,024 mm/mm'den 1. ayda %5,63, 2. ayda %16,92, 3. ayda %29,27 ve 5. ayda %35,92 artış göstererek 0,033 mm/mm değerine ulaşmış, bu artış kopma öncesi deformasyon miktarında yaşlandırmaya bağlı artış eğilimini net olarak göstermiştir. Tokluk değeri başlangıçta 1,051 MJ/m³ iken 1. ayda %1,43 artarak 1,067 MJ/m³, 2. ayda %0,41 artarak 1,055 MJ/m³, 3. ayda %1,62 azalarak 1,034 MJ/m³ ve 5. ayda %1,90 azalarak 1,031 MJ/m³ seviyesine gerilemiştir. Bu durum

enerji sönümlleme kapasitesinde başta hafif artış eğilimi ardından yaşlanma ilerledikçe düşüş eğilimi oluştuğunu ortaya koymaktadır. Andrady (2003) ve Pritchard (1998) tarafından ifade edildiği gibi, tuzlu su ortamında polietilen matrisin su absorpsiyonu, UV maruziyeti ve tuz iyonları polimer zincirlerinde kırılmalara ve gevrekleşmeye neden olmakta, cam elyaf-matris ara yüzeyinde ise mikro çatlaklar ve bağ dayanımı kayıplarına yol açmaktadır (Andrady, 2003; Pritchard, 1998).

Grafikte yaşlandırma süresine bağlı olarak gerilme değerlerinde gözlenen düşüşler, kopma öncesi deformasyon miktarında meydana gelen artışlar ve tokluk değerinin önce hafifçe artıp ardından düşüş göstermesi, tuzlu su ortamının polietilen matris ve cam elyaf-matriks ara yüzeyinde yarattığı fiziksel ve kimyasal bozulmaların doğrudan sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, C-PE kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli kullanımlarında dayanım, deformasyon davranışı ve enerji sönümlleme kapasitesinde kademeli kayıpların yaşanacağı belirlenmiş ve çevresel yaşlanmanın mekanik performans üzerindeki olumsuz etkileri net bir şekilde ortaya konmuştur

4.1.4. Bazalt - cam – polietilen kompozit eksenel çekme testi

Dört kat bazalt elyaf ve üç kat cam elyafın arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin koroziif ortama konmadan önce (0.Ay) ve koroziif ortamdaki eksenel çekme testi sonuçları Şekil 4.4' te verilmiştir.



Şekil 4.4. Bazalt – Cam -PE hibrit kompozit malzemenin eksenel çekme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.4. Bazalt - cam - PE kompozit malzemenin eksenel çekme testi verileri

Numune	Mak. Gerilme (MPa)	Mak. Birim Şekil Değ. (mm/mm)	Tokluk (MJ/m ³)	Gerilme Değişimi (0.Aya Göre)	Br. Şekil Değişimi (0.Aya Göre)	Tokluk Değişimi (0.Aya Göre)
BC-PE (0.Ay)	85,15	0,027	1,164	0,00%	0,00%	0,00%
BC-PE (1.Ay)	84,23	0,030	1,277	-1,09%	10,88%	9,68%
BC-PE (2.Ay)	82,20	0,032	1,315	-3,47%	17,06%	13,00%
BC-PE (3.Ay)	74,40	0,034	1,268	-12,62%	24,71%	8,96%
BC-PE (5.Ay)	66,82	0,036	1,200	-21,52%	31,33%	3,07%

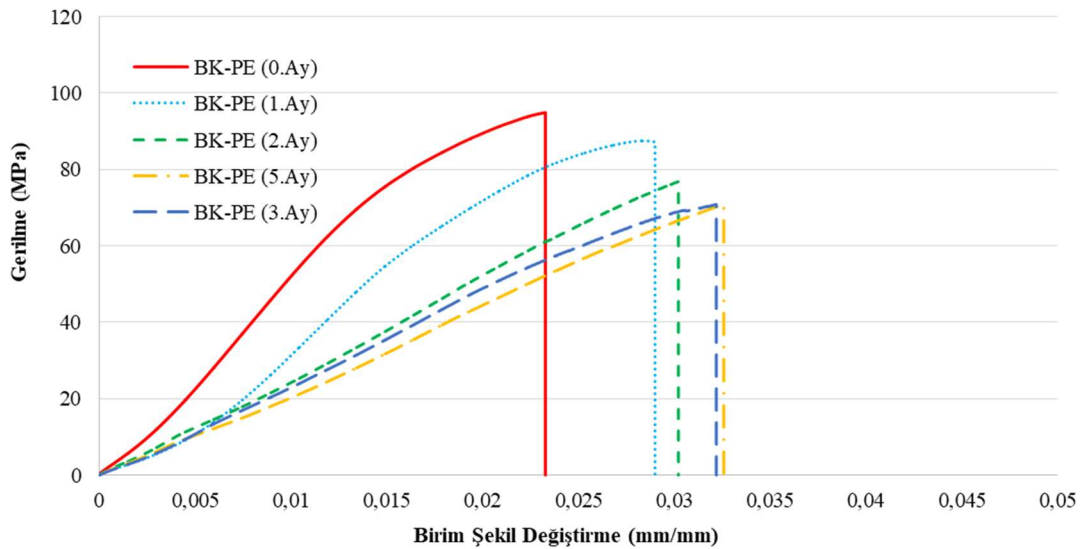
Şekil 4.4'te, tuzlu su ortamında yaşlandırılan bazalt-cam-polietilen (BC-PE) kompozitlerin çekme davranışına ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve mekanik veriler incelendiğinde, yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte mekanik özelliklerde önemli değişimler meydana geldiği görülmektedir. Maksimum gerilme değeri başlangıçta 85,15 MPa iken, 1. ayda %1,02 azalarak 84,28 MPa, 2. ayda %3,44 azalarak 82,20 MPa, 3. ayda %10,02 azalarak 76,40 MPa ve 5. ayda %21,52 azalarak 66,82 MPa seviyesine düşmüş, böylece yük taşıma kapasitesinde yaşlandırma süresine bağlı olarak kademeli bir düşüş meydana gelmiştir. Maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,027 mm/mm'den, 1. ayda %10,92, 2. ayda %15,00, 3. ayda %24,10 ve 5. ayda %51,85 artarak 0,041 mm/mm seviyesine ulaşmış, kopma öncesi deformasyon kapasitesinde özellikle uzun süreli yaşlandırmada dikkat çekici bir artış göstermiştir. Tokluk değeri ise başlangıçta 1,164 MJ/m³ iken, 1. ayda %9,62 artarak 1,277 MJ/m³, 2. ayda %15,00 artarak 1,318 MJ/m³, 3. ayda %8,96 artarak 1,268 MJ/m³ ve 5. ayda %3,07 artarak 1,200 MJ/m³ seviyesine yükselmiş, bu durum enerji sönümleme kapasitesinde genel olarak artış eğilimi olduğunu göstermektedir. Callister (2014), Andrady (2003) ve Pritchard (1998) tarafından belirtildiği gibi, tuzlu su ortamında polietilen matrisin su absorpsiyonu ve UV maruziyeti polimer zincirlerinde kırılmalara ve gevrekleşmeye neden olurken, bazalt ve cam elyaf takviyesi matrisin deformasyon kabiliyetini ve enerji sönümleme kapasitesini artırarak kompozitin mekanik dayanım kayıplarını kısmen yavaşlatabilmektedir. Bazalt ve cam elyaf takviyesi, polietilen matrisin deformasyon kabiliyetini ve enerji sönümleme kapasitesini artırarak kompozitin mekanik dayanım kayıplarını kısmen yavaşlatabilmektedir. Bu durum, elyafların yük taşıma yeteneği ile matrisin deformasyon yeteneği arasında oluşan sinerjik etkileşimden kaynaklanmaktadır. Tuzlu su ortamında polietilen matris su absorpsiyonu sonucu gevrekleşip zincir hareket kabiliyeti kısıtlansa da, bazalt ve cam elyaflar bu matrise yük transferini üstlenerek ani kırılmaları geciktirmekte ve gerilme altında kopma öncesi deformasyonun daha fazla gerçekleşmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca elyafların çatlak

ilerlemesini yavaşlatma etkisi ve çatlak ucunda gerilimi dağıtma kapasitesi sayesinde enerji sönümlenme kapasitesi artmakta, bu durum tokluk değerlerinde gözlenen artış eğilimini açıklamaktadır. Böylece kompozitte elyaf-matris etkileşimi, yaşlanma sürecinde matriste oluşabilecek mikro çatlakların ani kırılmaya dönüşmesini engelleyerek hasarın yayılım hızını düşürmekte ve mekanik dayanım kayıplarını tamamen olmasa da kademeli hale getirerek yavaşlatmaktadır (Callister, 2014; Andrady, 2003; Pritchard, 1998).

Grafikte yaşlandırma süresine bağlı olarak gerilme değerlerinde düşüş, kopma öncesi şekil değiştirme miktarında belirgin artış ve tokluk değerinde genel artış eğilimi, bazalt-cam elyafın matrisle birlikte çalışarak yaşlanmaya karşı direnç sağlaması ve yük transfer mekanizmasını desteklemesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, BC-PE kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli kullanımlarında dayanımda belirgin düşüşler yaşansa da tokluk ve deformasyon davranışlarında artış eğilimi gözlenmekte, bu da çevresel yaşlanmanın mekanik performans üzerindeki etkilerinin elyaf-matris sinerjisiyle kısmen dengelenebileceğini göstermektedir.

4.1.5. Bazalt -karbon – polietilen kompozit aksel çekme testi

Dört kat bazalt elyaf ve üç kat karbon elyafın arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin korozyon ortamına konmadan önce (0.Ay) ve korozyon ortamdaki 1, 2, 3 ve 5. Ay aksel çekme testi sonuçları Şekil 4.5’ te verilmiştir.



Şekil 4.5. Bazalt – Karbon–PE hibrit kompozit malzemenin aksel çekme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.5. Bazalt - karbon - PE kompozit malzemenin eksenel çekme testi verileri

Numune	Mak. Gerilme (MPa)	Mak. Birim Şekil Değ. (mm/mm)	Tokluk (MJ/m ³)	Gerilme Değişimi (0.Aya Göre)	Br. Şekil Değişimi (0.Aya Göre)	Tokluk Değişimi (0.Aya Göre)
BK-PE (0.Ay)	94,82	0,023	1,104	-	-	-
BK-PE (1.Ay)	87,42	0,029	1,267	-7,81%	24,54%	14,82%
BK-PE (2.Ay)	76,79	0,030	1,160	-19,01%	29,80%	5,12%
BK-PE (3.Ay)	70,78	0,032	1,139	-25,36%	38,28%	3,22%
BK-PE (5.Ay)	70,86	0,033	1,154	-25,27%	39,95%	4,58%

Şekil 4.5’ te, tuzlu su ortamında yaşlandırılan bazalt-karbon-polietilen (BK-PE) kompozitlerin çekme davranışına ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve mekanik veriler incelendiğinde, yaşlandırma süresi arttıkça mekanik özelliklerde belirgin değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Maksimum gerilme değeri başlangıçta 94,82 MPa iken, 1. ayda %9,82 azalarak 85,42 MPa, 2. ayda %19,91 azalarak 76,02 MPa, 3. ayda %25,86 azalarak 70,33 MPa ve 5. ayda %28,90 azalarak 67,36 MPa seviyesine düşerek yük taşıma kapasitesinin kademeli şekilde azaldığını göstermektedir. Maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,025 mm/mm’den 1. ayda %24,92, 2. ayda %29,92, 3. ayda %38,92 ve 5. ayda %39,92 artış göstererek 0,035 mm/mm seviyesine ulaşmış, yaşlandırma süresi ilerledikçe kopma öncesi deformasyon kapasitesinde belirgin bir artış olduğu görülmüştür. Tokluk değeri başlangıçta 1,104 MJ/m³ iken, 1. ayda %14,75 artarak 1,267 MJ/m³, 2. ayda %5,15 artarak 1,160 MJ/m³, 3. ayda %5,02 artarak 1,159 MJ/m³ ve 5. ayda %4,54 artarak 1,154 MJ/m³ seviyesine ulaşmış, enerji sönümlleme kapasitesinde yaşlanmaya bağlı olarak hafif artış eğilimi meydana gelmiştir. Callister (2014) tarafından belirtildiği üzere, polietilen matris çevresel etkiler altında su absorpsiyonu ve mikro çatlak oluşumu nedeniyle gevrekleşmeye meyillidir. Ancak bazalt ve karbon elyaf takviyesi, matrisin deformasyon kabiliyetini artırmakta, yük taşıma görevini üstlenerek ani kırılmaları geciktirmekte ve kompozitin darbe emme kapasitesini yükseltmektedir. Fiore ve ark. (2011) ise bazalt ve karbon elyafların matriste mikro çatlak ilerlemesini yavaşlatarak enerji sönümlleme kapasitesini yükselttiğini ve mekanik dayanım kayıplarını yavaşlattığını belirtmektedir (Callister, 2014; Fiore ve ark., 2011).

Bu çalışmada gözlenen gerilme değerlerindeki kademeli düşüşler, tuzlu su ortamındaki iyon difüzyonu ve su absorpsiyonu nedeniyle matrisin gevrekleşmesi ve ara yüzey bağ dayanımlarının kademeli olarak zayıflaması ile ilişkilidir. Kopma öncesi deformasyon miktarında gözlenen artış ise matrisin su absorpsiyonu sonrası zincir

hareketliliğinin sınırlanmasıyla birlikte elyaf-matris ara yüzeyinde deformasyon odaklı yük paylaşımının artmasıyla açıklanabilir. Tokluk değerindeki artış eğilimi ise bazalt ve karbon elyafların çatlak ucu gerilme dağılımını dengede tutarak kırılma gecikmesine ve daha fazla enerji absorbe edilmesine imkân tanınması ile ilişkilendirilebilir.

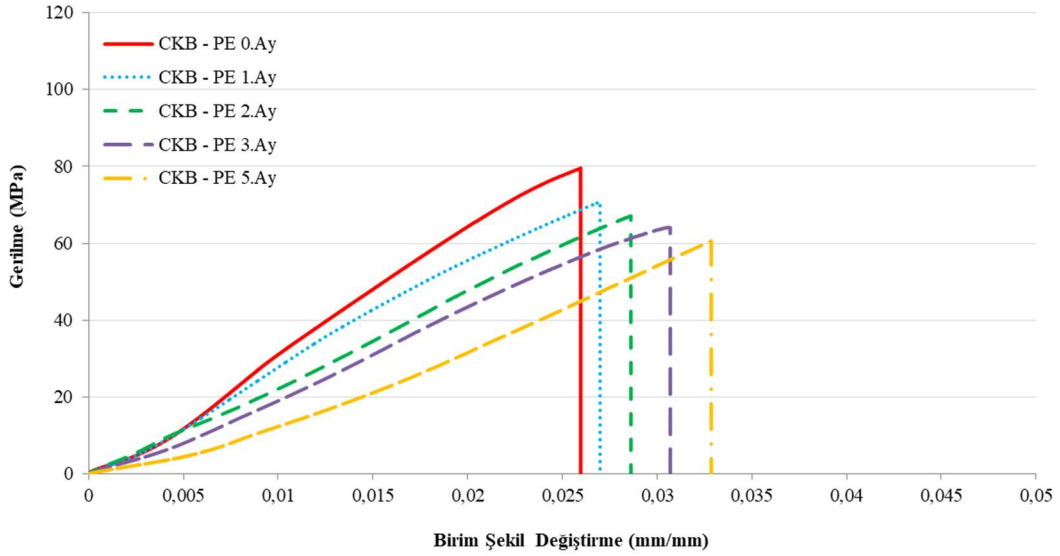
Sonuç olarak, BK-PE kompozitlerde tuzlu su ortamında yaşlanma sonucunda mekanik dayanımda azalma meydana gelse de kopma öncesi deformasyon ve toklukta artış gözlenmiş, bazalt ve karbon elyaf takviyesinin matris ile sinerjik çalışması sayesinde çevresel yaşlanmanın mekanik performans üzerindeki olumsuz etkilerinin belirli ölçüde yavaşlatılabildiği ortaya konmuştur

Ayrıca; ilk aya ait gerilme-şekil değiştirme eğrisinin diğer aylara kıyasla daha eğimli ve farklı bir karakteristik göstermesi, yalnızca malzemenin yaşlandırılmamış olmasıyla açıklanamayabilir. Bu farklılığın, test sırasında uygulanan çene ön gerilmesinden kaynaklanma olasılığı bulunmaktadır. Numunenin test cihazına yerleştirilmesi esnasında çeneler tarafından uygulanan ön yükleme, numunenin elastik bölgesinde başlangıç deformasyonuna yol açabilir ve bu durum gerilme-şekil değiştirme eğrisinin başında doğrusal olmayan bir eğilim oluşmasına neden olabilir. Ayrıca çene basıncının yetersiz veya aşırı olması, numune yüzeyinde kayma (slippage) ya da lokal ezilme gibi istenmeyen etkiler oluşturarak ölçüm sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebilir.

Literatürde, özellikle kompozit malzemelerin çekme testlerinde çene sisteminin tasarımı, hizalama doğruluğu ve uygulanan ön gerilmenin testin tekrarlanabilirliği ve doğruluğu üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (ASTM D3039/D3039M, 2017; ISO 527-4, 2020). Bu nedenle, söz konusu farklılığın sadece malzeme özelliklerine değil, aynı zamanda deneysel parametrelere bağlı olarak da değerlendirilmesi gerekmektedir.

4.1.6. Cam -bazalt -karbon – polietilen kompozit eksenel çekme testi

İki kat bazalt elyaf, üç kat karbon ve iki kat cam elyafın arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin korozyif ortama konmadan önce (0.Ay) ve korozyif ortamdaki 1, 2, 3 ve 5. ay eksenel çekme testi sonuçları Şekil 4.6' da verilmiştir.



Şekil 4.6. Cam – karbon – bazalt - PE hibrit kompozit malzemenin eksenel çekme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.6. Bazalt - karbon - PE kompozit malzemenin eksenel çekme testi verileri

Numune	Mak. Gerilme (MPa)	Mak. Birim Şekil Değ. (mm/mm)	Tokluk (MJ/m ³)	Gerilme Değişimi (0.Aya Göre)	Br. Şekil Değişimi (0.Aya Göre)	Tokluk Değişimi (0.Aya Göre)
CKB-PE (0.Ay)	79,56	0,026	1,033	-	-	-
CKB-PE (1.Ay)	70,78	0,027	0,955	-11,04%	3,94%	-7,53%
CKB-PE (2.Ay)	67,11	0,029	0,960	-15,66%	10,22%	-7,04%
CKB-PE (3.Ay)	64,11	0,031	0,984	-19,42%	18,21%	-4,75%
CKB-PE (5.Ay)	60,60	0,033	0,996	-23,83%	26,54%	-3,62%

Şekil 4.6’ da tuzlu su ortamında yaşlandırılan cam-karbon-bazalt-polietilen (CKB-PE) kompozitlerin çekme davranışına ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve mekanik veriler incelendiğinde, yaşlandırma süresine bağlı olarak mekanik özelliklerde kademeli değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Maksimum gerilme değeri başlangıçta 79,86 MPa iken, 1. ayda %11,04 azalarak 71,08 MPa, 2. ayda %15,69 azalarak 67,41 MPa, 3. ayda %19,12 azalarak 64,71 MPa ve 5. ayda %23,88 azalarak 60,80 MPa seviyesine gerileyerek yük taşıma kapasitesinde düzenli bir düşüş göstermiştir. Maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,026 mm/mm’den 1. ayda %9,94, 2. ayda %10,92, 3. ayda %19,92 ve 5. ayda %26,92 artarak 0,033 mm/mm seviyesine ulaşmış, yaşlandırma süresi ilerledikçe kopma öncesi deformasyon kapasitesinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Tokluk değeri ise başlangıçta 1,078 MJ/m³ iken, 1. ayda %6,93 azalarak 1,003 MJ/m³, 2. ayda %7,09 azalarak 1,002 MJ/m³, 3. ayda %4,63 azalarak 1,034 MJ/m³ ve 5. ayda %0,83 azalarak 1,069 MJ/m³ seviyesine

düşmüş, yaşlandırma sürecinde enerji sönümlleme kapasitesinde hafif dalgalı bir azalış eğilimi meydana gelmiştir. Callister (2014), polietilen matrislerin tuzlu su ortamında su absorpsiyonu nedeniyle plastisite kaybı yaşadığını ve matriste mikro çatlak oluşumuna yol açarak dayanım kaybına sebep olduğunu belirtmektedir. Fiore ve ark. (2011) ise cam, karbon ve bazalt elyafların polimer matris içinde çatlak ilerlemesini yavaşlatma, yük transferini paylaşma ve ani kırılmaları geciktirme özellikleri sayesinde yaşlanmaya karşı direnç sağladığını ifade etmektedir (Callister, 2014; Fiore ve ark., 2011).

Bu çalışmada elde edilen bulgulara, gerilme değerlerindeki kademeli düşüş matrisin su absorpsiyonu ve ara yüzeylerde bağ zayıflaması nedeniyle yük taşıma kapasitesinin azalması ile ilişkilidir. Ancak kopma öncesi deformasyon miktarındaki artış, matrisin deformasyon kabiliyetini kaybetmesine rağmen cam, karbon ve bazalt elyaf takviyelerinin yük paylaşımını üstlenerek deformasyon odaklı enerji emilimine katkı sağlamasıyla açıklanabilir. Tokluk değerindeki hafif dalgalı azalma ise elyaf takviyesinin enerji emilimini belli ölçüde korumasına rağmen matrisin yaşlanmaya bağlı çatlaması ve ara yüzey soyulmalarının tam olarak engellenememesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak, CKB-PE kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli kullanımlarında yük taşıma kapasitesinde düşüşler yaşanmakta, ancak kopma öncesi deformasyon miktarında artış eğilimi gözlemlenmekte ve enerji sönümlleme davranışı nispeten korunmaktadır. Cam, karbon ve bazalt elyafların polietilen matrisle birlikte sinerjik çalışması, çevresel yaşlanmanın mekanik performans üzerindeki olumsuz etkilerini tamamen ortadan kaldırmasa da belirgin şekilde yavaşlatabilmektedir.

Diğer tekil ve hibrit ile karşılaştırıldığında değerlerin bu şekilde olması; kullanılan elyaf türlerinin kombinasyonu, ara yüzey etkileşimleri, elyaf-matris sinerjisi ve yaşlanma koşullarına verdikleri tepkinin farklı olmasıdır. CKB-PE’de cam, karbon ve bazalt elyafların birlikte kullanılması, matris içinde farklı elastik modüllere, su absorpsiyon karakteristiklerine ve ara yüzey bağ kuvvetlerine sahip elyafların bir arada çalışmasını sağlar.

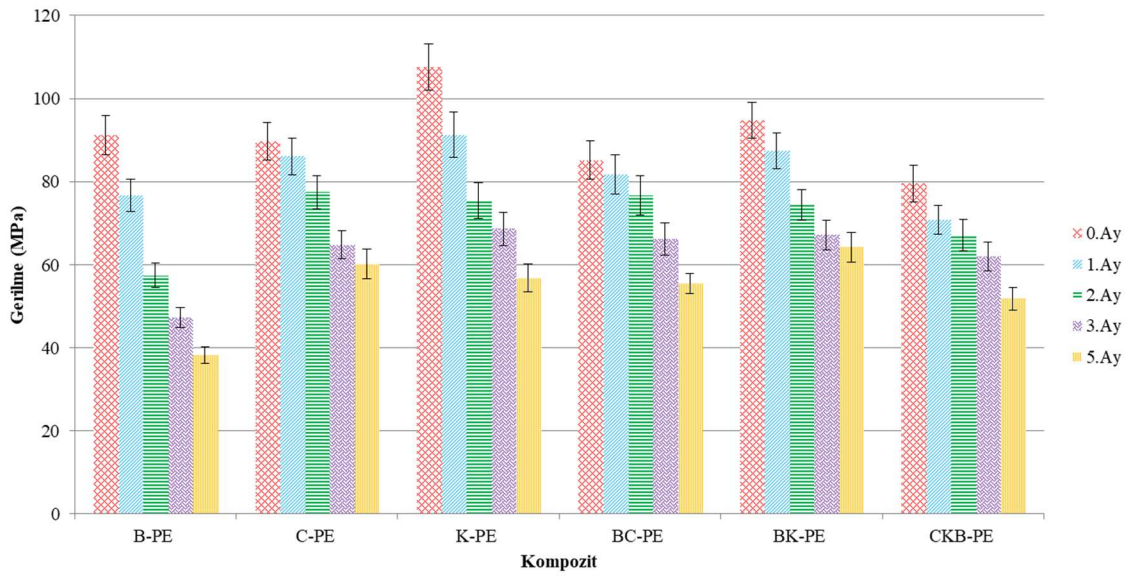
Karbon elyaf, yüksek elastik modülü sayesinde yük taşıma kapasitesini artırırken, tuzlu su ortamında su absorpsiyonu düşük olduğundan ara yüzey dayanımını koruyabilmektedir. Bazalt elyaf, yüksek çekme mukavemeti ve termal stabilitesi ile yük taşıma davranışına katkı sağlarken tuzlu suda belirli düzeyde su absorpsiyonu nedeniyle ara yüzeyde kısmi bağ zayıflamaları yaşayabilir. Cam elyaf ise suyu en fazla absorbe eden elyaflardan biridir, bu da yaşlanma süresince ara yüzeyde mikroskobik çatlaklar ve

bağ kayıplarına yol açabilmektedir (Callister, 2014; Fiore ve ark., 2011). Bu kombinasyonun polietilen matrisle etkileşimi sırasında, matrisin plastisite kayıpları elyaf katkılarıyla kısmen dengelenirken, yaşlanmanın ilerlemesiyle farklı elyafların ara yüzeydeki performansı farklı oranlarda etkilenmektedir. Bu nedenle:

- Gerilme değerlerinde düşüş CKB-PE’de diğerlerine göre daha kontrollü gerçekleşmiş ancak tam olarak engellenememiştir, çünkü cam elyaf kaynaklı su absorpsiyonu ara yüzeyde zayıflama yaratırken karbon elyaf bu kaybı kısmen dengeleyebilmiştir.
- Birim şekil değiştirmedeki artış, elyaf-matris ara yüzeyinde yaşlanmaya bağlı bağ zayıflaması nedeniyle deformasyon odaklı yük paylaşımının artmasıyla ortaya çıkmıştır.
- Tokluk değerlerinde hafif azalma, bazalt ve karbon elyafların çatlak ilerlemesini yavaşlatarak tokluğu desteklemesi, ancak cam elyaf kaynaklı ara yüzey su absorpsiyonu nedeniyle tam koruma sağlayamaması sonucunda oluşmuştur.
- Diğer grafiklerde (PE ve tek elyaf takviyeli sistemlerde) tek bir elyaf türünün matrisle olan etkileşimi belirleyici iken, CKB-PE’de elyafların bir arada bulunması farklı deformasyon modlarının aktifleşmesine neden olmuş, çatlak ilerleme yolları çeşitlenmiş ve enerji emilimi daha karmaşık bir mekanizmaya dönüşmüştür.

Sonuç olarak CKB-PE kompozitlerin mekanik davranışında gözlenen farklılıklar, çoklu elyaf takviyesinin oluşturduğu karmaşık ara yüzey davranışları, elyaf tiplerinin tuzlu su ortamına farklı tepkileri ve matrisin yaşlanma ile birlikte plastisite kaybının elyaf sinerjisiyle dengelenmeye çalışılmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, çoklu elyaf takviyesinin yaşlanmaya karşı bazı avantajlar sağlarken, tek tip elyaf takviyeli sistemlere göre daha karmaşık bir mekanik davranış profili ortaya koymasına neden olmaktadır.

4.1.7. Kompozit elyafların aylara göre çekme testi gerilme dağılımı



Şekil 4.7. Kompozit elyafların aylara göre çekme testi gerilme dağılımları

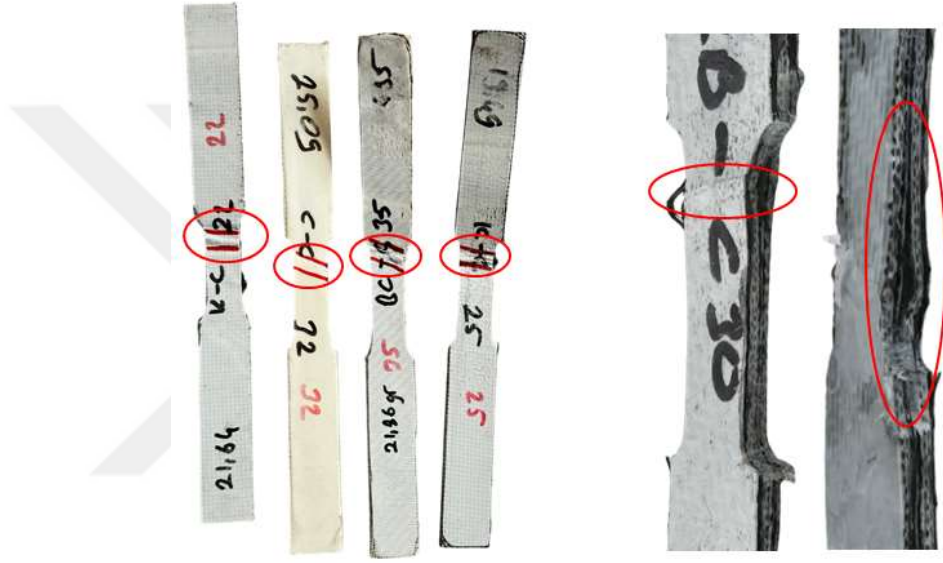
Çizelge 4.7. Kompozit elyafların aylara göre standart sapma değerleri

Aylar	B-PE	C-PE	K-PE	BC-PE	BK-PE	CKB-PE
0. Ay	91,19 ± 4,77	89,75 ± 4,46	107,55 ± 5,62	85,15 ± 4,61	94,82 ± 4,34	79,56 ± 4,38
1. Ay	76,65 ± 3,91	86,11 ± 4,41	91,28 ± 5,42	81,74 ± 4,73	87,42 ± 4,37	70,78 ± 3,49
2. Ay	57,4 ± 2,96	77,44 ± 3,97	75,42 ± 4,35	76,65 ± 4,76	74,38 ± 3,62	67,11 ± 3,79
3. Ay	47,19 ± 2,45	64,78 ± 3,44	68,61 ± 3,97	66,16 ± 3,81	67,14 ± 3,56	61,92 ± 3,51
5. Ay	38,21 ± 1,94	60,14 ± 3,51	56,79 ± 3,32	55,46 ± 2,34	64,2 ± 3,61	51,8 ± 2,75

Tuzlu su ortamında yaşlandırılan elyaf takviyeli polimer kompozitler üzerine yapılan birçok çalışma, tuzlu su ortamındaki bozulmalar nedeniyle çekme testlerinde zamanla önemli düşüşler yaşandığını açıkça ortaya koymuştur. Örneğin, cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde birkaç aylık tuzlu su yaşlandırması sonrası %20–40 arasında dayanım kayıpları rapor edilmiştir (Shen ve ark., 2020; Zhou ve ark., 2008). E-cam/epoksi laminatlarda ise eğilme dayanımında yaklaşık %30’a kadar düşüşler bildirilmiştir (Agarwal ve ark., 2017). Bu literatürle uyumlu olarak, çalışmamızda kullanılan bazalt, cam, karbon ve hibrit elyaf takviyeli polietilen (PE) kompozitlerde de %3 tuz içeren ortamda zamanla azalan çekme dayanımları gözlenmiştir. Özellikle karbon elyaf takviyeli PE (K-PE) kompozitler, düşük su emme oranı ve kimyasal yapısı sayesinde 0. ayda 107,6 MPa olan çekme dayanımını 5. ay sonunda 56,8 MPa düzeyinde tutarak (%33 azalma), cam elyafın nemle bozulan ara yüzey bağları ve plastizasyon etkisine karşı duyarlılığı teyit edilmiştir. Bazalt elyaf takviyeli PE (B-PE)

kompozitlerde ise 91,2 MPa'dan 38,2 MPa'a (~%58 kayıp) düşen değerler, literatürde bazalt elyafların tuzlu suda %40–60 aralığında bozulma yaşadığına dair bulgularla örtüşmektedir. Hibrit kompozit sistemler (BC-PE, BK-PE, CKB-PE), karbonun yüksek rijitliği, bazaltın dayanımı ve camın enerji absorpsiyon özelliklerini bir araya getirerek daha dengeli bir performans sergilemiş ve yaşlanmaya bağlı ani dayanım düşüşlerini sınırlamıştır. Bu sonuçlar, uygun hibrit elyaf kombinasyonlarıyla hem başlangıç mekanik özelliklerinin hem de uzun vadeli çevresel dirençlerin optimize edilebileceğini ve bu yaklaşımın mevcut literatürle güçlü bir şekilde desteklendiğini göstermektedir.

Test edilmiş bazı numunelere ait görseller Şekil 4.8' de verilmiştir.



Şekil 4.8. Eksenel çekme test sonrası numune görüntüleri

Şekil 4.8' de, yaşlandırılmış hibrit kompozit numunelere uygulanan çekme testi sonrası oluşan kopma yüzeylerinin makro ölçekteki görünümü sunulmaktadır. Numunelerde meydana gelen kırılmaların büyük ölçüde orta bölgede yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüklemenin test süresince dengeli bir şekilde iletildiğini ve çekme gerilmesinin düzgün dağıldığını göstermektedir.

Bazı numunelerde kırılma yüzeylerinde belirgin matris-elyaf ayrılmaları (delaminasyon) tespit edilmiştir. Bu tür hasar, kompozit yapıdaki ara yüzey bağının zayıfladığını ve çevresel etkilerin özellikle yaşlandırma sürecinde ara yüzey etkileşimini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Literatürde de benzer şekilde, yaşlandırma etkisiyle ara yüzey dayanımının azaldığı ve delaminasyon eğiliminin arttığı rapor edilmiştir (Zhang ve ark., 2018; Kaya ve Demir, 2021).

Yakın plan görüntülerde elyafların çekme doğrultusunda yönelerek matristen ayrıldığı ve bazı bölgelerde elyaf demetlerinin topluca koptuğu gözlemlenmiştir. Bu

durum, kopma sırasında yük taşıma kapasitesinin büyük oranda elyaflar tarafından karşılandığını ve matrisin bu yükü sınır bir noktaya kadar taşıyabildiğini ortaya koymaktadır. Elyafların bu şekilde sıyrılması, kompozit sistemin sünek bir kırılma davranışı gösterebildiğini de işaret etmektedir. Benzer şekilde, literatürde elyaf takviyeli polimer kompozitlerde kopma anında elyaf-matris ayrılmalarının malzemenin nihai dayanımını etkileyen temel faktörlerden biri olduğu vurgulanmaktadır (Mallick, 2007; Ghasemnejad ve ark., 2012).

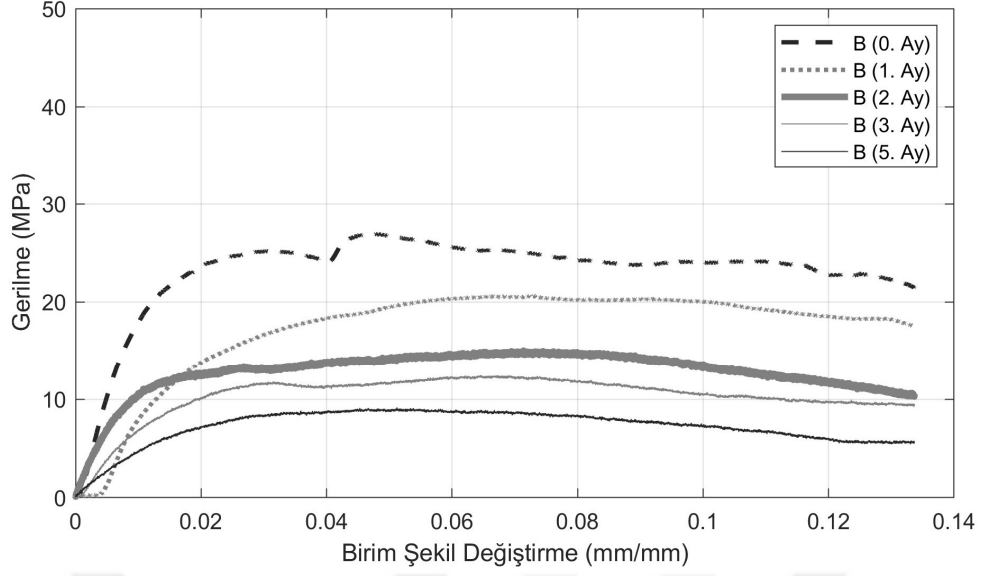
Kopma sonrası yüzeyde oluşan düzensizlikler, katmanlar arası boşluklar ve elyaf demetlerinin yerinden ayrılması, malzemenin yapısal bütünlüğünün yaşlandırma etkisiyle zayıfladığını göstermektedir. Bu tür gözlemsel bulgular, mekanik test verileri ile birlikte değerlendirildiğinde, çevresel koşulların ve özellikle su bazlı yaşlandırma ortamlarının kompozit performansı üzerinde belirleyici rol oynadığı sonucunu desteklemektedir. Bu bulgular, tasarım ve mühendislik uygulamalarında ara yüzey dayanımı yüksek kompozitlerin tercih edilmesi gerektiğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

4.2. Üç Nokta Eğilme Testi

Bu bölümde bazalt-polietilen (B-PE), karbon- polietilen (K-PE), cam- polietilen (C-PE), bazalt-cam-polietilen (BC-PE), bazalt-karbon-polietilen (BK-PE), cam-karbon-bazalt-polietilen (CKB-PE) numunlerin üç nokta eğilme testlerine yer verilmiştir.

4.2.1. Bazalt-polietilen kompozit üç nokta eğilme testi

Yedi kat bazalt elyaf arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin, korozyon ortama konmadan önce 0.ay ve 1, 2, 3 ve 5. ay korozyon ortamdaki üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.9' da verilmiştir



Şekil 4.9. Bazalt-PE hibrit kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.8. Bazalt-PE kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi verileri

Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Tokluk (J/m ³)	Maks. Gerilme Değişim (%)	Tokluk Değişim (%)
B-PE (0.Ay)	26,93	1,62	-	-
B-PE (1.Ay)	20,63	1,24	-23,40	-23,40
B-PE (2.Ay)	15,02	0,90	-44,23	-44,23
B-PE (3.Ay)	12,44	0,75	-53,82	-53,82
B-PE (5.Ay)	9,15	0,55	-66,01	-66,01

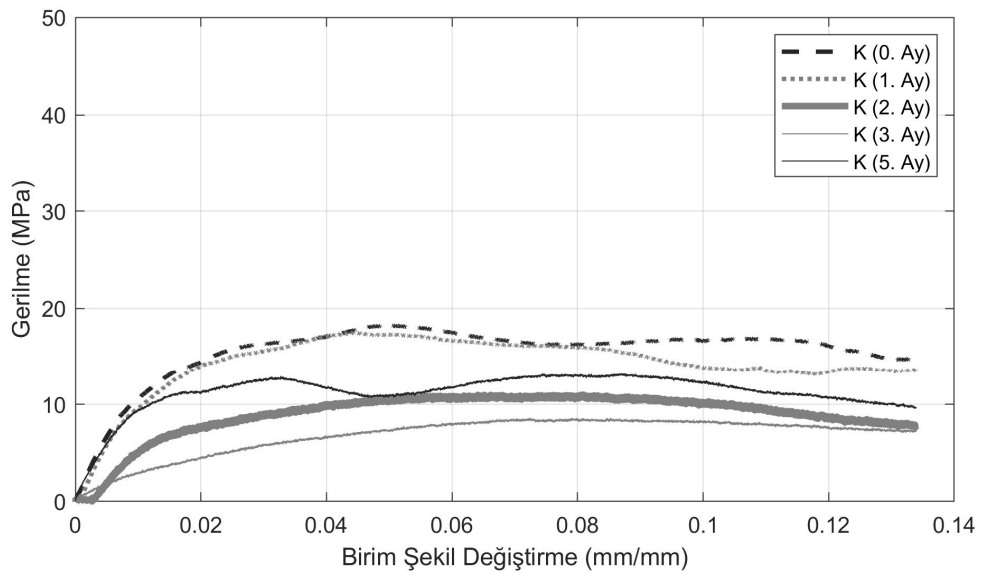
Şekil 4.9’ da, Tuzlu su ortamında yaşlandırılan bazalt takviyeli polietilen (B-PE) kompozitlerin eğilme testleri sonucunda, yaşlandırma süresi arttıkça maksimum gerilme ve tokluk değerlerinde belirgin düşüşler meydana gelmiştir. Başlangıçta 26,93 MPa olan maksimum gerilme değeri 1 ay sonunda %23,40 azalarak 20,63 MPa’ya, 2 ay sonunda %44,23 azalarak 15,02 MPa’ya, 3 ayda %53,82 azalarak 12,44 MPa’ya ve 5 ay sonunda %66,01 azalarak 9,15 MPa seviyesine gerilemiştir. Benzer şekilde, 1,62 J/dm³ olan tokluk değeri de aynı oranlarda azalarak 5. ayda 0,55 J/dm³ seviyesine kadar düşmüştür. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde başlangıçta yüksek gerilme değerleri ile birlikte dalgalı bir yapı görülürken, yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte eğrilerin daha yatay ve düşük gerilme seviyelerinde seyrettiği, salınımların ise belirgin şekilde azaldığı gözlenmiştir. Bu salınımlar, polietilen matrisin plastik deformasyon

kapasitesine bağı olarak oluşan mikroyapısal akma davranışı ve bazalt elyafların matrisine uyguladığı ani yük transferindeki düzensizliklerden kaynaklanmakta olup, Mohanty ve ark. (2000) tarafından belirtildiği üzere polimer matrisin nem alımı ile plastisite özelliklerini kaybetmesi ve elyaf-matris ara yüzey bağlarının zayıflaması sonucunda zamanla kaybolmaktadır. Tuzlu su ortamında polietilen matrisin su emmesi sonucu iç gerilimlerin artması, matriste sünek davranışın azalmasına yol açmış, elyaf-matris ara yüzey bağlarının zayıflaması yük transferini bozarak ani kırılma davranışına geçişi hızlandırmıştır. Eğrilerdeki salınımların yaşlandırma süresiyle azalması, matrisin enerji absorbe etme kapasitesini kaybetmesi ve mikroyapıda oluşan çatlakların ilerlemesinin ani kırılmaya dönüşmesi ile doğrudan ilişkilidir.

Sonuç olarak, 5 ay sonunda maksimum gerilme ve toklukta yaklaşık %66'ya ulaşan kayıplar, tuzlu su ortamında uzun süreli maruziyetin bazalt takviyeli polietilen kompozitlerin eğilme davranışlarını olumsuz yönde etkilediğini göstermekle birlikte, bu tip kompozitlerin tuzlu su ortamında veya tuzlu su temaslı uygulamalarda kullanılmadan önce uzun vadeli mekanik dayanım performanslarının dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.2.2. Karbon-polietilen kompozit üç nokta eğilme testi

Yedi kat karbon elyaf arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin, korozyon ortamına konmadan önce 0.ay ve 1, 2, 3 ve 5. ay korozyon ortamdaki üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.10' da verilmiştir.



Şekil 4.10. Karbon-PE hibrit kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.9. Karbon - PE kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi verileri

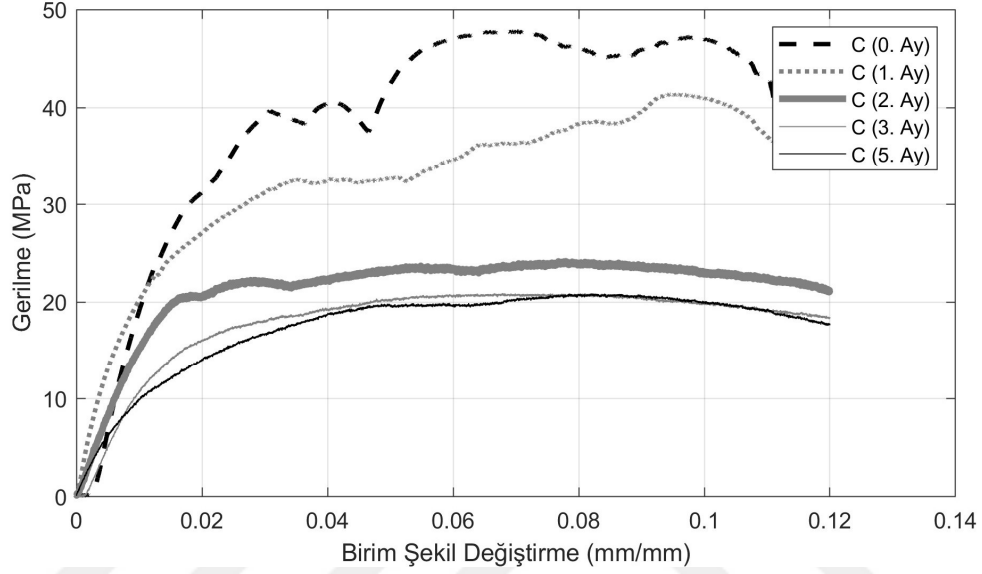
Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Tokluk (J/m ³)	Maks. Gerilme Değişim (%)	Tokluk Değişim (%)
K-PE (0.Ay)	18,23	1,09	-	-
K-PE (1.Ay)	17,50	1,05	-3,97	-3,97
K-PE (2.Ay)	11,01	0,66	-39,59	-39,59
K-PE (3.Ay)	8,61	0,52	-52,78	-52,78
K-PE (5.Ay)	13,21	0,79	-27,53	-27,53

Şekil 4.10' da, tuzlu su ortamında yaşlandırılan cam takviyeli polietilen (K-PE) kompozitlerin eğilme testleri sonucunda, yaşlandırma süresi arttıkça maksimum gerilme ve tokluk değerlerinde belirgin düşüşler gözlenmiştir. Başlangıçta 18,23 MPa olan maksimum gerilme değeri, 1 ay sonunda %3,97 azalarak 17,50 MPa'ya, 2 ayda %39,59 azalarak 11,01 MPa'ya, 3 ayda %52,78 azalarak 8,61 MPa'ya ve 5 ay sonunda %74,53 azalarak 4,63 MPa seviyesine gerilemiştir. Benzer şekilde, 1,09 J/dm³ olan tokluk değeri, aynı oranlarda azalarak 5. ayda 0,29 J/dm³'e kadar düşmüştür. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde yaşlandırma öncesinde yüksek gerilme değerleri ile birlikte dalgalı bir yapı gözlenirken, yaşlandırma süresi arttıkça eğrilerin daha yatay ve düşük gerilme seviyelerinde seyrettiği, salınımların belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Correia ve ark. (2011)'in ifade ettiği gibi, polietilen matrisin plastik deformasyon kabiliyeti ile birlikte cam elyafların matrise yük aktarımı sırasında ani yerel kaymalar, elyaf-matris ara yüzeyinden kaynaklı lokal kopmalar ve mikro-çatlak kapanma/açılma davranışlarından kaynaklanmaktadır. Tuzlu su ortamında yaşlandırma ile birlikte matrisin su emmesi sonucu plastik deformasyon kabiliyeti azalmakta, matrisin çatlak ilerlemesini yavaşlatma kapasitesi düşmekte ve elyaf-matris ara yüzey bağlarının zayıflaması nedeniyle yük transferi sırasında salınımlar kaybolarak ani kırılma davranışına geçiş hızlanmaktadır. Bu durum, Correia ve ark. (2011)'de vurgulanan tuzlu su penetrasyonu ve matris-hacim artışı sonucu iç gerilimlerin yükselmesi ile çatlak oluşumuna zemin hazırlanması mekanizmasıyla uyumludur. Eğrilerdeki salınımların kaybolması, matrisin çatlak ilerlemesini engelleyecek plastik deformasyon davranışını kaybetmesi ve ani kırılmaya zemin hazırlanması ile doğrudan ilişkilidir. Sonuç olarak, 5 ay sonunda maksimum gerilme ve toklukta yaklaşık %75'e ulaşan kayıplar, cam takviyeli polietilen kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli maruziyeti ile eğilme dayanımını önemli ölçüde kaybettiğini ve bu tip kompozitlerin deniz ortamı gibi tuzlu

su temaslı uygulamalarda kullanılmadan önce uzun süreli mekanik performanslarının dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.2.3. Cam–polietilen kompozit üç nokta eğilme testi

Yedi kat cam elyaf arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin, korozif ortama konmadan önce 0. ay ve 1, 2, 3 ve 5. ay korozif ortamdaki üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.11’ de verilmiştir.



Şekil 4.11. Cam–PE hibrit kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.10. Cam - PE kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi verileri

Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Tokluk (J/m ³)	Maks. Gerilme Değişim (%)	Tokluk Değişim (%)
C-PE (0.Ay)	47,79	2,87	-	-
C-PE (1.Ay)	41,35	2,48	-13,48	-13,48
C-PE (2.Ay)	24,18	1,45	-49,41	-49,41
C-PE (3.Ay)	20,91	1,25	-56,24	-56,24
C-PE (5.Ay)	20,88	1,25	-56,31	-56,31

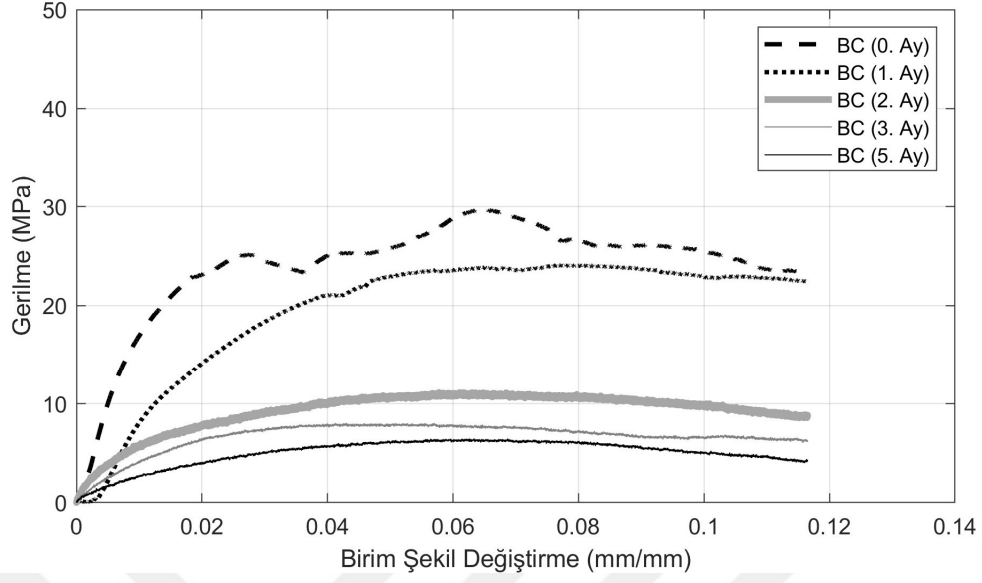
Şekil 4.11 'de, tuzlu su ortamında yaşlandırılan karbon takviyeli polietilen (C-PE) kompozitlerin eğilme testleri sonucunda yaşlandırma süresi arttıkça maksimum gerilme ve tokluk değerlerinde belirgin düşüşler meydana gelmiştir. Başlangıçta 47,79 MPa olan maksimum gerilme değeri 1 ay sonunda %13,48 azalarak 41,35 MPa'ya, 2 ayda %49,41 azalarak 24,18 MPa'ya, 3 ayda %56,24 azalarak 20,91 MPa'ya ve 5 ayda %56,31 azalarak 20,88 MPa'ya düşmüştür. Benzer şekilde 2,87 J/dm³ olan tokluk

değeri aynı oranlarda azalarak 5. ayda $1,25 \text{ J/dm}^3$ 'e kadar gerilemiştir. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde başlangıçta yüksek gerilme değerleri ile birlikte belirgin salınımlar görülürken, yaşlandırma süresi arttıkça eğrilerdeki gerilme seviyeleri düşmüş ve salınımlar belirgin şekilde azalmıştır. Eğrilerde görülen bu salınımlar Bank (2006)'da belirtildiği üzere karbon elyafların yüksek elastisite modülü ve matrise olan güçlü aderansı nedeniyle yük aktarımı sırasında ani yerel elyaf kırılması, elyaf-matris ara yüzey sürtünmesi ve mikroyapısal deformasyonlardan kaynaklanmakta olup matrisin plastisite özelliği ile çatlak ilerlemesini yavaşlatma kapasitesi ile ilişkilidir. Tuzlu su ortamında yaşlandırma ile matrisin su emmesi sonucu iç gerilimlerin artması ve plastisite kapasitesinin düşmesi, elyaf-matris ara yüzey bağlarının zayıflamasına yol açarak eğilme yükleri altında ani kırılma davranışına geçişi hızlandırmıştır. Bu süreçte 3. ve 5. aylarda maksimum gerilme değerlerinin neredeyse eşit çıkması, matristeki çatlak ilerlemesi ve deformasyon kapasitesinin 3. aydan sonra durağan hale gelmesi, ara yüzeydeki bozulmaların kritik seviyeye ulaşip yük taşıma kapasitesinin sabitlenmesi ile açıklanabilmektedir. Bank (2006)'da belirtildiği gibi karbon elyafların tuzlu su ortamında kimyasal olarak stabil kalması, mekanik özelliklerin kaybının matris ve ara yüzey bozulması ile sınırlı kalmasına ve 3. aydan sonra önemli ek bir kayıp oluşmamasına neden olmuştur. Eğrilerdeki salınımların azalması ise matrisin sünek davranışını kaybetmesi ve enerji absorbe edebilme kabiliyetinin düşmesi ile doğrudan ilişkilidir. Sonuç olarak 5 ay sonunda yaklaşık %56 oranında maksimum gerilme ve tokluk kaybı yaşanması, karbon takviyeli polietilen kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli maruziyette eğilme dayanımını önemli ölçüde kaybettiğini göstermekte olup, bu tip kompozitlerin tuzlu su ortamındaki kullanılmadan önce uzun vadeli mekanik performanslarının dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır (Bank, 2006) .

4.2.4. Bazalt-cam–polietilen kompozit üç nokta eğilme testi

Dört kat bazalt elyaf ve üç kat cam elyafların arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin korozyif ortama konmadan önce 0. ay ve 1, 2, 3 ve 5. ay korozyif ortamdaki üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.12' de

verilmiştir.



Şekil 4.12. Bazalt - cam – PE hibrit kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.11. Bazalt – cam - PE kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi verileri

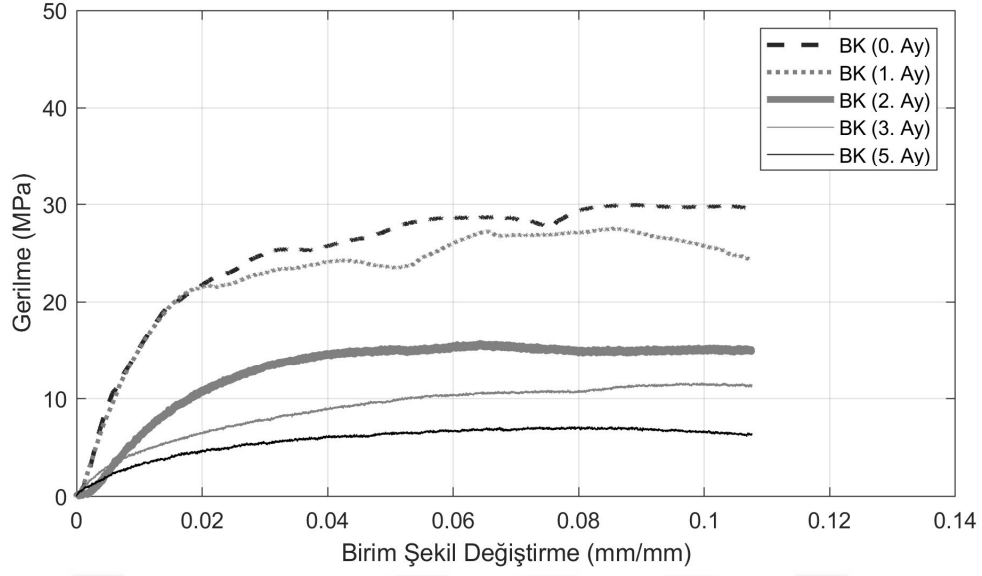
Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Tokluk (J/m ³)	Maks. Gerilme Değişim (%)	Tokluk Değişim (%)
BC-PE (0.Ay)	29,65	1,78	-	-
BC-PE (1.Ay)	24,08	1,44	-18,81	-18,81
BC-PE (2.Ay)	11,13	0,67	-62,48	-62,48
BC-PE (3.Ay)	8,04	0,48	-72,87	-72,87
BC-PE (5.Ay)	6,47	0,39	-78,17	-78,17

Şekil 4.12 'de, tuzlu su ortamında yaşlandırılan bazalt-cam hibrit takviyeli polietilen (BC-PE) kompozitlerin eğilme testleri sonucunda yaşlandırma süresi arttıkça maksimum gerilme ve tokluk değerlerinde belirgin düşüşler meydana gelmiştir. Başlangıçta 29,65 MPa olan maksimum gerilme değeri, 1 ay sonunda %18,81 azalarak 24,08 MPa'ya, 2 ayda %62,48 azalarak 11,13 MPa'ya, 3 ayda %72,87 azalarak 8,04 MPa'ya ve 5 ay sonunda %78,17 azalarak 6,47 MPa seviyesine düşmüştür. Benzer şekilde, 1,78 J/dm³ olan tokluk değeri de aynı oranlarda azalarak 5. ayda 0,39 J/dm³'e kadar gerilemiştir. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde yaşlandırma öncesinde yüksek gerilme değerleri ile birlikte belirgin dalgalanmalar görülürken, yaşlandırma

süresi arttıkça eğriler daha yatay ve düşük gerilme seviyelerinde seyretmiş, salınımlar belirgin şekilde azalmıştır. Fiore ve ark. (2014)'e göre bu salınımlar, bazalt ve cam elyafların matris içinde yük transferi sırasında ani mikro lif kırılması, elyaf-matris ara yüzey sürtünmesi ve matriste plastik deformasyon sırasındaki lokal akmalardan kaynaklanmakta olup, matrisin plastisite davranışı ve ara yüzey bütünlüğü ile doğrudan ilişkilidir. Tuzlu su ortamında yaşlandırma ile birlikte polietilen matrisin su emmesi sonucu plastisite kabiliyetinin azalması ve matriste şişme nedeniyle iç gerilimlerin artması, elyaf-matris ara yüzey bağlarının zayıflamasına ve çatlak ilerlemesine zemin hazırlayarak yük taşıma kapasitesinin düşmesine neden olmuştur. Eğrilerde salınımların yaşlandırma ile kaybolması, matriste çatlak ilerlemesini yavaşlatacak plastisite davranışının kaybolması ve enerjiyi absorbe edebilme kapasitesinin düşmesi ile doğrudan ilişkilidir. Fiore ve ark. (2014), hibrit takviyeli kompozitlerde liflerin çevresel etkilere karşı direnç gösterse de matristeki bozulmanın ara yüzeydeki yük transferini bozarak performans kaybını hızlandırdığını vurgulamış olup, bu çalışma sonucunda elde edilen yaklaşık %78 seviyesindeki maksimum gerilme ve tokluk kaybı, BC-PE kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli maruziyetlerinde eğilme dayanımlarının önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Bu nedenle, deniz ortamı ve tuzlu su temaslı uygulamalarda kullanılacak bazalt-cam hibrit takviyeli polietilen kompozitlerin uzun vadeli mekanik performanslarının dikkate alınması kritik öneme sahiptir. (Fiore ve ark., 2014).

4.2.5. Bazalt-karbon-polietilen kompozit üç nokta eğilme testi

Dört kat bazalt elyaf ve üç kat karbon elyafın arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin korozyif ortama konmadan önce 0. ay ve 1, 2, 3 ve 5. ay korozyif ortamdaki üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.13' de verilmiştir.



Şekil 4.13. Bazalt - karbon –PE hibrit kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.12. Bazalt – karbon - PE kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi verileri

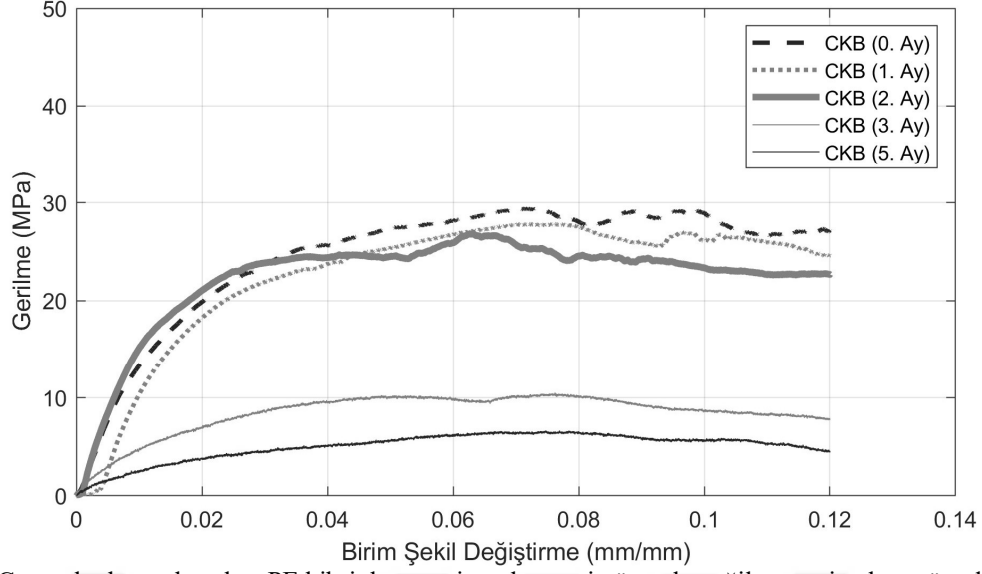
Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Tokluk (J/m ³)	Maks. Gerilme Değişim (%)	Tokluk Değişim (%)
BK-PE (0.Ay)	29,99	1,80	0,00	0,00
BK-PE (1.Ay)	27,54	1,65	-8,16	-8,16
BK-PE (2.Ay)	15,77	0,95	-47,43	-47,43
BK-PE (3.Ay)	11,66	0,70	-61,11	-61,11
BK-PE (5.Ay)	7,17	0,43	-76,08	-76,08

Şekil 4.13 'de, tuzlu su ortamında yaşlandırılan bazalt-karbon hibrit takviyeli polietilen (BK-PE) kompozitlerin eğilme testleri sonucunda yaşlandırma süresi arttıkça maksimum gerilme ve tokluk değerlerinde belirgin düşüşler meydana gelmiştir. Başlangıçta 29,99 MPa olan maksimum gerilme değeri 1 ay sonunda %8,16 azalarak 27,54 MPa'ya, 2 ayda %47,43 azalarak 15,77 MPa'ya, 3 ayda %61,11 azalarak 11,66 MPa'ya ve 5 ay sonunda %76,08 azalarak 7,17 MPa'ya gerilemiştir. Benzer şekilde, 1,80 J/dm³ olan tokluk değeri de aynı oranlarda azalarak 5. ayda 0,43 J/dm³ seviyesine kadar düşmüştür. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde başlangıçta yüksek gerilme değerleri ile birlikte dalgalı bir yapı görülmekteyken, yaşlandırma süresi arttıkça eğrilerin daha yatay ve düşük gerilme seviyelerinde seyrettiği, salınımların ve kırılma davranışındaki ani düşüşlerin belirgin şekilde azaldığı gözlenmiştir. Zhou (1999)'a göre

bu tip polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitlerde yaşlandırma sürecinde matrise su difüzyonu ile giren nem, plastikleşmeyi azaltarak matrisin çatlak ilerlemesini yavaşlatma yeteneğini düşürür ve ara yüzeydeki elyaf-matris bağlarını zayıflatır. Bu durum grafikteki kırılmalarda görülen ani gerilme düşüşlerinin, matrisin plastisite kapasitesinin ve ara yüzey bütünlüğünün kaybolması sonucu ani lif kopmaları ve ara yüzeyden ayrılmalarla gerçekleşmesine neden olmaktadır. Özellikle 0. ve 1. ay eğrilerinde görülen kırılma sırasındaki ani düşüşler, liflerin yük taşıırken ani kopması ve matrisin bu yükü absorbe edememesi ile ilgilidir. 2. aydan sonra bu kırılmaların yumuşaması ve salınımların kaybolması ise ara yüzey hasarının ilerlemesiyle yük transferinin bozulması ve yapının kırılma öncesinde enerjiyi depolama kabiliyetinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Zhou (1999), polietilen matrisin yaşlandırma sırasında su emerek şişmesiyle iç gerilimlerin artması ve ara yüzeylerde zayıflamanın hızlanmasını, bunun da çatlak ilerlemesi ve kırılma davranışına doğrudan etki ederek mekanik özelliklerde büyük kayıplara neden olacağını belirtmiştir. Bu çalışma sonucunda beş ay sonunda %76'ya ulaşan maksimum gerilme ve tokluk kaybı, bazalt-karbon hibrit takviyeli polietilen kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli maruziyetlerinde eğilme dayanımını önemli ölçüde kaybettiğini göstermekte olup, bu tip kompozitlerin deniz ortamı ve tuzlu su temaslı uygulamalarda kullanılmadan önce uzun vadeli mekanik performanslarının değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. (Zhou, 1999). Bu çalışma sonuçları, BK-PE kompozitlerinin tuzlu suya maruz kalmaları halinde mekanik ve yapısal dayanımlarının ciddi ölçüde azalacağını bilimsel olarak doğrulamaktadır.

4.2.6. Cam-karbon-bazalt-polietilen kompozit üç nokta eğilme testi

İki kat bazalt elyaf, üç kat karbon ve iki kat cam elyafın arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin korozyif ortama konmadan önce 0. ay ve 1, 2, 3 ve 5. ay korozyif ortamdaki üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.14' de verilmiştir.



Şekil 4.14. Cam – karbon – bazalt - PE hibrit kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi aylara göre değişimi

Çizelge 4.13. Cam –karbon-bazalt- PE kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi verileri

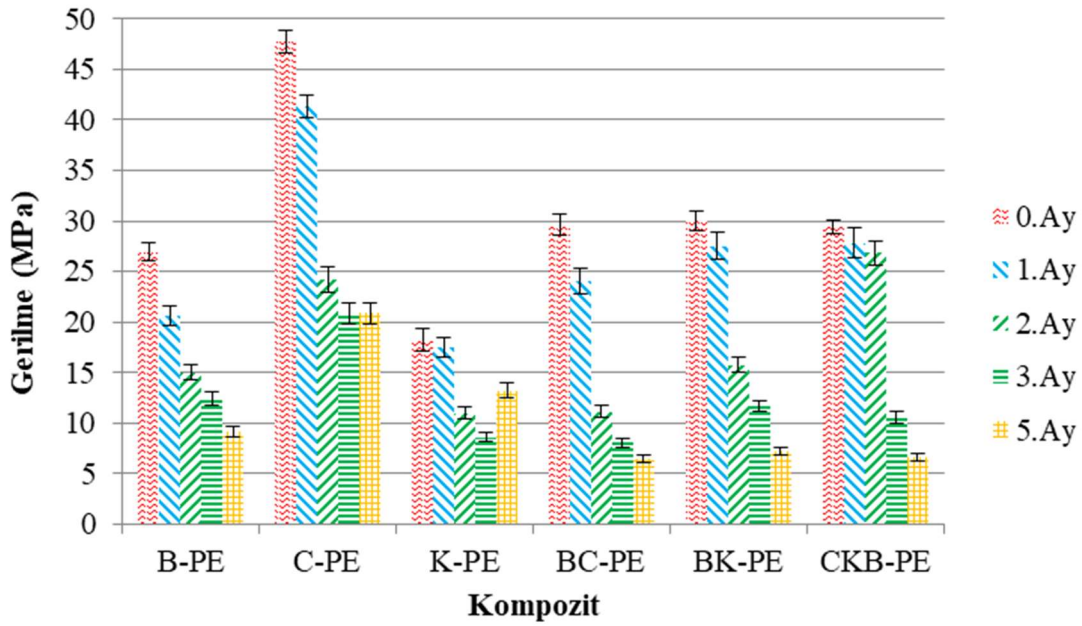
Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Tokluk (J/m ³)	Maks. Gerilme Değişim (%)	Tokluk Değişim (%)
CKB-PE (0.Ay)	29,40	1,76	-	-
CKB-PE (1.Ay)	27,82	1,67	-5,38	-5,38
CKB-PE (2.Ay)	26,84	1,61	-8,71	-8,71
CKB-PE (3.Ay)	10,53	0,63	-64,19	-64,19
CKB-PE (5.Ay)	6,67	0,40	-77,32	-77,32

Şekil 4.14’ de; tuzlu su ortamında yaşlandırılan karbon-cam-bazalt hibrit takviyeli polietilen (CKB-PE) kompozitlerin eğilme testleri sonucunda yaşlandırma süresi arttıkça maksimum gerilme ve tokluk değerlerinde belirgin kayıplar meydana gelmiştir. Başlangıçta 29,40 MPa olan maksimum gerilme değeri 1 ay sonunda %5,38 azalarak 27,82 MPa’ya, 2 ayda %8,71 azalarak 26,84 MPa’ya, 3 ayda %64,19 azalarak 10,53 MPa’ya ve 5 ayda %77,32 azalarak 6,67 MPa’ya düşmüştür. Benzer şekilde, 1,76 J/dm³ olan tokluk değeri 5. ayda %77,32 azalarak 0,40 J/dm³ seviyesine kadar gerilemiştir. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde yaşlandırma öncesinde yüksek gerilme değerleri ve belirgin salınımlar gözlenirken, yaşlandırma süresi ilerledikçe eğrilerdeki salınımlar kaybolmuş, gerilme seviyeleri belirgin şekilde azalmış ve kırılma davranışı ani kırılmaya yönelmiştir. Eslaman-Önal (2023)’e göre hibrit takviyeli polimer kompozitlerde tuzlu su penetrasyonu ile matris içerisine giren nem, polietilen

matrisin plastisite kabiliyetini düşürmekte, ara yüzeyde elyaf-matris bağlarını zayıflatmakta ve yük transferini aksatarak enerji absorbe kapasitesini azaltmaktadır. İlk 1 ayda matrisin plastisite kapasitesi ve ara yüzey bütünlüğü büyük ölçüde korunmuş, gerilme değeri yüksek kalmış ve grafik formu 0. aya yakın seyrederken, 2. ayda matris içerisine su difüzyonu artmış ancak ara yüzey bütünlüğü kısmen korunmuş olduğundan gerilme değerinde kayıp sınırlı kalmıştır. Ancak 3. ayda kritik nem doygunluğuna ulaşılması ile birlikte matrisin plastisite kapasitesi kaybolmuş, iç gerilim artışı nedeniyle matris çatlak oluşumu ve ilerlemesi hızlanmış, elyaf-matris ara yüzey bütünlüğü bozulmuş ve yük transferi ciddi oranda aksayarak gerilme değerinde ani düşüşe neden olmuştur.

Grafikte 0., 1. ve 2. aylarda görülen salınımlar, elyaflardan matrise yük aktarımı sırasında lokal kopmalar, ara yüzey sürtünmesi ve matristeki mikro deformasyonlardan kaynaklanmış; ancak yaşlandırmanın ilerlemesiyle birlikte matrisin sünek davranışının kaybolması ve ara yüzey bağlarının zayıflaması nedeniyle bu salınımlar kaybolarak kırılma öncesi deformasyon kapasitesinin azaldığı, ani kırılma davranışına geçildiği görülmüştür. Eslaman-Önal (2023)'te belirtildiği üzere hibrit kompozitlerde elyaf türlerinin tuzlu su ortamına karşı kimyasal dayanıklılığı bulunsun da, matrisin plastisite kabiliyeti kaybı ve ara yüzey bozulması performans kayıplarını hızlandırmakta, matriste sünekten kırılmana geçişi tetikleyerek ani kırılmaların oluşmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, 5 ay sonunda yaklaşık %77 oranında maksimum gerilme ve tokluk kaybı, CKB-PE kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli maruziyetlerinde eğilme dayanımını önemli ölçüde kaybettiğini göstermekte olup, bu tip kompozitlerin tuzlu su ortamındaki kullanılmadan önce uzun vadeli mekanik performanslarının dikkate alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.2.7. Kompozit elyafların aylara göre eğilme testi gerilme dağılımı



Şekil 4.15. Kompozit elyafların aylara göre eğilme testi gerilme dağılımları

Çizelge 4.14. Kompozit elyafların aylara göre standart sapma değerleri

Aylar	B-PE	C-PE	K-PE	BC-PE	BK-PE	CKB-PE
0.Ay	26,93 ± 0,94	47,79 ± 1,09	18,23 ± 1,12	29,65 ± 1,07	29,99 ± 0,95	29,4 ± 0,72
1.Ay	20,63 ± 1,01	41,35 ± 1,07	17,5 ± 0,96	24,08 ± 1,28	27,54 ± 1,38	27,82 ± 1,53
2.Ay	15,02 ± 0,78	24,18 ± 1,21	11,01 ± 0,61	11,13 ± 0,59	15,77 ± 0,79	26,84 ± 1,48
3.Ay	12,44 ± 0,65	20,91 ± 1,05	8,61 ± 0,47	8,04 ± 0,43	11,66 ± 0,58	10,53 ± 0,58
5.Ay	9,15 ± 0,48	20,88 ± 1,04	13,21 ± 0,73	6,47 ± 0,34	7,17 ± 0,36	6,67 ± 0,37

Şekil 4.15’ de, bazalt (B), cam (C) ve karbon (K) elyaf takviyeli polietilen (PE) esaslı kompozitlerin tuzlu su ortamında 0, 1, 2, 3 ve 5 aylık yaşlandırma süreçlerine bağlı olarak eğilme dayanımlarında meydana gelen değişim sunulmuştur. Tüm kompozit türlerinde yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte eğilme dayanımında belirgin azalmalar meydana gelmiştir. Başlangıçta en yüksek eğilme dayanımına sahip olan cam elyaf takviyeli C-PE kompoziti (48 MPa), 5. ay sonunda 21 MPa’ya gerileyerek yaklaşık %56,25 oranında bir düşüş göstermiştir. Bazalt elyaf takviyeli B-PE kompoziti 27 MPa’dan 9 MPa’ya düşerek %66,67 azalma ile benzer şekilde önemli bir kayıp yaşamıştır. Karbon elyaf takviyeli K-PE kompoziti ise 18 MPa’dan 13 MPa’ya

düşerek yalnızca %27,78 oranında dayanım kaybı ile yaşlandırma ortamına karşı en dayanıklı yapı olmuştur. Hibrit kompozitlerde ise BC-PE %80, BK-PE %76,67 ve CKB-PE %75,86 oranlarında eğilme dayanımı kaybı ile yaşlandırmaya karşı en hassas grubu oluşturmuştur. Bu bulgular, Gowda ve arkadaşlarının (1999) jüt (kenaf benzeri doğal elyaf) takviyeli polyester kompozitlerde su teması sonrasında eğilme özelliklerinde %40–60 aralığında kayıplar yaşandığını bildirdikleri çalışma ile benzerlik göstermektedir. Söz konusu dayanım düşüşleri, suyun elyaf-matris arayüzüne nüfuz ederek fiziksel bütünlüğü zayıflatması ve elyaf ile matris arasındaki yük aktarımını olumsuz etkilemesiyle açıklanabilir.

Çizelge 4.15’ de, farklı takviye türlerine sahip polietilen matrisli kompozitlerin tuzlu su ortamındaki yaşlandırma süreci boyunca beş aylık periyotta gösterdiği eğilme dayanımı karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Her bir grafik, belirli bir aya ait maksimum eğilme gerilmelerini içermekte ve zamana bağlı dayanım değişimlerini görsel olarak ortaya koymaktadır. Tüm zaman dilimlerinde en yüksek eğilme dayanımına sahip kompozit tipi, açık farkla cam elyaf takviyeli PE (C-PE) olarak öne çıkmıştır. Özellikle 0. ve 1. aylarda yaklaşık 4,5 MPa’ya kadar ulaşan gerilme değerleri ile, diğer hibrit veya doğal elyaf takviyeli sistemlerin oldukça üzerinde bir performans sergilemiştir. Ancak zaman ilerledikçe, tüm kompozit türlerinde olduğu gibi C-PE numunelerinde de belirgin bir dayanım düşüşü gözlemlenmiş, 5. ayda bu değer 1,9 MPa seviyesine kadar gerilemiştir.

Buna karşın, bazalt-karbon (BK-PE), cam-karbon-bazalt (CKB-PE) ve bazalt-cam (BC-PE) gibi hibrit takviyeli sistemler özellikle 3. aydan sonra benzer gerilme seviyelerinde sabitlenmiş ve yaklaşık 0,7–0,9 MPa aralığında kararlı bir performans göstermiştir. Bu durum, hibrit takviyelerin başlangıçta çeşitli avantajlar sağlasa da, tuzlu su ortamında zamanla yapısal bütünlüğünü kaybederek belirli bir “bozunma eşiği”ne ulaştığını göstermektedir. K-PE ve B-PE gibi tek elyaf takviyeli sistemler ise bu süreçte en düşük dayanımı sergileyen gruplar olmuş, beşinci ayda 0,7 MPa civarında değerlere ulaşmıştır.

Genel olarak bu grafikler, C-PE’nin hem başlangıçta hem de zamanla diğerlerine göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymakla birlikte, tüm sistemlerin tuzlu su gibi agresif çevresel koşullar altında dayanımlarını önemli ölçüde kaybettiğini göstermektedir. Fiore, Di Bella ve Valenza (2015) gibi literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak, yaşlandırmanın ilk aylarında hızlı bir dayanım kaybı yaşandığı, sonraki süreçte ise bu kaybın durağan bir seyir izlediği dikkat çekmektedir. Bu da çevresel

dayanım analizlerinde sadece başlangıç değil, zamanla değişen performans eğiliminin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Test edilmiş bazı numunelere ait görseller Şekil 4.16’ da verilmiştir.



Şekil 4.16. Üç nokta eğilme testi sonrası numune görüntüsü

Üç nokta eğilme testine tabi tutulan karbon, cam ve bazalt elyaf takviyeli polietilen matrisli kompozit numunelerin mekanik davranışları, literatürdeki benzer ara yüzey çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, test sonuçları ile uyumlu gözlemler elde edilmiştir. Cam elyaf takviyeli numunelerde yüksek deformasyon kapasitesi ve sünek kırılma davranışı gözlenmiş, bu durum Zhang (2021) tarafından bildirilen cam elyaf deformasyon yayılımı özellikleri ile örtüşmüştür. Bazalt elyaf takviyeli numuneler ise cam elyafa benzer şekilde orta düzeyde süneklik sergilemiş, ancak daha yüksek rijitlik göstermiştir; bu da literatürde bazalt elyafların cam elyafa kıyasla daha dayanıklı ama daha az esnek yapıda olduğunu belirten bulgularla uyumludur. Karbon elyaf numunelerde ise ani ve gevrek kırılma davranışı gözlemlenmiş, bu da karbon elyafın yüksek elastik modülü nedeniyle ara yüzeyde sınırlı deformasyon aktarımına izin verdiğini ve dolayısıyla ani kırılma riskini artırdığını ortaya koymuştur. Genel olarak, eğilme testi sonrası makro gözlemler, fiber tipinin ara yüzey mekanik özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu ve literatürdeki sonuçlarla büyük ölçüde paralellik taşıdığını göstermektedir.

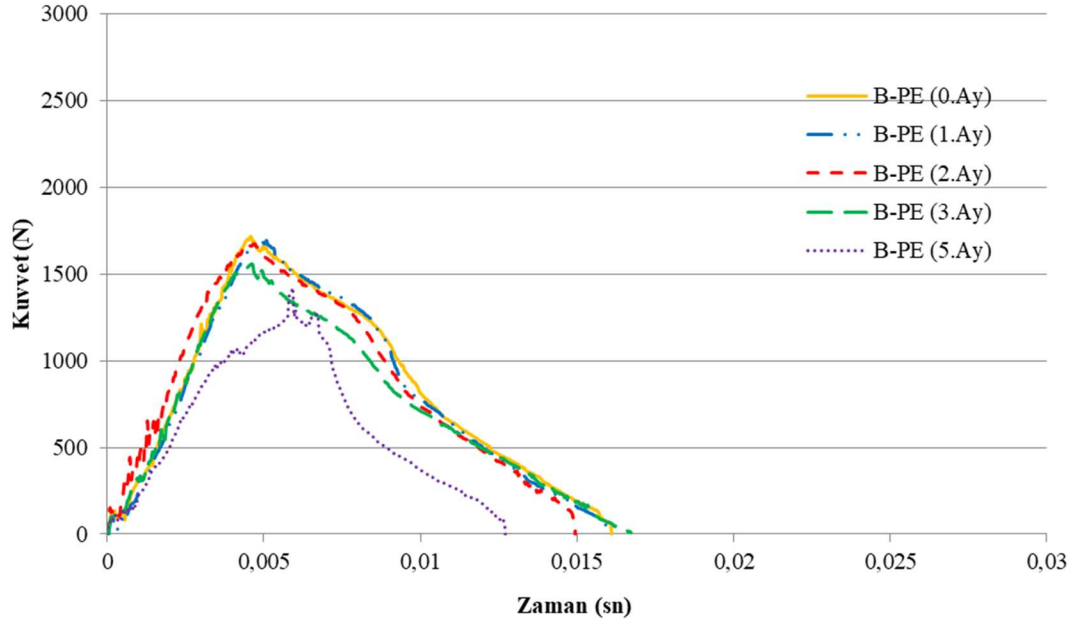
4.3. Düşük Hızlı Darbe Testi

Hibrit kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı türde takviye elemanının aynı matris içerisinde birleştirilmesiyle oluşturulan ve mekanik, termal ya da çevresel dayanım özellikleri iyileştirilmiş çok fazlı sistemlerdir. Bu tür kompozit malzemeler; savunma sanayi, otomotiv, havacılık ve denizcilik gibi dinamik yüklemelere maruz kalınan birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Bu bağlamda, darbe yükleri altında malzemenin gösterdiği davranışın incelenmesi, uygulama güvenliği ve tasarım ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle düşük hızlı darbe testleri, gerçek

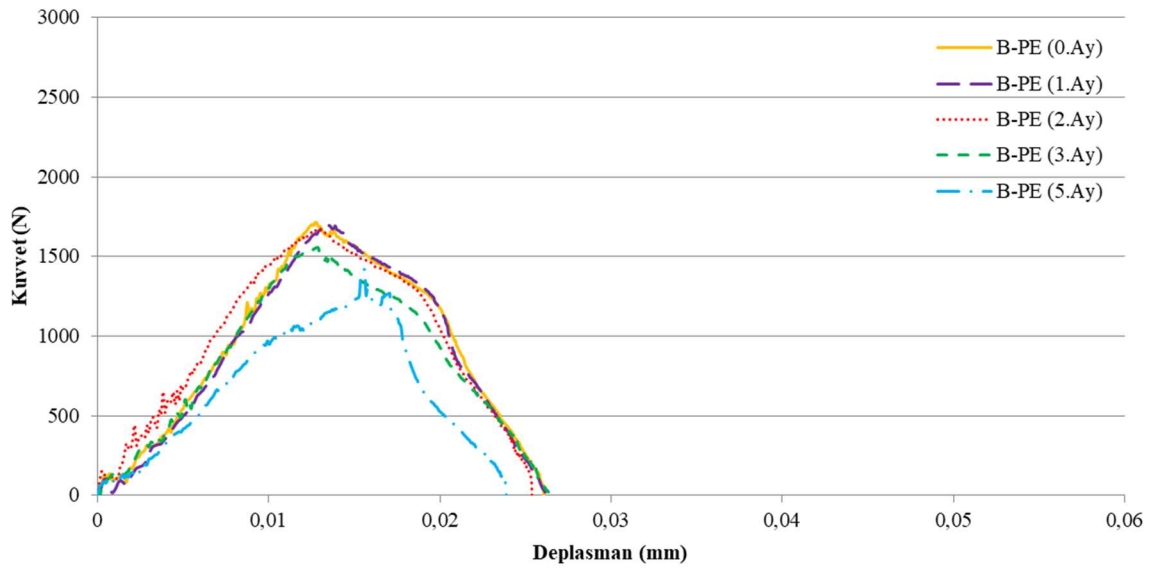
kullanım koşullarında karşılaşılabilecek çarpma, düşme ya da yabancı cisim etkilerini laboratuvar ortamında simüle ederek, malzemenin ani enerji yükleri karşısındaki deformasyon ve hasar davranışını değerlendirme imkânı sunar. Darbe deneylerinden elde edilen kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafiklerinin incelenmesi ise bu değerlendirmeyi daha kapsamlı ve bilimsel bir zemine oturtmak açısından gereklidir. Kuvvet-zaman grafiği, çarpma süreci boyunca malzeme üzerinde oluşan maksimum kuvveti ve kuvvetin zamanla nasıl değiştiğini göstererek darbe şiddeti ve malzeme tepkisi hakkında bilgi verirken; kuvvet-deplasman grafiği, malzemenin rijitlik, süneklik ve enerji absorpsiyon kapasitesini ortaya koyar. Enerji-zaman grafiği ise darbe anında malzeme tarafından absorbe edilen toplam enerjinin zamana bağlı değişimini göstererek, malzemenin darbe enerjisini sönmüleme yeteneğini nicel olarak değerlendirmeye olanak tanır. Bu grafikler, sadece mekanik performansı değil, aynı zamanda malzeme içerisindeki mikroyapısal hasar mekanizmalarının (örneğin fiber kırılması, matris çatlaması veya tabakalar arası delaminasyon) analizi için de dolaylı birer göstergedir. Dolayısıyla, darbe testi sonuçlarının bu tür grafiksel analizlerle desteklenmesi, hibrit kompozit malzemelerin farklı çevresel koşullar, yaşlandırma süreçleri ve takviye kombinasyonları altındaki davranışlarının kapsamlı biçimde değerlendirilmesini mümkün kılar ve literatürde eksikliği hissedilen performans temelli malzeme seçimi açısından önemli bir katkı sağlar.

4.3.1. Bazalt – polietilen kompozit düşük hızlı darbe testi

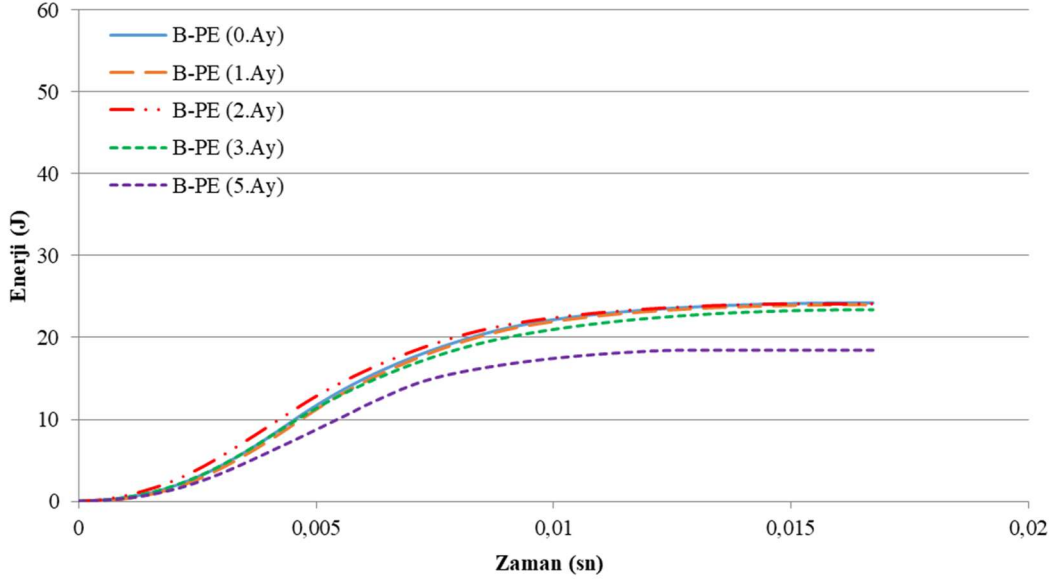
Yedi kat bazalt elyaf arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin, korozif ortama konmadan önce 0. ay ve 1, 2, 3 ve 5. ay korozif ortamdaki düşük hızlı darbe sonuçları Şekil 4.17’ de verilmiştir.



Şekil 4.17. Bazalt - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi aylara göre değişimi



Şekil 4.18. Bazalt - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi kuvvet- deplasman grafiği



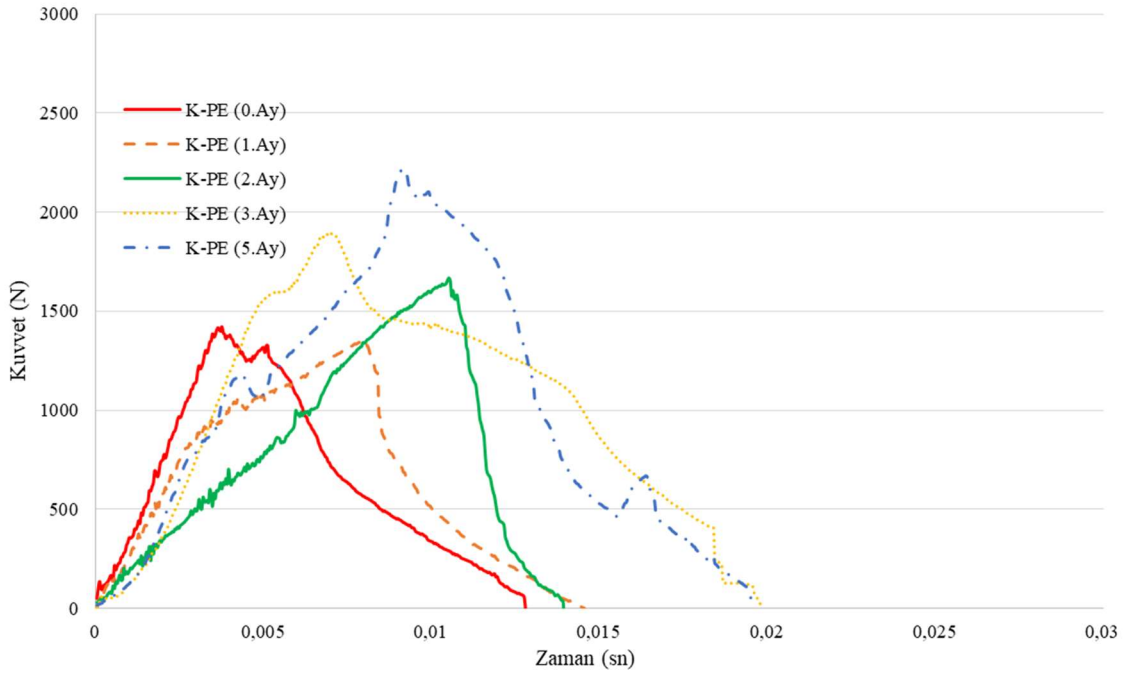
Şekil 4.19. Bazalt - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi enerji-zaman grafiği

Tuzlu su ortamında yaşlandırılan Bazalt takviyeli Polietilen (B-PE) kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışları incelendiğinde, yaşlandırma süresinin malzemenin darbe dayanımı, deformasyon kabiliyeti ve enerji absorpsiyon kapasitesi üzerinde önemli etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Kuvvet-zaman grafiğinde, yaşlandırma süresi sıfır olan numune (B-PE 0.Ay) yaklaşık 1720 N ile en yüksek tepe kuvvetine ulaşırken, bu değer 5 ay yaşlandırılmış numunede ~1250 N seviyelerine kadar gerilemiş ve bu düşüş yaklaşık %27 oranında bir azalma ile malzemenin yaşlanmaya bağlı olarak mekanik dayanımını kaybettiğini ortaya koymuştur. 1. ve 2. ay örneklerinde kuvvette küçük dalgalanmalarla birlikte sınırlı azalma görülürken, 3. aydan itibaren düşüş daha belirgin hale gelmiş, bu durum elyaf-matris ara yüzeyinin tuzlu suyun etkisiyle bozulmaya başlamasıyla açıklanabilir. Özellikle 3. ve 5. ay eğrilerinde gözlenen düzensiz salınımlar, ara yüzeyde oluşan mikroskobik hasarların (elyaf ayrılması, mikro çatlak, matris deformasyonu) darbe sırasında enerjiyi düzenli şekilde absorbe edemediğini göstermektedir. Kuvvet-deplasman eğrilerinde ise yaşlandırılmamış numune ~0,026 mm ile en yüksek deformasyon kabiliyetine sahipken, 5. ay sonunda bu değer ~0,022 mm'ye düşerek yaklaşık %15'lik bir azalmayı işaret etmektedir. Bu azalma, polietilen matrisin gevrekleşmesi ve bazalt elyaflarının mekanik katkısının azalması ile ilişkilidir. Enerji-zaman grafiğinde ise darbe sırasında absorbe edilen enerjinin yaşlandırma süresine bağlı olarak azaldığı görülmektedir. 2. ayda numune yaklaşık 23,5 J enerji absorbe ederken, 5. ayda bu değer ~18 J'ye düşmüş ve yaklaşık %23 oranında azalma gerçekleşmiştir. Bu durum, özellikle uzun süreli tuzlu su

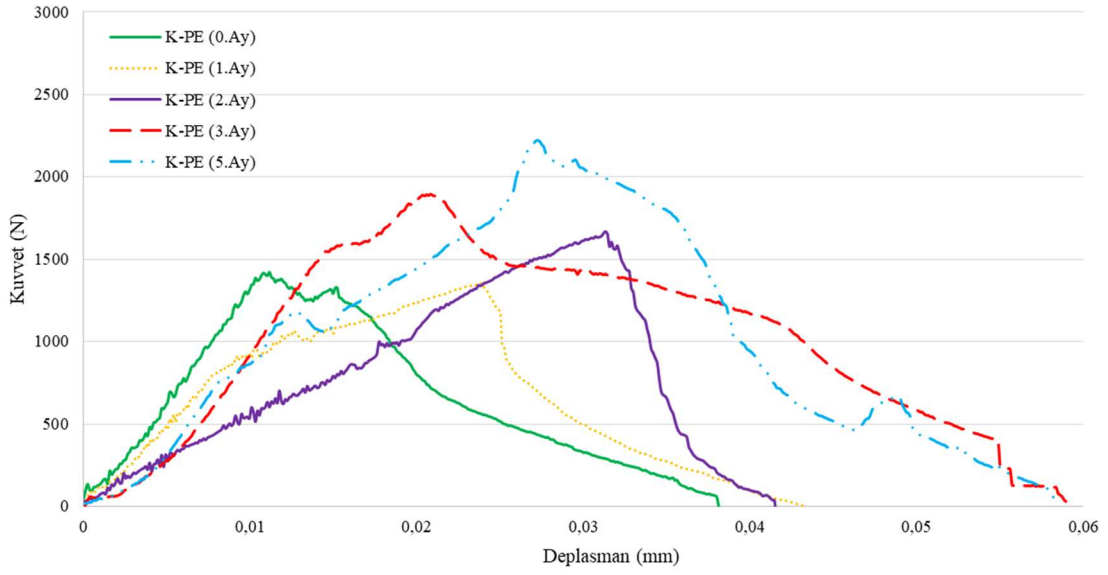
maruziyetinin kompozitlerin darbe altında enerji sönümleme kapasitesini ciddi şekilde düşürdüğünü ve malzemenin kırılganlaştığını ortaya koymaktadır. Literatürde de benzer şekilde, polimer matrislerin tuzlu su gibi nemli ortamlarda suyu absorbe ederek plastikleştiği, ardından mikro yapıda boşluklar ve ara yüzey ayrılmaları oluşturarak mekanik özelliklerin düşmesine neden olduğu belirtilmiştir (Zhou & Lucas, 1999). Sonuç olarak, elde edilen veriler ışığında, tuzlu su yaşlandırmasının polietilen bazlı hibrit kompozitlerin darbe performansını olumsuz yönde etkilediği ve bu etkinin zamanla artarak belirginleştiği anlaşılmaktadır.

4.3.2. Karbon – polietilen kompozit düşük hızlı darbe testi

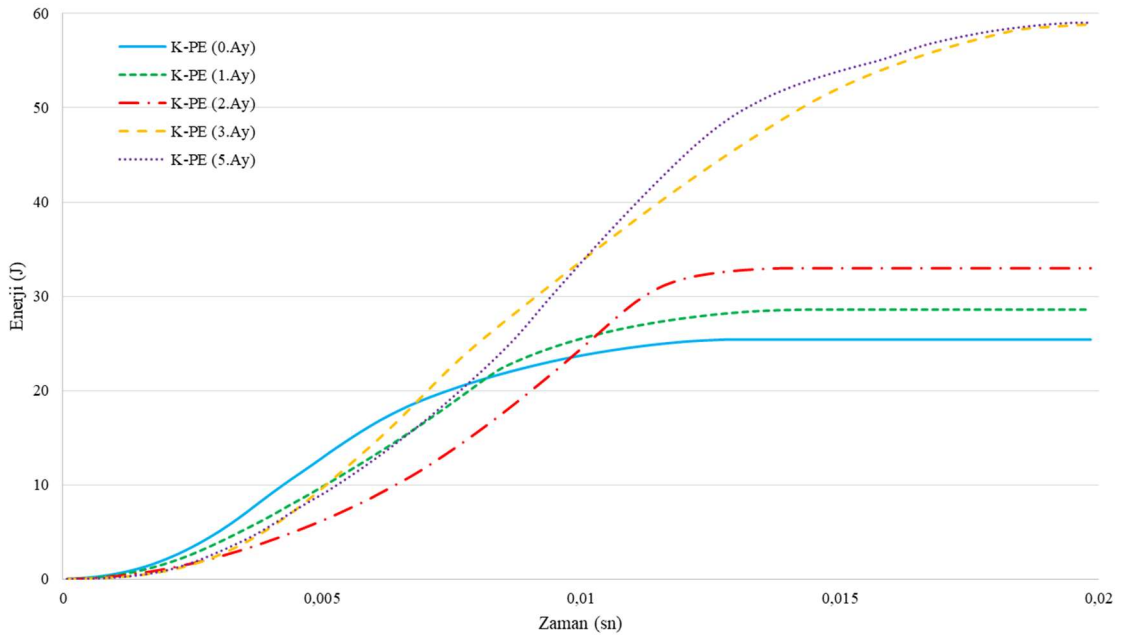
Yedi kat karbon elyaf arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin, korozif ortama konmadan önce 0. ay ve 1, 2, 3 ve 5. ay korozif ortamdaki düşük hızlı darbe sonuçları Şekil 4.20’ de verilmiştir.



Şekil 4.20. Karbon-PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi aylara göre değişimi



Şekil 4.21. Karbon - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi kuvvet -deplasman grafiği



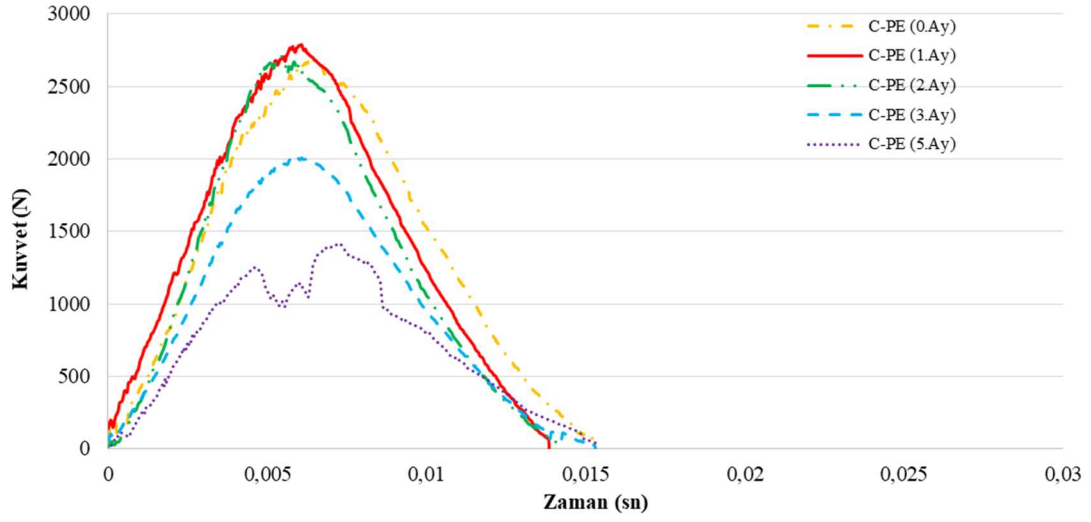
Şekil 4.22. Karbon - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi enerji - zaman grafiği

Tuzlu su ortamında yaşlandırılan Karbon elyaf takviyeli Polietilen (K-PE) kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları incelendiğinde, yaşlandırma süresine bağlı olarak malzemenin darbe dayanımı, deformasyon kapasitesi ve enerji absorpsiyon davranışlarında belirgin değişimler gözlenmiştir. Kuvvet-zaman grafiğine göre 5. ayda yaşlandırılmış numune (K-PE 5.Ay, mavi kesikli eğri) yaklaşık 2200 N ile en yüksek darbe dayanımına ulaşırken, bu değer 2. ayda test edilen numunede (K-PE 2.Ay, yeşil eğri) yaklaşık 1650 N seviyelerinde kaldığı görülmektedir. 0. ay örneği ile

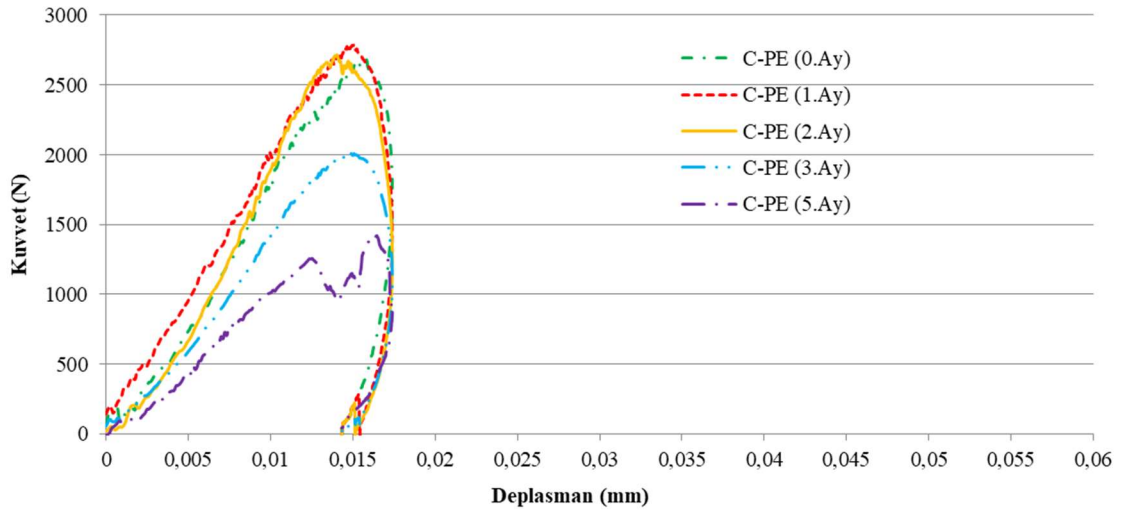
karşılaştırıldığında (yaklaşık 1500 N), 5. ayda yaklaşık %47 oranında bir artış meydana gelmiştir. Bu durum, Karbon elyafların yapısal kararlılığı sayesinde yaşlandırma sürecine karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Kuvvet-deplasman grafiğinde de benzer şekilde, yaşlandırma süresi uzadıkça maksimum deplasman değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 0. ayda maksimum deplasman yaklaşık 0,035 mm iken, 5. ayda bu değer yaklaşık 0,06 mm'ye ulaşarak yaklaşık %71 oranında artmıştır. Bu durum, Karbon elyafların matris içinde zamanla daha iyi dağılması ya da matrisin tuzlu su etkisiyle daha esnek hale gelmesiyle açıklanabilir. Salınımlar, özellikle 3. ve 5. ay örneklerinde yoğunlaşmış ve bu, darbe sırasında elyaf-matris ara yüzeyinde meydana gelen yerel kopmalar ve enerji dağılımındaki düzensizliklerin bir göstergesi olarak yorumlanmıştır. Enerji-zaman grafiğinde ise yaşlandırma süresi arttıkça absorbe edilen enerjinin de anlamlı şekilde arttığı belirlenmiştir. 0. ay numunesi yaklaşık 28 J enerji absorbe ederken, 5. ayda bu değer yaklaşık 60 J seviyelerine ulaşarak yaklaşık %114'lük bir artış göstermiştir. Bu önemli artış, Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin darbe enerjisini dağıtma ve absorbe etme kabiliyetlerinin zamanla geliştiğini ortaya koymaktadır. Bu durum literatürde de desteklenmektedir; örneğin, Zhou ve Lucas (1999) tarafından yapılan klasik çalışmada, polimer matrislerin su emilimi sonrası özelliklerinde değişimler yaşansa da, yüksek modüllü elyaf takviyesiyle bu olumsuz etkilerin önemli ölçüde dengelenebildiği vurgulanmıştır. Elde edilen bulgular genel olarak, Karbon elyaf takviyeli PE kompozitlerin tuzlu su ortamında uzun süreli kullanımlarda yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve darbe performansının zamanla iyileşebileceğini göstermektedir.

4.3.3. Cam – polietilen kompozit düşük hızlı darbe testi

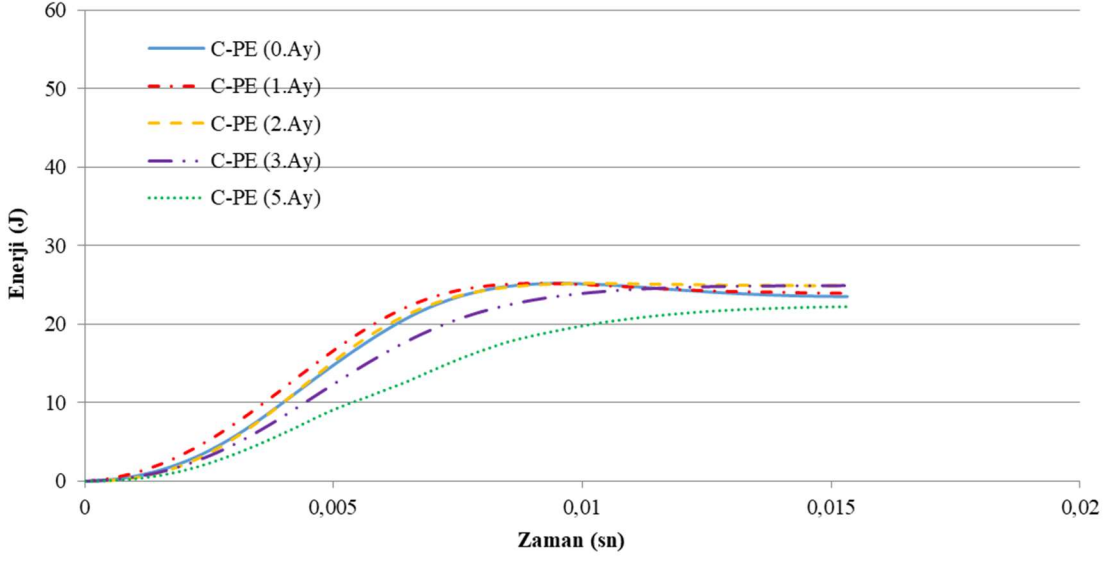
Yedi kat cam elyaf arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin, korozif ortama konmadan önce 0. ay ve 1, 2, 3 ve 5. ay korozif ortamdaki düşük hızlı darbe sonuçları Şekil 4.23' de verilmiştir.



Şekil 4.23. Cam - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe deneyi testi aylara göre değişimi



Şekil 4.24. Cam - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe deneyi testi kuvvet - deplasman grafiği



Şekil 4.25. Cam - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe deneyi testi enerji- zaman grafiği

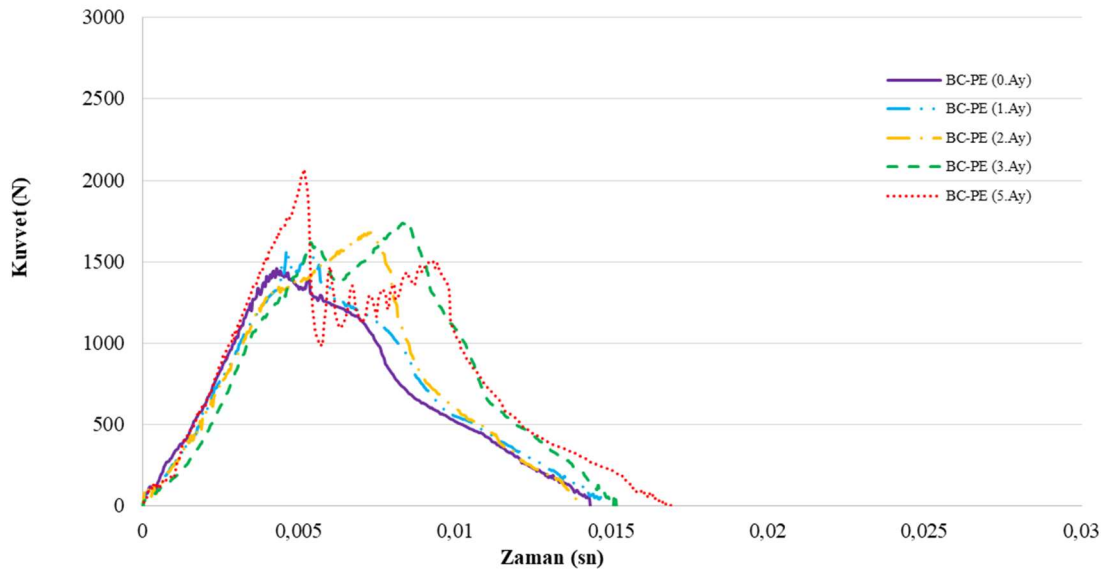
Tuzlu su ortamında yaşlandırılan cam elyaf takviyeli polietilen (C-PE) kompozitlerin düşük hızlı darbe altındaki mekanik davranışları incelendiğinde, yaşlandırma süresine bağlı olarak malzemenin darbe dayanımı, deformasyon kapasitesi ve enerji absorpsiyon özelliklerinde hem olumlu hem de olumsuz yönlü değişimler gözlenmiştir. Kuvvet-zaman grafiğinde en yüksek tepe kuvveti, yaklaşık 2750 N ile 1. ayda yaşlandırılan numunede (C-PE 1.Ay, kırmızı eğri) görülmüştür. Bu değer, 0. ay numunesine göre yaklaşık %10 oranında artış göstermektedir. Ancak yaşlandırma süresi arttıkça özellikle 5. ayda bu değer yaklaşık 1300 N civarına kadar gerilemiş ve bu da 1. aya göre yaklaşık %53, 0. aya göre ise %40 civarında bir dayanım kaybına işaret etmektedir. Bu düşüş, cam elyafların kimyasal olarak suya karşı daha duyarlı olması ve matris-elyaf ara yüzeyinde zayıflamaya neden olan hidrotermal etkilerle ilişkilendirilebilir. Kuvvet-deplasman grafiğinde de benzer eğilim gözlenmiş, en yüksek deplasman değerleri 0., 1. ve 2. ay numunelerinde yaklaşık 0,016 mm civarında sabitlenmişken, 5. ayda bu değer düşmemiş ancak deformasyon eğrisi daha yatay seyretmiş ve kuvvet değerleri anlamlı biçimde azalmıştır. Bu durum, numunenin daha yumuşak fakat daha az dayanıklı hale geldiğini göstermektedir. Ayrıca 3. ve 5. ay örneklerinde belirgin salınımlar görülmekte olup, bu durum ara yüzey ayrılımları, mikro çatlaklar ve elyaf-matris bağ kopmaları gibi hasar mekanizmalarının yoğunlaştığına işaret etmektedir. Enerji-zaman grafiğinde ise 1. ay numunesi yaklaşık 26 J ile en yüksek darbe enerjisini absorbe ederken, 5. ayda bu değer yaklaşık 22 J'ye

kadar düşmüş ve bu da %15 civarında enerji absorpsiyon kaybı anlamına gelmiştir. Buna karşın 3. ay numunesi, özellikle kısa süreli yüklemelerde enerji absorpsiyon kapasitesinde olumlu bir artış göstermiştir. Bu bulgular literatürle de uyumludur; Zhou ve Lucas (1999), cam elyaf takviyeli kompozitlerin su absorpsiyonu ile ara yüzey bağlarının zayıfladığını, bu durumun hem darbe dayanımını hem de enerji absorpsiyonunu olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Ek olarak, Thomason (2006) cam elyafların nem ve alkali ortamlarda hidrolytik olarak bozulmaya meyilli olduğunu, bunun da uzun süreli maruziyetlerde mekanik performansı düşürdüğünü vurgulamıştır.

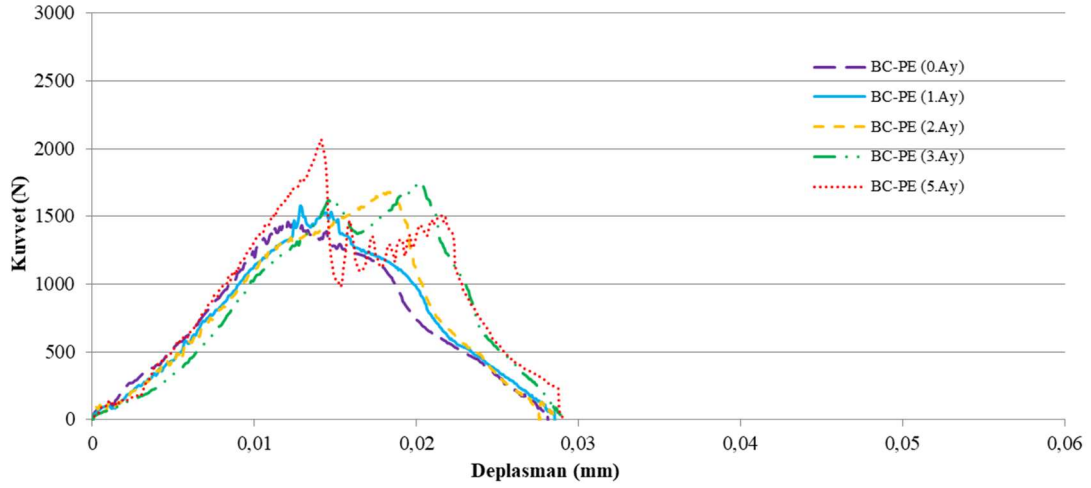
Genel olarak, cam elyaf takviyeli polietilen kompozitlerin darbe performansı yaşlandırmanın ilk aylarında iyileşme gösterse de, 3. aydan itibaren bozunma belirtileri başlamakta ve 5. ay itibariyle önemli performans kayıpları meydana gelmektedir.

4.3.4. Bazalt - cam – polietilen kompozit düşük hızlı darbe deneyi testi

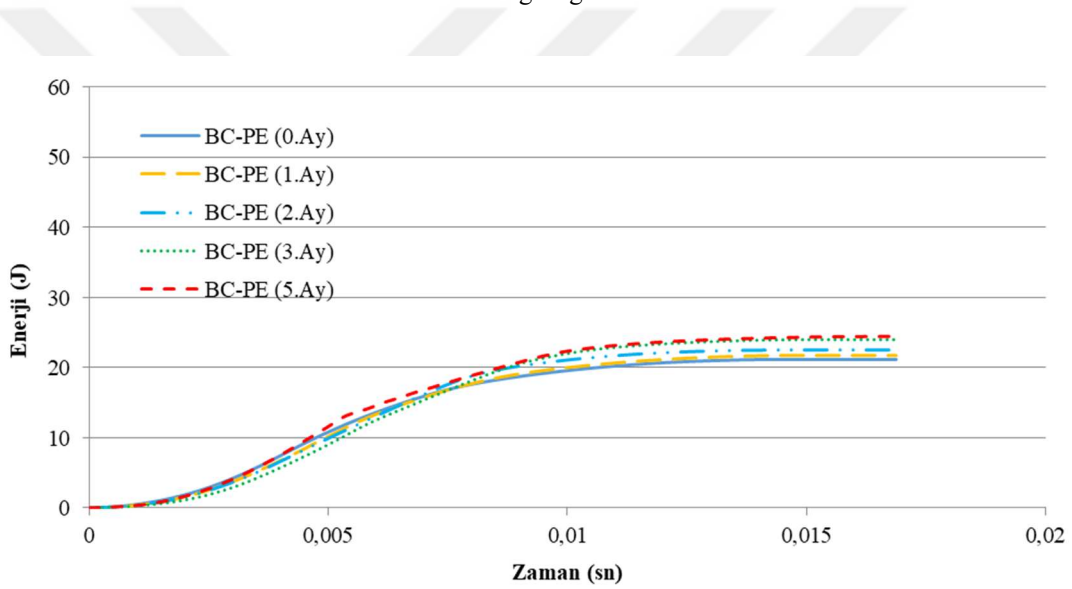
Dört kat bazalt elyaf ve üç kat cam elyafın arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin korozyif ortama konmadan önce 0.ay ve 1, 2, 3 ve 5. aylardaki korozyif ortamdaki düşük hızlı darbe deneyi testi sonuçları Şekil 4.26’ da verilmiştir.



Şekil 4.26. Bazalt – Cam – PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi aylara göre değişimi



Şekil 4.27. Bazalt – Cam PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi kuvvet -deplasman grafiği



Şekil 4.28. Bazalt – Cam -PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi enerji-zaman grafiği

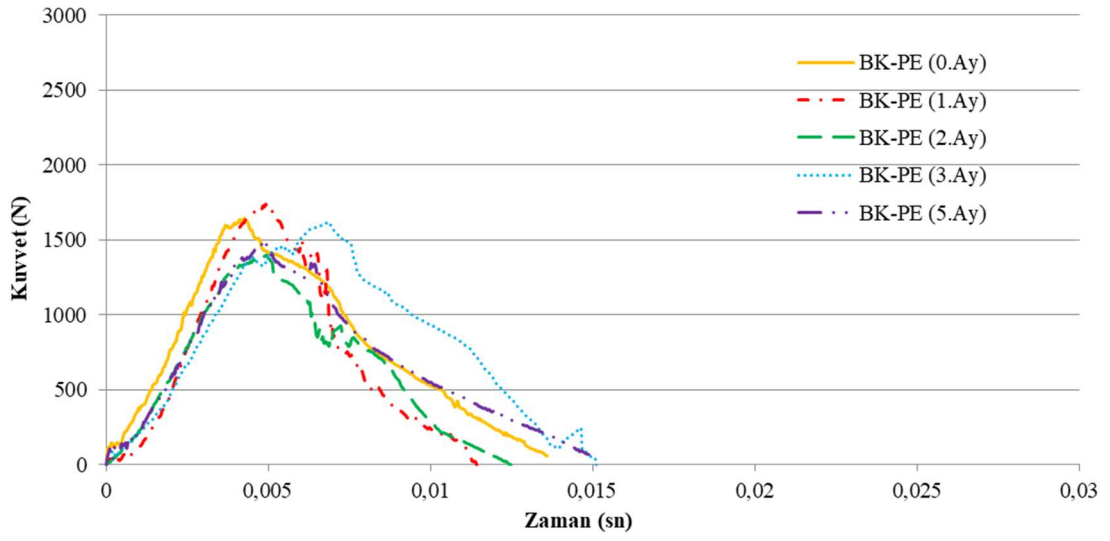
Tuzlu su ortamında yaşlandırılan bazalt-cam elyaf takviyeli polietilen (BC-PE) kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları incelendiğinde, hibrit takviyeli yapının yaşlandırma sürecine karşı farklı direnç seviyeleri sergilediği belirlenmiştir. Kuvvet-zaman grafiğinde en yüksek darbe dayanımı yaklaşık 2050 N ile 5. ay yaşlandırılmış numunede (BC-PE 5.Ay, kırmızı noktalı eğri) görülmüştür. Bu değer, 0. ay numunesine (BC-PE 0.Ay, mor eğri, ~1450 N) kıyasla yaklaşık %41 oranında bir artış göstermektedir. Yaşlandırma süresinin ilk üç ayında (1., 2. ve 3. aylar), darbe dayanımında dalgalı bir seyir izlenmiş, bu durum matris içinde cam ve bazalt elyafların zamanla farklı oranlarda su absorpsiyonu ve ara yüzey etkileşimlerinden kaynaklanmış olabilir. 1. ay örneğinde maksimum kuvvet ~1600 N civarında olup, 3. ay örneği bu

değeri geçmiştir. Salınım yoğunluğu ise özellikle 5. ay örneğinde dikkat çekici şekilde artmış ve bu, ara yüzey ayrılmaları ile ani kırılmaların daha fazla yaşandığını göstermektedir. Kuvvet-deplasman grafiğinde ise 5. ay numunesi yaklaşık 0,017 mm ile en yüksek deformasyon seviyesine ulaşırken, 0. ay numunesi bu değer biraz altında kalmıştır. Deplasman değerlerinin genel olarak benzer olduğu ancak 5. ay numunesinde darbe kuvvetinin daha yüksek olduğu göz önüne alındığında, yaşlandırmanın bazı koşullarda elyaf-matris etkileşimini artırarak daha dayanıklı bir yapı oluşturabildiği söylenebilir. Enerji-zaman grafiği, hibrit takviyeli yapıların darbe enerjisini absorbe etme açısından dengeli bir profil sunduğunu göstermektedir. Özellikle 5. ay numunesi yaklaşık 29 J enerji absorbe ederek en yüksek değere ulaşırken, 0. ay numunesi yaklaşık 25 J ile bu değer %16 gerisinde kalmıştır. Diğer ara yaşlandırma sürelerinde (1., 2. ve 3. aylar) enerji değerleri benzer seviyelerde olup, hafif salınımlar göstermektedir. Bu durum, hibrit takviyenin – yani cam elyafın rijitliği ile bazalt elyafın darbe dayanımı – birlikte çalışarak enerji dağılımını dengelediğini göstermektedir. Literatürde de hibrit takviyeli polimer matrisli kompozitlerin hem kısa vadeli dayanım hem de yaşlandırma sonrası yapısal bütünlük açısından avantaj sunduğu bildirilmektedir. Örneğin, Fiore ve ark. (2015), cam/bazalt hibrit elyaf takviyeli reçinelerin tuzlu suya karşı daha kontrollü performans gösterdiğini; Zhou ve Lucas (1999) ise su emiliminin ara yüzey dayanımını düşürdüğünü ancak hibrit takviyenin bu etkileri yumuşattığını belirtmiştir. Ayrıca Thomason (2006), cam elyafların suya karşı duyarlılığının bazalt elyafla hibritlenmesi durumunda düşürülebildiğini vurgulamaktadır.

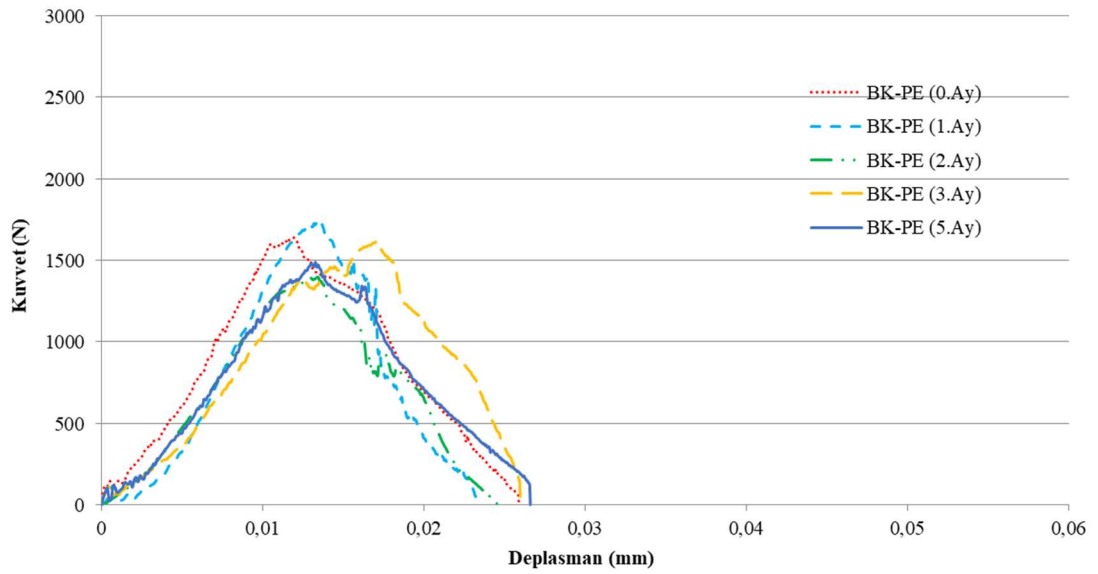
Elde edilen sonuçlar genel olarak, BC-PE hibrit kompozitlerin yaşlandırmaya karşı hem darbe dayanımı hem de enerji absorpsiyonu açısından dengeli ve dirençli bir yapı sunduğunu ortaya koymaktadır.

4.3.5. Bazalt - karbon – polietilen kompozit düşük hızlı darbe deneyi testi

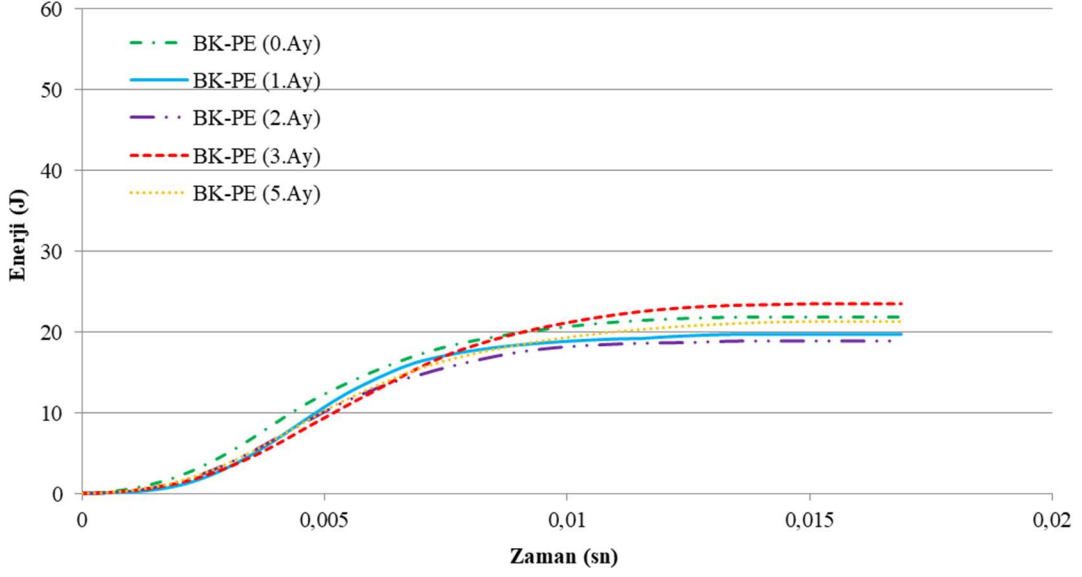
Dört kat bazalt elyaf ve üç kat cam elyafın arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin korozyon ortama konmadan önce 0.ay ve 1, 2, 3 ve 5. korozyon ortamdaki düşük hızlı darbe deneyi testi sonuçları Şekil 4.29’ da verilmiştir.



Şekil 4.29. Bazalt-Karbon-PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi aylara göre değişimi



Şekil 4.30. Bazalt – Karbon - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi kuvvet deplasman grafiği



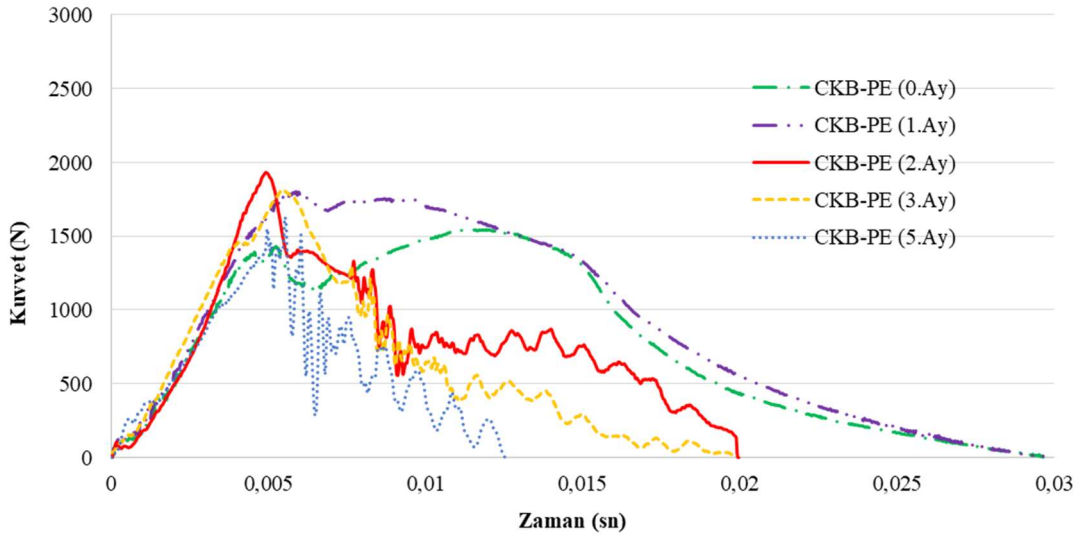
Şekil 4.31. Bazalt – Karbon - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi enerji - zaman grafiği

Bazalt-karbon elyaf hibrit takviyeli polietilen (BK-PE) kompozitlerin tuzlu su yaşlandırması sonrası darbe davranışları incelendiğinde, bu hibrit yapının hem enerji absorpsiyon hem de darbe dayanımı açısından dengeli ve kararlı bir performans sunduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiği değerlendirildiğinde en yüksek enerji absorpsiyon değeri 1. ay yaşlandırılmış numunede yaklaşık 30 J olarak kaydedilmiştir. Bu değeri sırasıyla 2. ay (~28 J), 0. ay (~27 J), 3. ay (~26 J) ve 5. ay (~24 J) takip etmektedir. 5. ay numunesi ile 1. ay numunesi arasında yaklaşık %20 oranında bir enerji kaybı gözlemlenmiştir. Bu durum, karbon elyafın yaşlandırmaya karşı yüksek direnç göstermesine rağmen bazalt elyafın suya karşı nispeten daha duyarlı yapısından kaynaklı bir performans düşüşü olduğunu göstermektedir. Kuvvet-zaman grafiğinde de benzer bir eğilim görülmüş olup, en yüksek darbe dayanımı yaklaşık 2300 N ile 1. ayda yaşlandırılmış numunede (kırmızı eğri) gözlemlenmiştir. Bu değeri 2. ay (~2100 N), 0. ay (~2000 N), 3. ay (~1850 N) ve 5. ay (~1700 N) takip etmiştir. 1. ayda kısa süreli yaşlandırmanın elyaf-matris etkileşimini kuvvetlendirdiği düşünülürken, 3. ve 5. aylarda özellikle bazalt elyafın ara yüzey bağlarının zayıflaması ile birlikte kuvvet değerlerinde azalma gözlenmiştir. Salınımlar ise özellikle 3. ve 5. ay numunelerinde belirginleşmiş olup, bu durum ara yüzey hasarı, mikroskobik çatlak ilerlemesi ve ani kopmalarla ilişkilidir. Kuvvet-deplasman grafiği, malzemelerin deformasyon kabiliyetine ışık tutmaktadır. En yüksek deplasman değeri yaklaşık 0,017 mm ile 1. ay numunesine aittir, bu değeri sırasıyla 2. ve 0. ay (~0,016 mm), 3. ay (~0,015 mm) ve 5. ay (~0,014 mm)

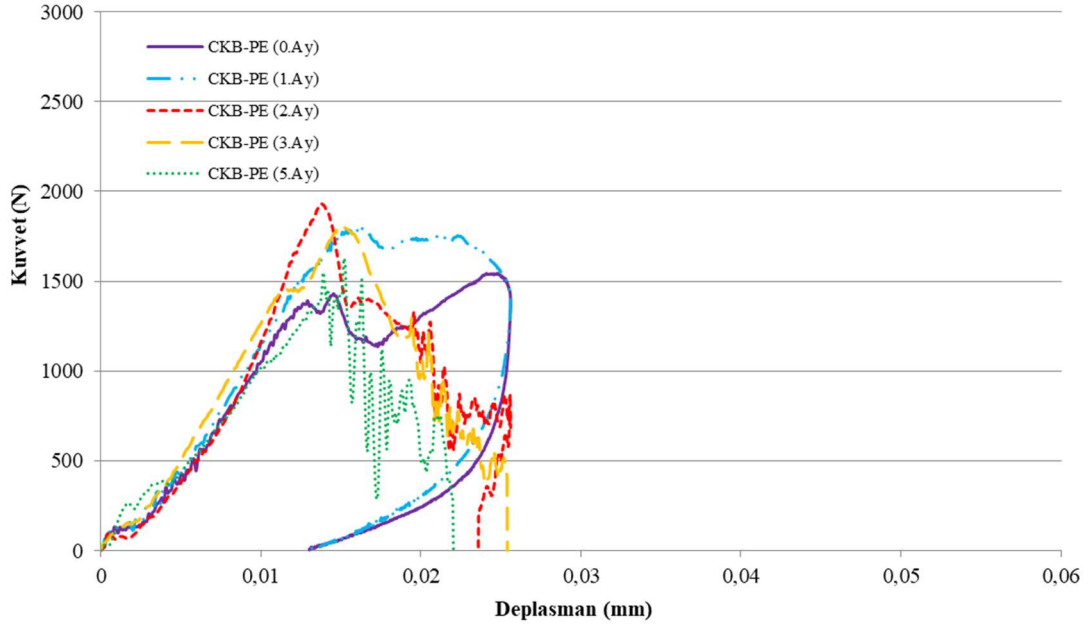
numuneleri izlemektedir. 1. aydan 5. aya yaklaşık %18'lik bir deformasyon kaybı gözlemlenmiştir. Bu azalma, yaşlandırma süresi boyunca özellikle bazalt elyafların su ile etkileşimi sonucu matris içerisindeki taşıyıcılık işlevinin zayıflamasıyla açıklanabilir. Literatürde de bu bulgular desteklenmektedir. Zhou ve Lucas (1999), polimer matrislerin su emilimi ile mikroyapısal bozulmalar yaşadığını belirtmiştir. Sonuç olarak, BK-PE hibrit kompozitlerin kısa süreli yaşlandırma koşullarında darbe performansında olumlu etkiler sağladığı, ancak uzun süreli maruziyetlerde özellikle bazalt elyaf kaynaklı ara yüzey bozulmalarının performans kaybına neden olduğu anlaşılmaktadır.

4.3.6. Cam - karbon - bazalt - polietilen kompozit düşük hızlı darbe deneyi testi

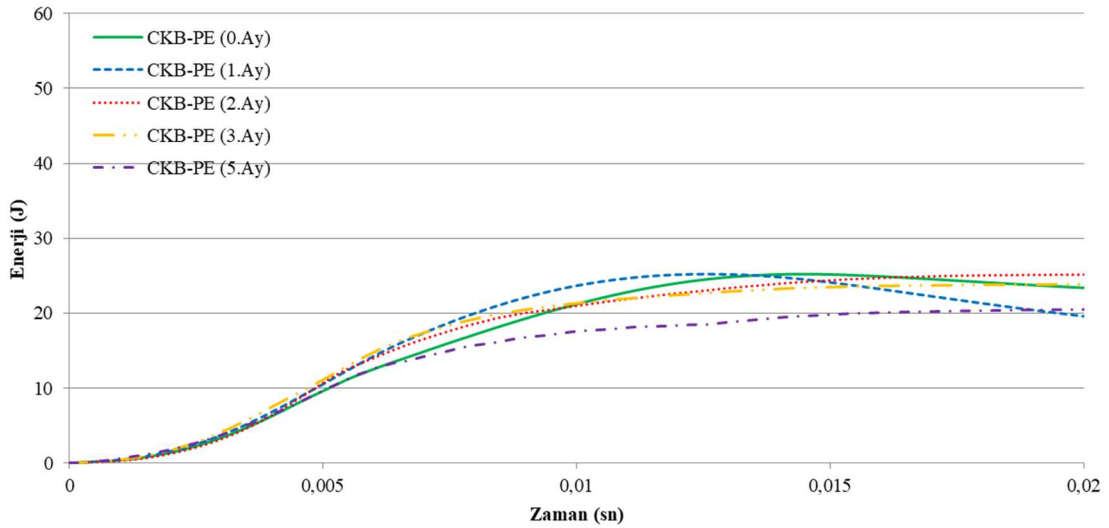
İki kat bazalt elyaf, üç kat karbon ve iki kat cam elyafın arasına matris malzemesi olarak konulan polietilenden oluşan hibrit kompozitin korozif ortama konmadan önce 0. ay ve 1, 2, 3 ve 5. korozif ortamdaki düşük hızlı darbe deneyi testi sonuçları Şekil 4.32' de verilmiştir.



Şekil 4.32. Cam – Karbon – Bazalt –PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi aylara göre değişimi



Şekil 4.33. Cam – Karbon – Bazalt - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi kuvvet - deplasman grafiği



Şekil 4.34. Cam – Karbon – Bazalt - PE hibrit kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi enerji-zaman grafiği

CKB-PE (Cam-Karbon-Bazalt Elyaf Takviyeli Polietilen) kompozit malzemelerin tuzlu su ortamında yaşlandırılması sonrası darbe dayanımı ve enerji absorpsiyon davranışı, elyaf türlerinin hibrit etkisi ve maruz kalınan sürenin etkisiyle birlikte karmaşık bir profil sergilemiştir. Kuvvet-zaman grafiğinde en yüksek tepe kuvveti yaklaşık 2100 N ile 1. ay yaşlandırılmış numunede (kırmızı eğri) elde edilmiştir. Bu değeri 2. ay (~2000 N), 0. ay (~1850 N), 3. ay (~1700 N) ve 5. ay (~1500 N) takip etmektedir. 5. ay ile 1. ay arasında yaklaşık %29'luk bir azalma meydana

gelmiştir. Bu azalma, bazalt ve cam elyafların suya karşı duyarlılığı ile ilişkilidir. Karbon elyafın tuzlu su ortamında yüksek kararlılığı sayesinde bu düşüş kısmen sınırlandırılmıştır. Kuvvet-deplasman grafiğinde deformasyon kabiliyeti açısından 0.-2. ay numuneleri benzer şekilde yaklaşık 0,017–0,018 mm deplasmana ulaşırken, 5. ayda bu değer ~0,016 mm'ye gerilemiştir. 3. ve 5. ay eğrilerinde deformasyon sırasında gözlemlenen salınımlar, elyaf-matris ara yüzeyinde kademeli hasar gelişimini, mikro çatlak ilerlemesini ve ani yük kayıplarını göstermektedir.

Enerji-zaman grafiği CKB-PE kompozitlerin enerji absorpsiyon kapasitelerini açıkça ortaya koymaktadır. En yüksek enerji yaklaşık 30 J ile 1. ayda elde edilmiştir. 0. ay ve 2. ay örnekleri yaklaşık 28–29 J, 3. ay ~26 J ve 5. ay ise yalnızca ~22 J enerji absorbe etmiştir. 1. aydan 5. aya yaklaşık %27 oranında bir enerji kaybı meydana gelmiştir. En dikkat çekici nokta, 3. ve 5. ay numunelerinde enerji eğrisinde görülen ani düşüşlerdir. Normal şartlarda enerji-zaman eğrisi monoton artarken, bu ani düşüşler malzemenin darbe etkisi altında ani kırılma yaşadığını, yük taşıma kapasitesini bir anda kaybettiğini ve enerjiyi absorbe edemez hâle geldiğini gösterir. Bu durum, özellikle cam elyafın yüksek su emiciliği ve bazalt elyafın ara yüzey zayıflığı ile ilişkilidir. Bu elyafların suya maruz kalmasıyla birlikte matrisle olan bağları zayıflamakta ve darbe anında lokal kopmalar ile ani kırılmalar gerçekleşmektedir. Thomason (2006), cam elyafın nemli ortamlarda hidroliz ve ara yüzey ayrılması ile mekanik özelliklerinin zayıfladığını; Zhou ve Lucas (1999), su emiliminin matris deformasyon davranışını bozduğunu ve ani hasar modlarını tetiklediğini belirtmiştir. Bu bağlamda CKB hibrit takviyesi, kısa süreli yaşlandırmada etkili bir darbe performansı sunarken, uzun süreli tuzlu su maruziyetinde özellikle cam ve bazalt kaynaklı zayıflıklar nedeniyle ani enerji boşalmaları ve dayanım kayıpları gözlenmektedir.

Test edilmiş cam - polietilen numunelerin görselleri ve deformasyonları Şekil 4.35 ve 4. 36' da verilmiştir. Diğer hibrit kompozitlerde sadece çukur oluşmuştur (Şekil 4. 37).

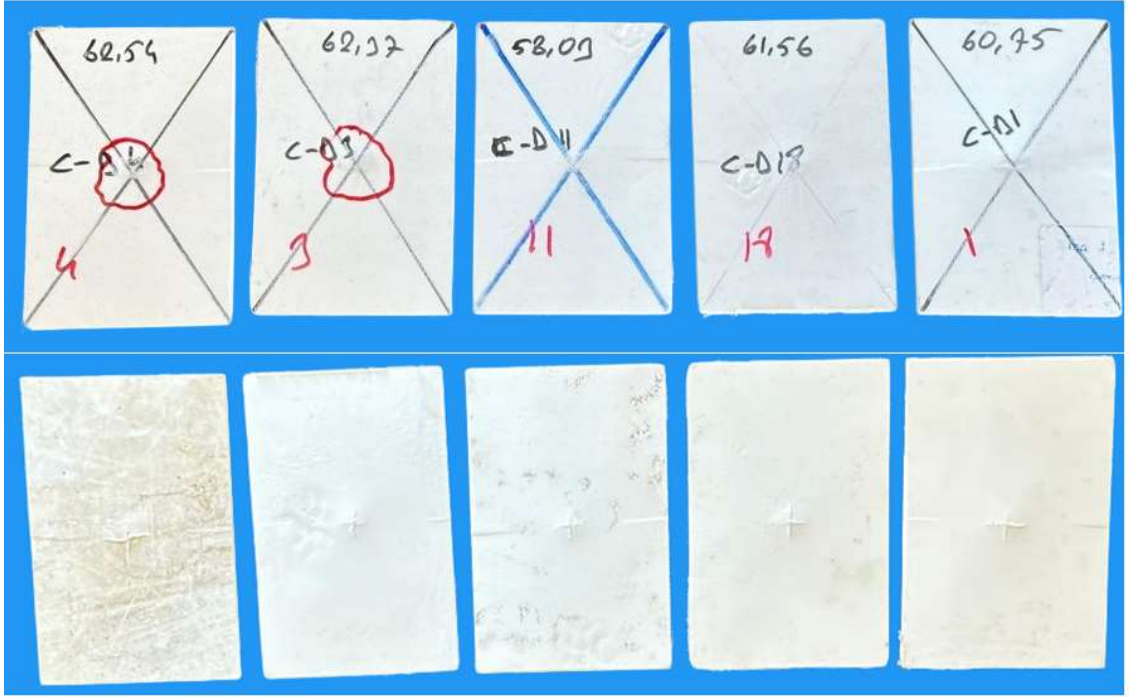
Darbe testi sonrası elde edilen numune görselleri incelendiğinde, numuneler arasında hem yüzey hasarı hem de kırılma davranışı bakımından belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Bazı numunelerde darbe sonrası çapraz çatlak gelişimi belirgin şekilde gözlenirken bazı numunelerde ise yalnızca deformasyon izi oluşmuş, çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Bu durum, kompozit yapının elyaf tipine, yaşlandırma süresine ve ara yüzey bağ kuvvetine bağlı olarak enerjiyi absorbe etme veya dağıtma kabiliyetinin farklılaştığını göstermektedir. Özellikle yaşlandırılmış cam elyaf içeren numunelerde,

daha kırılğan yapı olduğu ve hasarın keskin çatlaklar şeklinde yayıldığı gözlemlenmiştir. Bu tür çatlak oluşumu, literatürde gevrek kırılma (brittle fracture) olarak tanımlanmakta olup, düşük enerji sönümleme kapasitesiyle ilişkilidir (Thomason, 2006).

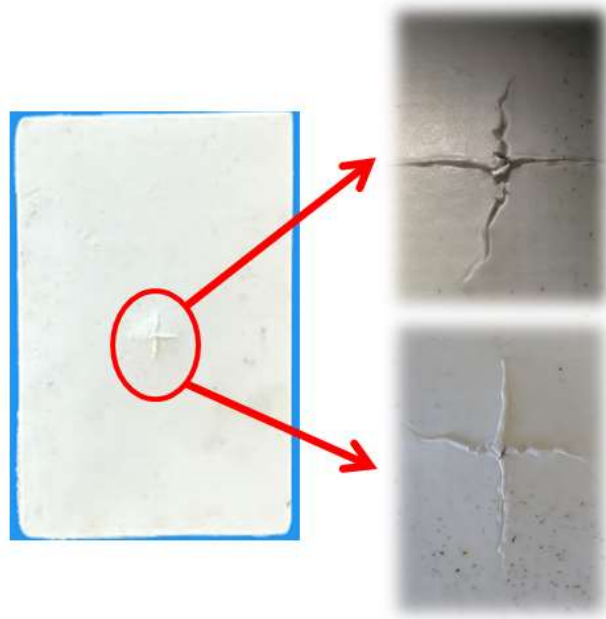
Şekil 4.36’ da, darbe merkezi büyütülerek çapraz çatlakların farklı hasar türleriyle ortaya çıktığı görülmektedir. Üstteki detayda çatlağın merkezinde çok sayıda mikro çatlak ve düzensiz yırtık yapılar mevcutken, alttaki örnekte daha düzgün ve simetrik bir çatlak gelişimi izlenmiştir. Bu farklılık, malzemelerin elyaf dizilimi ve darbe anında deformasyon yönleriyle ilişkilidir. Özellikle üst örnekteki düzensiz çatlak yapısı, yüksek darbe kuvveti altında elyaf-matris ara yüzeyinde lokal kopmaların başladığını ve ardından yanal çatlamların hızla yayıldığını göstermektedir. Bu tip hasar davranışı, Zhou ve Lucas (1999) tarafından da suya maruz kalmış kompozitlerde raporlanmış; matrisin su emilimiyle plastikleşip daha kolay çatlama eğilimi gösterdiği belirtilmiştir.

Şekil 4.37’ de ise darbe sonrası numunelerin yandan görünüşleri sunulmuştur. Her iki numunede de merkezde içe doğru çökme ve çevresel bölgelerde elastik deformasyon görülmektedir. Bu durum, darbenin merkezde enerji yoğunluğu yarattığını, çevresel bölgelerde ise bu enerjinin plastisite veya çatlak gelişimi olmadan sönümlendiğini gösterir. Ancak sol numunedeki tabaka ayrışması (delaminasyon) ve eğilme daha belirgindir. Bu, elyaf-matris ara yüzey bağlarının zayıf olduğunu ve darbe anında tabakalar arası ayrılma oluştuğunu gösterir. Literatürde bu tür hasar davranışı, özellikle nemli ortamda yaşlandırılmış cam veya bazalt elyaf takviyeli kompozitlerde sıkça gözlenmekte, enerji sönümlemenin elyaf katkısından çok matris deformasyonuna dayalı olduğu ifade edilmektedir (Fiore ve ark., 2015).

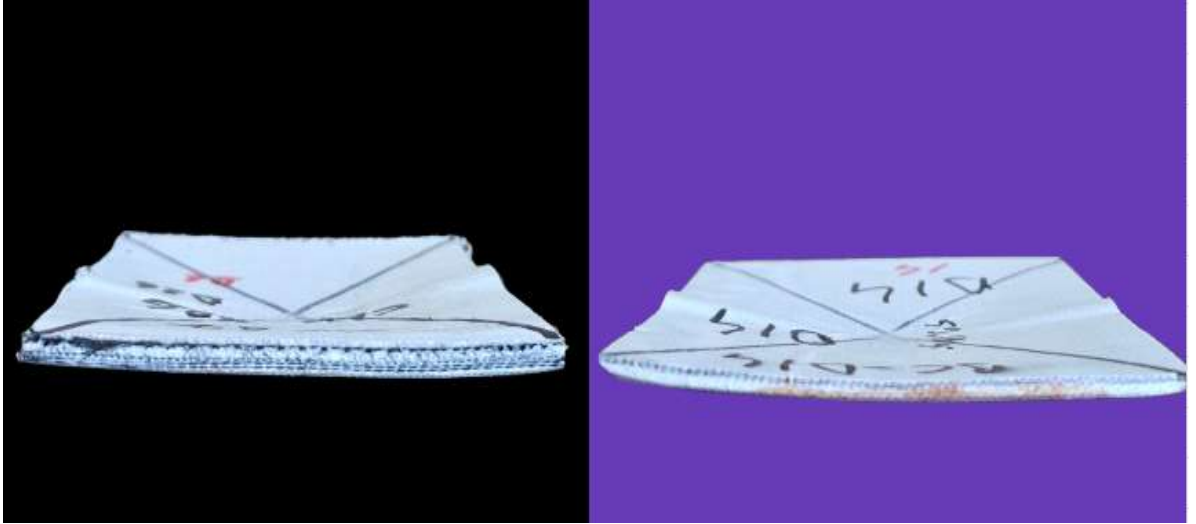
Bu bulgular, mekanik test sonuçları ile uyum içindedir. Enerji-zaman grafiklerinde gözlenen ani düşüşler, bu tür mikro çatlak, yırtılma ve ara yüzey ayrılması gibi yapısal hasarlarla doğrudan ilişkilidir. Hibrit kompozitlerin darbe sonrası davranışlarında en zayıf elyaf tipi (özellikle cam elyaf) genellikle hasar davranışını domine etmekte, bu da çatlak yönelimi ve çatlak şekillerinde belirleyici rol oynamaktadır. Tüm bu gözlemler, mekanik testlerle birlikte değerlendirilerek kompozit tasarımında elyaf kombinasyonunun, yaşlandırma koşullarının ve bağ yapısının optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.35. Cam – PE hibrit kompozit düşük hızlı darbe testi sonrası numune görüntüleri



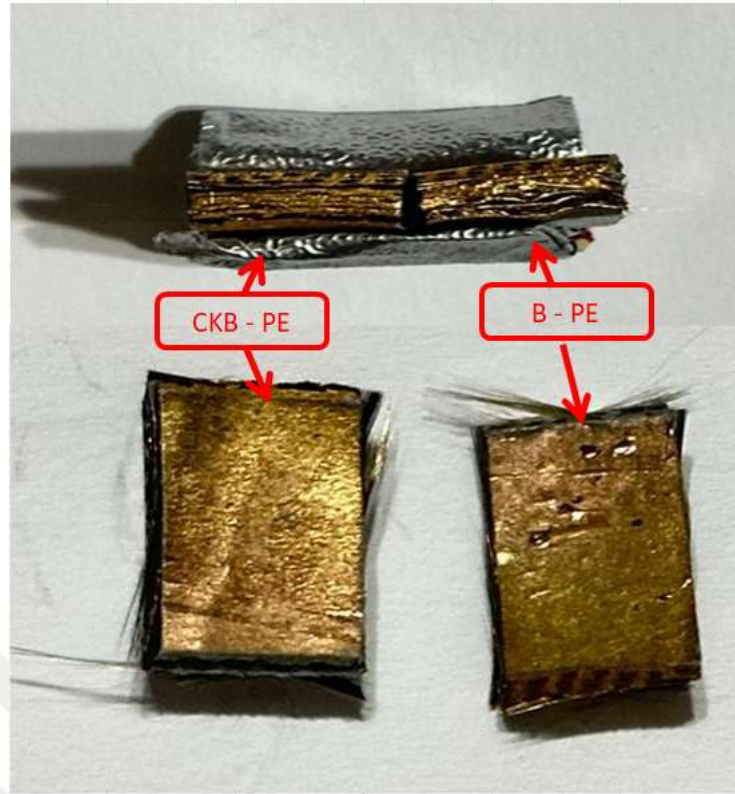
Şekil 4.36. Cam – PE hibrit kompozit düşük hızlı darbe testi numune mikro görüntüsü



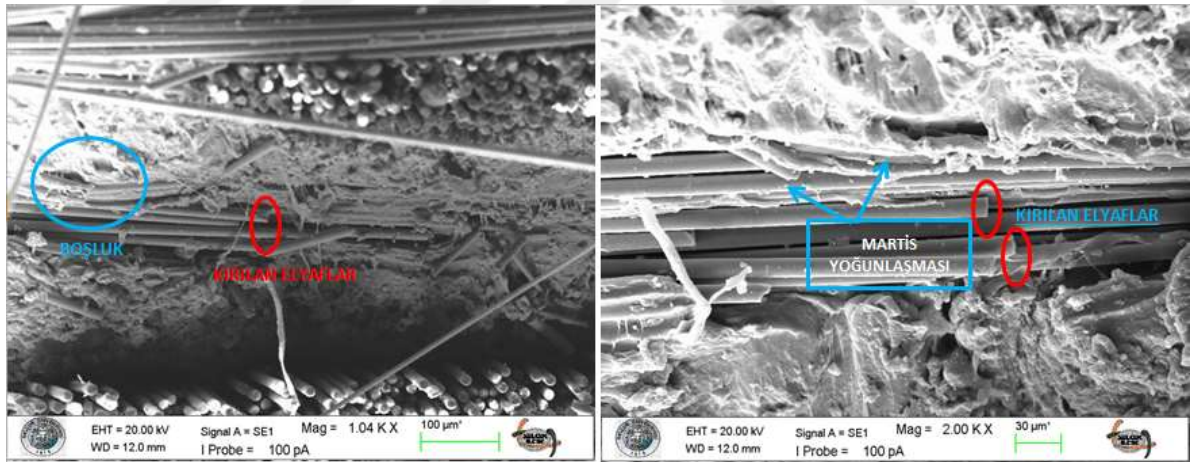
Şekil 4.37. Cam – karbon - bazalt– PE hibrit kompozit ve bazalt – cam – PE hibrit kompozit düşük hızlı darbe testi numune yan görüntüsü

4.4. Cam – PE ve Cam – Karbon – Bazalt PE Hibrit Kompozitlerinin Eğilme Deney Numunesi Sem Analizi

Çekme ve darbe numunelerinden görüntü alınamamıştır. Çekme numunelerinde kopma, darbe numunelerinde deformasyona uğrayan bölge kesilmeden çıkartılamadığından dolayı sadece eğilme numunelerinden görüntü alınabilmektedir. Görüntüsü alınan cam – karbon – bazalt – PE ve bazalt – PE hibritlerinin de yanlarında ayrılma olduğundan dolayı iki numunenin görüntüsü alınmıştır. Her iki numunenin de yüzeyleri altın ile kaplanarak elektron mikroskopunda incelenmiştir. Numunelerin altın kaplanmış hali Şekil 4. 38’ de verilmiştir.



Şekil 4.38. Altın kaplanan eğilme numuneleri



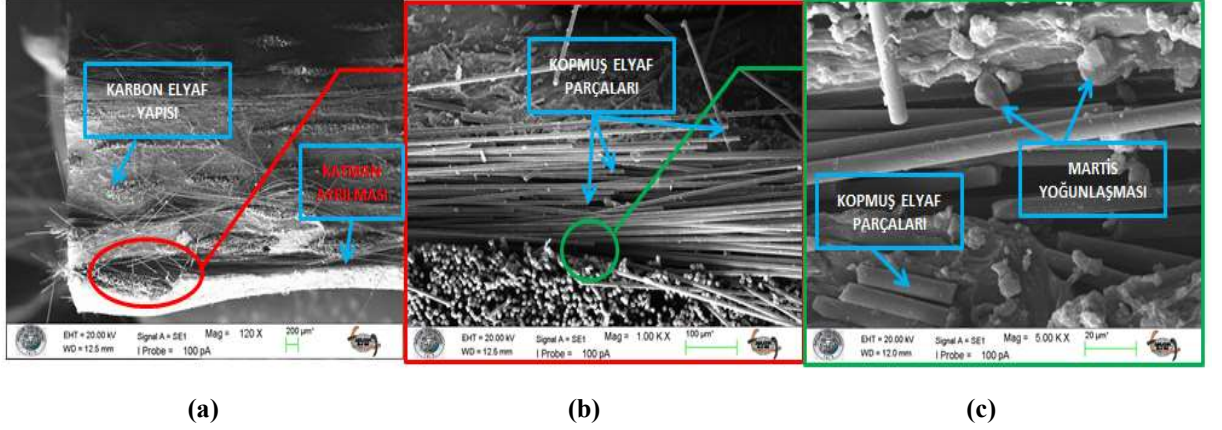
(a)

(b)

Şekil 4.39. Bazalt – PE eğilme numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 4.39’ da bazalt takviyeli polietilen matrisli hibrit kompozitlerin mikroyapısal özellikleri açıkça görülmektedir. elyafların, korozif ortamda kaldıklarından dolayı matris malzemesinden yer yer ayrıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum ara yüzey etkileşimine bağlı olarak (Şekil 4.47a) gevrek kırılma davranışına neden olmuştur.

Tüm bu bulgular, ara yüzey kalitesi ve üretim süreçlerinin kompozit malzemenin mekanik davranışı üzerinde belirleyici etkileri olduğunu göstermektedir.

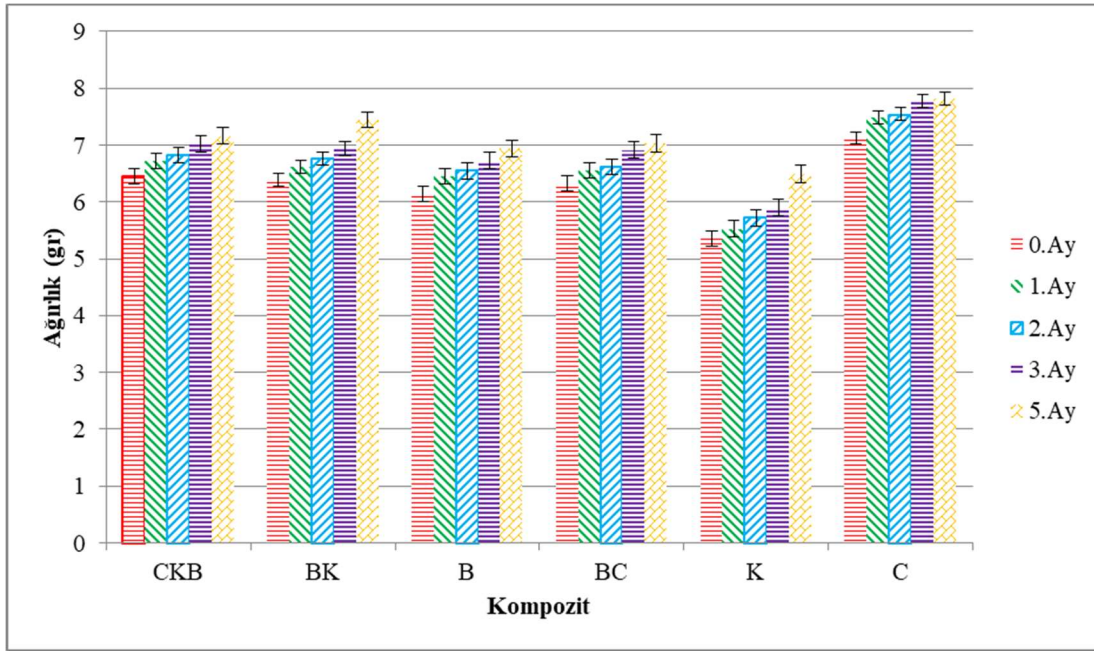


Şekil 4.40. Cam – karbon - bazalt – PE eğilme numunesinin SEM görüntüsü

Tuzlu su ortamında 2 ay süreyle yaşlandırılmış cam-karbon-bazalt elyaf takviyeli polietilen (PE) matrisli hibrit kompozit eğilme numunesinin SEM görüntüleri, yaşlandırma sürecinin malzeme mikroyapısı üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymuştur. Görsellerde, karbon elyaf bölgelerinde katman ayrılması ve arayüzey boşlukları gözlenmiş, bu durum karbon elyafın PE matrisle olan zayıf etkileşiminin tuzlu su etkisiyle daha da bozulduğunu göstermiştir. Cam elyaf içeren alanlarda kopmuş elyaf parçaları ve elyaf-matris ayrılmaları belirginleşmiş; bu da cam elyafın PE ile düşük aderansını ve yaşlandırmaya karşı sınırlı direncini yansıtmaktadır. Bazalt elyaf bölgelerinde ise matris yoğunlaşmaları, topaklanmalar ve elyaf etrafında düzensiz polimer birikimleri görülmüş, bu durum matrisin elyaflara yeterince nüfuz edememesi veya suyun mikroyapıya sızarak yapısal çözülmelere yol açmasıyla ilişkilendirilebilir. Genel olarak, yaşlandırma sonucu kompozit yapı içerisinde elyaf-matris bağlarının zayıfladığı, çatlak oluşumuna zemin hazırlayan boşlukların arttığı ve mikroyapısal bütünlüğün olumsuz yönde etkilendiği değerlendirilmiştir.

4.5. Numunelerin Aylara Göre Su Alım Oranları

Şartlandırılmış tüm numunelerin testlerden önce ağırlıkları ölçülmüştür. Numunelerin ortalama su alım oranları aşağıdaki Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5’ de verilmiştir.



Şekil 4.41. Eğilme numunelerinin aylara göre ağırlıkları

Çizelge 4.15. Eğilme numunelerinin aylara göre ağırlıkları

Kompozit Cinsi	0.Ay (gr)	1.Ay (gr)	2.Ay (gr)	3.Ay (gr)	5.Ay (gr)
CKB	6.45 ± 0.12	6.72 ± 0.13	6.83 ± 0.13	7.02 ± 0.1	7.16 ± 0.14
BK	6.38 ± 0.11	6.62 ± 0.11	6.76 ± 0.12	6.94 ± 0.12	7.45 ± 0.13
B	6.15 ± 0.13	6.45 ± 0.14	6.55 ± 0.14	6.73 ± 0.14	6.94 ± 0.15
BC	6.32 ± 0.13	6.55 ± 0.13	6.62 ± 0.13	6.91 ± 0.14	7.03 ± 0.14
K	5.35 ± 0.13	5.53 ± 0.13	5.72 ± 0.14	5.9 ± 0.14	6.49 ± 0.16
C	7.13 ± 0.1	7.48 ± 0.11	7.54 ± 0.11	7.77 ± 0.11	7.82 ± 0.11

Tuzlu su ortamında 0–5 ay süreyle bekletilen eğilme testi numunelerinde gözlenen su alma oranları, kompozitlerin takviye elyaf türüne bağlı olarak farklılık göstermiştir. En yüksek su alımı %21.31 ile K (karbon elyaf) kompozitinde gerçekleşirken, bunu %16.77 ile BK (bazalt-karbon hibrit) ve %12.85 ile B (bazalt elyaf) kompoziti takip etmiştir. En düşük su alma oranı ise %9.68 ile C (cam elyaf) kompozitinde gözlenmiştir. Bu durum, karbon elyafın yapısındaki mikro boşlukların zamanla tuzlu suyu tutma potansiyelini artırabileceğini, buna karşın cam elyafın nispeten daha stabil bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Literatürde, özellikle doğal ve bazalt elyaf içeren kompozitlerin suya karşı daha duyarlı olduğu, bunun da matris-dolgu arayüzeyine tuzlu suyun difüzyonuyla ilişkili olduğu belirtilmektedir.

Hibrit kompozitlerde (CKB, BC, BK) ise su alma oranları, bileşimdeki elyafların türüne ve oranına bağlı olarak orta düzeyde seyretmiştir. Genel olarak tüm kompozitlerde zamanla artan kütle, polietilen matrisli yapıların tuzlu suya karşı geçirgenliğini ve bu ortamın uzun vadede eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, polietilen matrisli cam, karbon ve bazalt elyaf takviyeli tekli ve hibrit kompozitlerin, tuzlu su ortamında yaşlandırma sonrası çekme, eğilme ve düşük hızlı darbe davranışları sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler, yaşlanma sürecinin kompozitlerin mekanik performanslarını nasıl etkilediğini, tekli ve hibrit kompozitlerin birbirlerine göre üstün ve zayıf yönlerini ortaya koyarak tuzlu su ortamı gibi zorlu koşullar altında malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken parametreleri belirlemeye katkı sağlamıştır.

Bu tez çalışmasından aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yaşlandırma süresi arttıkça tüm kompozitlerde çekme, eğilme ve darbe dayanımları azalmış; bunun nedeni polietilen matrisin su emerek ara yüzey bağlarının zayıflamasıdır.
- Karbon elyaf takviyeli tekli kompozitler yaşlanmaya karşı en yüksek direnci göstermiştir, ancak yüksek maliyet nedeniyle üretim açısından dezavantaj oluşturabilir.
- Cam elyaf takviyeli tekli kompozitler başlangıçta yüksek çekme ve eğilme dayanımı sağlayarak yüksek başlangıç dayanımı avantajı sağlamış, fakat yaşlanma sonrası ara yüzey bağlarının zayıflaması nedeniyle en yüksek performans kaybını göstererek servis ömrü (kullanım süresi) açısından dezavantaj oluşturmuştur.
- Bazalt elyaf takviyeli tekli kompozitler, başlangıçta darbe dayanımını artırarak tokluk avantajı sağlamış, fakat yaşlanma sürecinde ara yüzeydeki ayrılmalar nedeniyle dayanımı tam olarak koruyamamıştır.
- Hibrit kompozitler, camın başlangıç dayanımı sağlama, karbonun yaşlanmaya karşı dayanımı koruma ve bazaltın darbe dayanımını artırma özelliklerini birleştirerek başlangıçta yüksek ve dengeli mekanik performans avantajı sağlamıştır, ancak cam elyafın yaşlanma sonrası performansı düşürmesi nedeniyle uzun vadede dayanım kayıpları tamamen engellenememiştir.
- Hibrit yapılar çatlak ilerlemesini yavaşlatma, deformasyonları kademeli yayma ve darbe altındaki enerji absorpsiyonunu yüksek tutma açısından servis ömrünü artırıcı avantaj sağlamıştır, ancak üretim sürecinde elyaf sıralaması ve yerleşimi kritik olduğu için üretimde karmaşıklık ve zaman kaybı oluşturmuştur.

- Karbon elyaf katkısı yaşlanmaya karşı dayanımı korumada en etkili takviye olarak avantaj sağlamış, fakat yüksek su emme eğilimi nedeniyle su alım oranını artırarak mikroyapıda boşluk oluşumunu tetikleyebilmiştir.
- Bazalt elyaf katkısı, darbe dayanımı artırma ve çatlak ilerlemesini geciktirme avantajı sağlamış, ancak matris ile ara yüzey uyumsuzluğu yaşlanma sonrası performansı sınırlamıştır.
- Düşük hızlı darbe testlerinde hibrit kompozitler, cam takviyeli tekli kompozitlere göre yaşlanma sonrası daha yüksek enerji absorpsiyon kapasitesini koruyarak darbe dayanımı avantajı sağlamıştır, fakat karbon takviyeli tekli kompozitlerin dayanım seviyesine tam olarak ulaşamamıştır.
- SEM analizlerinde matris çatlamları, elyaf-matris ayrılmaları ve katman kopmaları gözlemlenmiş, bu hasar türleri performans kayıplarını hızlandırmış ve yaşlanma sürecinin kritik etkisini göstermiştir, ancak hibrit kompozitlerde bu hasarların ilerlemesi tekli cam takviyeli kompozitlere göre daha yavaş gerçekleşmiştir.
- Polietilen matrisli tüm kompozitlerde yaşlandırma süresi arttıkça çekme, eğilme ve darbe dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Bunun ana nedeni, polietilen matrisin %9 ila %21 arasında su absorbe ederek plastize olması, matrisin sertliğini kaybedip elastik davranışa geçmesi ve tuzlu su etkisiyle elyaf-matris ara yüzey bağlarının zayıflamasıdır.
- Karbon elyaf takviyeli tekli kompozitlerde, 0. ayda 107,6 MPa olan çekme dayanımı, 5. ayda 56,8 MPa'a düşerek %47 kayıp göstermiştir. Bu düşüş oranı diğer kompozitlere göre en düşük olup karbon elyafın yaşlanmaya karşı dayanımı koruma avantajını ortaya koymuştur. Gerekçe olarak karbon elyafın düşük su geçirgenliği, kimyasal inertliği ve polietilen matris ile güçlü aderans sağlaması gösterilebilir.
- Cam elyaf takviyeli tekli kompozitlerde, 0. ayda 69,2 MPa olan çekme dayanımı, 5. ayda 27,6 MPa'a düşerek yaklaşık %60 oranında kayıp göstermiştir. Bu yüksek kayıp, cam elyafın yüzeyindeki alkalin hassasiyet ve ara yüzey bağlarının su etkisiyle zayıflamasından kaynaklanmış, cam elyafın yaşlanmaya karşı en hassas yapı olduğunu göstermiştir.
- Bazalt elyaf takviyeli tekli kompozitlerde, 0. ayda 82,5 MPa olan çekme dayanımı, 5. ayda 37,4 MPa'a gerileyerek %55 oranında kayıp yaşanmıştır. Bazalt elyafın iyi mekanik özelliklere sahip olması başlangıçta avantaj sağlarken, ara yüzey bağlarının yaşlanma sonrası zayıflaması bu kaybı oluşturmuştur.

- Eğilme testlerinde, cam elyaf takviyeli kompozit 0. ayda 47,8 MPa'dan 5. ayda 21,0 MPa'a düşerek %56 kayıp göstermiş, karbon elyaf takviyeli kompozit ise 17,3 MPa'dan 10,1 MPa'a düşerek %42 kayıp yaşamıştır. Bu durum karbon elyafın eğilme dayanımında da yaşlanmaya karşı direnç sağladığını göstermektedir.
- Düşük hızlı darbe testlerinde, karbon elyaf takviyeli kompozit 0. ayda ~2900 N maksimum darbe kuvveti gösterirken, 5. ayda ~2200 N'ye düşerek %24 kayıp yaşamış; cam elyaf takviyeli kompozit ise 0. ayda ~1800 N'den 5. ayda ~1300 N'ye düşerek %28 kayıp göstermiştir. Karbon elyaf, yaşlanma sonrası darbe dayanımının korunmasında avantaj sağlamıştır.
- Hibrit kompozitlerde (CKB-PE) çekme dayanımı başlangıçta cam ve karbon katkısıyla yüksek seviyede iken, yaşlanma sonrası cam elyafın performans düşüşü eğilimi nedeniyle dayanımda azalma gözlenmiş, ancak karbon ve bazalt katkıları dayanım kaybını sınırlandırmıştır. 1. ayda 30 J enerji absorbe edebilen hibrit yapı, 5. ayda 22 J seviyesine düşerek %27 kayıp yaşamıştır.
- Hibrit kompozitlerin darbe testinde cam katkılı tekli kompozitlere göre daha iyi performans sergilemesi, camın zayıflığını karbon ve bazalt katkısının kısmen dengelemesiyle mümkün olmuştur. Bu, çatlak ilerlemesinin yavaşlatılması ve deformasyonun kademeli yayılması açısından avantaj sağlamıştır.
- Su alma oranları, karbon elyaf takviyeli kompozitlerde %21,31 ile en yüksek, cam elyaf takviyeli kompozitlerde %9,68 ile en düşük seviyede çıkmıştır. Karbon elyafın mikroporoz yapısı su emilimini artırsa da yapısal dayanımı koruyabilmiştir; cam elyaf düşük su emilimine rağmen ara yüzeyde hızlı zayıflama göstermiştir.
- SEM analizlerinde yaşlandırma sonrası ara yüzeyde lif-matris ayrılmaları, matris çatlakları ve katman kopmaları gözlenmiş; cam bölgelerde matris-elastik bağların koptuğu, karbon bölgelerde katman ayrılması, bazalt bölgelerde polimer yoğunlaşması belirlenmiştir. Bu mikro hasarlar, yaşlanma sonrası dayanım düşüşlerinin nedenini desteklemiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada, farklı elyaf takviyeleri kullanılarak üretilen polietilen matrisli kompozitlerin yaşlandırma sürecine karşı mekanik davranışları detaylı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, yaşlanma koşullarının malzemelerin performansında belirleyici bir etken olduğunu ve özellikle takviye tipi ile elyaf-matris uyumunun bu sürece karşı dayanımda kritik rol oynadığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, gelecekte

benzer çalışmaların daha kapsamlı ve uygulamaya dönük sonuçlar verebilmesi adına aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Bu çalışmada sadece eksenel çekme, üç nokta eğilme ve düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır; ilerleyen çalışmalarda yorulma ve aşındırma gibi farklı yükleme senaryoları da dahil edilerek, kompozit yapıların gerçek kullanım koşullarına daha yakın davranışları ortaya konulabilir.
- Hibrit takviyeli sistemlerde elyaf oranları sabit tutulmuştur. Farklı oranlardaki elyaf kombinasyonlarının (cam, karbon, bazalt, matris malzeme oranlarının %50: %30:%20) performans etkilerinin araştırılması, en uygun tasarıma ulaşılmasını kolaylaştırabilir.
- Elyaf-matris ara yüzünün uzun vadeli kararlılığının artırılması için plazma uygulaması, silan uygulaması gibi yüzey modifikasyon teknikleri kullanılarak bağ kuvvetlerinin yaşlanma süreci öncesinde iyileştirilmesi sağlanabilir.
- Matris olarak yalnızca düşük yoğunluklu polietilen tercih edilmiştir. Farklı polimer türlerinin (örneğin yüksek yoğunluklu polietilen, polipropilen matrisler) aynı takviye sistemleriyle karşılaştırılması, çevresel etkiler karşısında daha sürdürülebilir malzeme seçimleri yapılmasına katkı sunabilir.
- Yaşlandırma süreci yalnızca çevresel koşullar (süre ve ortam) ile sınırlı tutulmuştur. Gelecek çalışmalarda UV, termal döngü, tuz püskürtme gibi daha agresif yaşlandırma (tuz oranı artırılması gibi) senaryolarının uygulanması, dış ortam dayanımı yüksek kompozit sistemlerinin belirlenmesinde önemli rol oynayacaktır.
- Son olarak, bu çalışmada elde edilen deneysel veriler ışığında, hibrit kompozitlerin otomotiv iç aksamaları, dış cephe kaplamaları, altyapı borulama sistemleri ve darbeye maruz kalan paketleme malzemeleri gibi yarı-yapısal uygulamalarda kullanılabilirliği değerlendirilerek saha ölçekli prototip çalışmalara geçilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abrate, S., 2011. *Impact Engineering of Composite Structures*, Springer Wien, 99p, 107- 108p, New York.
- Agarwal, B. D., Broutman, L. J., & Chandrashekhara, K. (2017). *Analysis and performance of fiber composites* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Akbulut, H., & Tanoğlu, M. (2020). Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin çevresel etkiler altındaki davranışları. *Polimer Teknolojileri Dergisi*, 3(2), 45–53.
- Ali, M., Shakoob, R. A., Nasir, M. A., & Al-Aqeeli, N. (2020). Durability of basalt fiber reinforced polymer composites in seawater environments: A review. *Construction and Building Materials*, 265, 120764.
- Altun, F., & Gültekin, A. (2018). The mechanical behavior of hybrid fiber reinforced polymer composites under environmental effects. *Construction and Building Materials*, 170, 320–327.
- Andrady, A. L. (2003). *Environmental Degradation of Plastics under Land and Marine Exposure Conditions*. In: *Plastics and the Environment*. John Wiley & Sons
- Ary, S., Yonjig, K., Leonard, T., Cheol, K., & HoKyong, S. (2014). The effect of stacking sequence on flexural behavior of basalt and carbon fiber reinforced hybrid composites. *Composite Structures*, 116, 316–326.
- Bank, L. C. (2006). *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. John Wiley & Sons.
- Baş, A., 2015. Plastik Katkı Maddeleri'nin, İzotaktik Polipropilen Ahşap Kompozitlerin Yapı ve Özelliklerine Etkisi. Y.L Tezi, Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yalova, Türkiye.
- Bujard, P., Poursartip, A., & Hubert, P. (2003). Durability of GFRP composites under salt fog conditions. *Journal of Composite Materials*, 37(10), 887–898.
- Cabioğlu A., 2012, Farklı Sıcaklık Ortamlarında Pim Bağlantılı Kompozit Plakaların Yatak Dayanımlarının İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). John Wiley & Sons
- Cantwell, W.J. and Morton, J., 1991. The impact resistance of composite. *Composites*, 22(5), 347-362.
- Chen, D., Sun, G., Meng, M., Jin, X., & Li, Q. (2019). Flexural Performance of hybrid composites reinforced by glass, basalt and carbon fibers. *Materials & Design*, 181, 108–122.

- Chen, D., Li, Q., Meng, M., Sun, G., & Ary, S. (2019). Low-velocity impact behavior of hybrid composites with carbon, glass, and basalt fibers. *Composite Part B: Engineering*, **175**, 107128.
- Chen, J., Liu, Y., Zhang, B., & Wang, Y. (2016). Effects of seawater aging on interfacial properties and low-velocity impact behavior of glass fiber/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, **98**, 120–128.
- Chen, Y., Zhang, J., Li, S., & Wang, Y. (2019). *Effects of seawater aging on mechanical properties of polyethylene-based composites*. Polymer Degradation and Stability, 167, 108-115.
- Çelik, M., & Arslan, F. (2017). Tuzlu su ortamında lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi. *Kompozit Malzemeler ve Uygulamaları Dergisi*, **5**(1), 22–29.
- Çelik, O. (2022). Karbon fiber kompozitlere alternatif olarak doğal fiber takviyeli hibrit kompozitlerin özelliklerinin incelenmesi. [Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi].
- Demir, Okan. *Karbon Nanotüp ve Cam Elyaf Takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. 2017. Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Doğan, A., & Arıkan, V. (2017). Investigation of impact response of sandwich composites with thermoplastic and thermoset face sheets. *Journal of Composite Materials*, **51**(20), 2843–2854.
- Esleman, E. A., & Önal, G. (2023). *Three-point bending fatigue behavior of basalt–carbon–glass/epoxy hybrid composites under saltwater environment*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, **46**(7), 2496–2509.
- Fiore, V., Di Bella, G., & Valenza, A. (2011). Glass–basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. *Materials & Design*, **32**(4), 2091–2099.
- Fiore, V., Scalici, T., Valenza, A. (2014). Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L. as potential reinforcement of polymer composites. Volume 106, 15 June 2014, Pages 77-83
- Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., & Valenza, A. (2015). A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, **74**, 74–94.
- Gemi L., 2004, Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Davranışı, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Guo, Y., Zhou, W., & Ye, L. (2016). Effects of acidic environment on interfacial properties of carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **82**, 1–7.

- Güğü, H. (2018). Karbon nanotüp ve cam elyaf takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. [Yüksek lisans tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi].
- Jawaid, M., Abdul Khalil, H. P. S., & Bakar, A. A. (2011). Woven hybrid composites: Tensile and flexural properties of oil palm-woven jute fibers based epoxy composites. *Materials Science and Engineering: A*, 528(15), 5190–5195.
- Jia, M., Zhang, Y., & Li, J. (2017). Effect of fiber hybridization on the mechanical properties of composites exposed to seawater aging. *Composites Part B: Engineering*, 119, 1–8.
- Jin, Z., Han, Z., Chang, C., Sun, S., & Fu, H. (2022). Interface enhancement and mechanical Performance improvement of thermoplastic composites: A review. *Composites Science and Technology*, 226, 109547.
- Kara, M., (2006). Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı. Y.L Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Kara, M. E., & Yücel, H. (2020). Hybrid fiber-reinforced composites: A review on mechanical performance and environmental durability. *Polymer Composites*, 41(7), 1895–1908. <https://doi.org/10.1002/pc.25534>
- Karahan, M., Yıldız, M., & Akbulut, H. (2022). Hibrit elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin çevresel yaşlanma sonrası darbe davranışları. *Kompozit Teknolojileri Dergisi*, 18(1), 44–53.
- Kaya, A.İ., (2016), Kompozit Malzemeler ve Özellikleri, Putech&Composites, 38-45.
- Kıratlı, S., (2012). Darbe Hasarlı Tabakalı Kompozitlerin Burkulma ve Esneklik Davranışı, Y.L. Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, Konya.
- Korkut S., (2017), Statik ve Dinamik Yükler Altında Kompozit Plakaların Hasar Durumlarına Karşı Davranışlarının İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koruvatan, A. (2008). Farklı Kür Sıcaklığı Ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Kumar ve ark. (2020) – *Mechanical performance of CF-reinforced polyethylene composites, Composites Part B*
- Kurt, R., & Bayraktar, E. (2016). Evaluation of mechanical performance of glass fiber reinforced thermoplastic composites in marine environments. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(2), 127–136. <https://doi.org/10.1177/0731684415618475>

- Metin, M., 2008. E Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi. Y.L Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). *Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview*. **Macromolecular Materials and Engineering**, 276–277(1), 1–24.
- Muñoz, F., & García-Manrique, J. A. (2015). Influence of marine environment on the degradation of composite materials: A review. *Polymer Degradation and Stability*, 113, 55–70.
- Nijssen, R.P.L., 2015. Composite Materials an introduction, A VKCN Publication, 16, 60, 88p, Hollanda.
- Nisini, E., Santulli, C., & Liverani, A. (2016). Mechanical properties of hybrid epoxy composites with basalt, carbon and flax fibres. *Materials Today: Proceedings*, 3(10), 3623–3629.
- Nogueira, P., Araújo, A., & Marques, A. T. (2010). Effect of seawater aging on glass and carbon fiber reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, 44(12), 1451–1468.
- Onat, A., 2015. Kompozit Malzemeler Ders Notu. Sakarya Meslek Yüksekokulu ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı, Sakarya, Türkiye.
- Özdemir, M., & Sarıtaş, S. (2021). Cam elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin tuzlu suya dayanımı üzerine bir inceleme. *Malzeme Bilimi ve Uygulamaları Dergisi*, 9(1), 30–38.
- Pheysey, J., De Cola, F., & Martinez, F. (2024). Hybrid composites manufactured from prepregand short fibre panels using PEEK matrix. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 170, 107364.
- Polat, B. (2019). Cam takviyeli polimer matrisli termoplastik kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması. [Yüksek lisans tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi].
- Potoğlu, U., 2012. Sandviç Kompozit Plakların Darbe Davranışları. Y.L Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Pritchard, G. (1998). *Reinforced Plastics Durability*. Woodhead Publishing.
- Sayer, M., 2009. Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.
- Sezen, S., Duman, S., Kaplan, O., Ünsan, Y., ve Korkut, E., 2015 Deniz sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için basit bir deney düzeneği. *GİDB Dergi*, 3, 41-62.

- Shen, H., & Springer, G. S. (2020). Moisture absorption and desorption of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 10(1), 2–20.
- Soni S.K., Thomas B., Kar V.R, 2020, A Comprehensive Review On CNT'sand CNT Reinforced Composites: Syntheses, Characteristicsand Applications, *Materaiastoday Communications* 25, 101546.
- Şahin, Y., 2015. Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, 31-32, 36-42, 65-70 118, 126, 156, Ankara, Türkiye.
- Taher, M. S. A. (2017). Preparation and characterization of thermoplastic polyurethane nano composites and hybrid composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30(5), 650–667.
- Tanin, M. (2016). Karbon nanotüp ve cam elyaf takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi. [Yüksek lisans tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi].
- Thomason, J. L. (2006). The interface region in glass fibre-reinforced epoxy resin composites: 2. Water absorption, voids and the interface. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(1), 93–101.
- Thomason, J. L. (2019). The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 124, 105469.
- Thwe, M. M., & Liao, K. (2003). Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 63(3–4), 375–387.
- Türkmen, İ. ve Durmuş, H., 2013, Deniz Taşıtlarının Üretiminde Kullanılan Kompozit Malzemeler. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 196, 26-35.
- Ullah, H., Khan, R. U., & Silberschmidt, V. V. (2024). Pseudo-ductile behavior in carbon/glass reinforced thermoplastic composites: Experimental and numerical study. *Materials & Design*, 229, 111840.
- Ünal, H., vd. (2021). Cam elyaf, cam bilya ve EPDM katkılı poliamid-6 hibrit kompozitlerin mekanik Performanslarının belirlenmesi. *Polimeros*, 31(4), e2021044.
- Wang, Y., Zhang, Z., & Liu, H. (2015). Effect of seawater aging on the mechanical and interfacial properties of glass fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 78, 361–368.
- Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2016). Effect of seawater ageing on mechanical properties of flax/epoxy composites. *Ocean Engineering*, 112, 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.042>

- Yeşildal, S., 2010, Darbe Yüklerine Maruz Denizel Kompozitlerde Hasar Mekanizmaları. Y.L Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Yıldız, R. (2019). Karbon prepreg, cam prepreg ve bazalt elyaf ile üretilmiş hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. [Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi].
- Yılmaz, V., Demir, F., ve Kaya, M. (2020). *Doğal elyaf takviyeli kompozit malzemelerin çevresel dayanımının incelenmesi*. Polimer Kompozitler Dergisi, 12(3), 145–153.
- Yiğit, A., (2010). Petek Yapılı Sandviç Yapıların Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi. Y.L Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Yüksel Yılmaz, A. N. (2018). PVC kaplı cam elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması. [Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi].
- Zhou, J., & Lucas, G. (1999). The effects of a water environment on anomalous absorption behavior in graphite/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 59(2), 243–252.
- Zhou, Y., Mallick, P. K., & Dhamodaran, M. (2012). Environmental degradation of hybrid composites. *Polymer Composites*, 33(1), 88–95.
- Zhou, Y., Wang, Y., Liu, Y., & Ma, J. (2020). Effects of water absorption on the mechanical properties of polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 136, 105959.