



T.C
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DENİZ SUYU ORTAMINDA
ŞARTLANDIRILMIŞ
BAZALT/KARBON/CAM/EPOKSİ HİBRİT
KOMPOZİTLERİN YORULMA
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ

Esmael Adem ESLEMAN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Esmael Adem ESLEMAN tarafından hazırlanan “Deniz Suyu Ortamında Şartlandırılmış Bazalt/Karbon/Cam/Epoksi Hibrit Kompozitlerin Yorulma Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 28.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Behçet Dağhan

.....

Danışman

Doç. Dr. Gürol Önal

.....

Üye

Prof. Dr. Mesut Uyaner

.....

Üye

Prof. Dr. Necati Ataberk

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Aslan

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması KTÜN Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 201110022 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.

Esmael Adem ESLEMAN

25.07.2022

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DENİZ SUYU ORTAMINDA ŞARTLANDIRILMIŞ BAZALT/KARBON/CAM/EPOKSİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN YORULMA ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Esmael Adem ESLEMAN

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

Danışman: Doç. Dr. Gürol ÖNAL

2022, 125 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Gürol ÖNAL
Prof. Dr. Behçet DAĞHAN
Prof. Dr. Mesut UYANER
Prof. Dr. Necati ATABERK
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah ASLAN**

Günümüzde hibrit kompozitler, daha düşük ağırlık ve daha yüksek mukavemet ve rijitlik, daha iyi korozyon ve aşınma direnci, uzun yorulma ömrü gibi çekici özelliklerinden dolayı kritik yapısal parçalar için farklı sektörlerde kullanılmaktadır. Öte yandan, yapısal çökmenin en yaygın nedeni yorulmadır. Yorulma, tekrarlanan yüklemeye maruz kaldığında, malzemenin maksimum mukavemetinin altındaki bileşenlerin ani bir hasardır. Bu tez, tuzlu suyu koşullarının bazalt, karbon ve cam elyaf/epoksi hibrit kompozitlerin çekme, eğilme ve üç noktalı eğilme yorulma özellikleri üzerindeki etkisini incelemektedir. Beş farklı kompozit plaka: Bazalt/Epoksi (BE), Karbon/Epoksi (CE), Cam/Epoksi (GE), Bazalt-Cam/Epoksi (BGE) ve Bazalt-Karbon-Cam/Epoksi (BCGE), Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama yöntemi (VARTM) kullanılarak üretilmiştir. PST 650 dekupaj testeresi numuneleri ASTM D3039 ve ASTM D7264 standartlarına göre hazırlamak için kullanılmış ve testlerden önce 60 gün, 120 gün ve 180 gün tuzlu suyu çözeltisine daldırılmıştır. Testler 100 KN kapasiteli Instron 8801 çekme/yorulma test cihazı kullanılarak yapılmış ve her kategoriden üç numune test edilerek deneyin tekrarlanabilirliği gözlemlenmiştir. Ayrıca statik ve yorulma üç nokta eğilme testini yapmak için özel bir fikstür tasarlanıp üretilmiştir. Ağırlık kazancı eğrisi, gerilme-BŞD diyagramı, S-N ve rijitlik (stiffness) bozulma eğrileri oluşturulmuştur. Hibritleme ve tuzlu suyu koşullarının çekme, statik eğilme, yorulma ömrü ve eğilme rijitlik kaybı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Sonuçlar tüm kompozit numunelerin çekme ve eğilme özelliklerinin, şartlandırma süresi arttıkça bozulduğunu/azaldığını göstermektedir. Örneğin, BE kompozitlerinin çekme mukavemeti %21,11 oranında düşerken, CE kompozitleri sadece %9,09 oranında azalmıştır. Aynı şekilde, maksimum ve minimum çekme modülü kaybı sırasıyla BE (%17,12) ve BCGE (%8,68) hibrit kompozitlerde görülmektedir. En yüksek eğilme mukavemeti ve modül kaybı sırasıyla BE (%45,59) ve BCGE hibrit kompozitlerde (%11,18) görülmektedir. Bununla birlikte, BGE hibrit kompozitlerinin çekme mukavemeti, bazalt elyafların varlığı sayesinde GE'ye göre gelişme göstermiştir. Yorulma testi sonuçları, tuzlu su çözeltisi içerisinde şartlandırma süresi arttıkça tüm kompozit numunelerin eğilme yorulma özelliklerinin bir bozulma gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bazalt Elyaf, Cam Elyaf, Eğilme Yorulma, Hibrit Kompozitler, Karbon Elyaf, Mekanik Testler, Tuzlu Suyu Etkisi, Üç Noktada Eğilme

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FATIGUE PROPERTIES OF BASALT/CARBON/GLASS/EPOXY HYBRID COMPOSITES UNDER SEAWATER ENVIRONMENT

Esmael Adem ESLEMAN

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

Advisor: Associate Prof. Dr. Gürol ÖNAL

2022, 125 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Gürol ÖNAL
Prof. Dr. Behçet DAĞHAN
Prof. Dr. Mesut UYANER
Prof. Dr. Necati ATABERK
Assi. Prof. Dr. Abdullah ASLAN**

Nowadays, hybrid composites have been utilized in different sectors for critical structural parts due to their attractive properties like lower weight and higher strength & stiffness, better corrosion & wear resistance, and long fatigue life. On the other hand, fatigue is the most common cause of the structural collapse. Fatigue is a sudden failure of components below the maximum strength of the material when subjected to repeated loading. This thesis examines the influence of saltwater conditions on the tensile, flexural, and three-point bending fatigue properties of basalt, carbon, and glass fibers/epoxy hybrid composites. Five different composite plates: namely, Basalt/Epoxy (BE), Carbon/Epoxy (CE), Glass/Epoxy (GE), Basalt-Glass/Epoxy (BGE), and Basalt-Carbon-Glass/Epoxy (BCGE), were manufactured using Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM). The PST 650 jigsaw cutter was used to prepare the specimens as per ASTM D3039 and ASTM D7264 standards, and then it was immersed in a saltwater solution for 60 days, 120 days, and 180 days before the tests. The tests were performed using an Instron 8801 UTM with a 100 KN capacity, and the repeatability of the experiment was observed by testing three samples from each category. Moreover, a special fixture is designed and manufactured to conduct the static and fatigue three-point bending test. The weight-gain curve, stress-strain diagram, the S-N curve, and stiffness degradation curves were plotted. Moreover, the effects of hybridization and saltwater conditions on the tensile, flexural, fatigue life, and bending stiffness loss were discussed. The result shows that all composite samples' tensile and flexural properties degrade as the conditioning period increases. For example, the tensile strength of BE composites degraded by 21.11%, while CE composites only decreased by 9.09%. In the same way, the maximum and minimum loss of tensile modulus is observed in BE (17.12%) and BCGE (8.68%) hybrid composites, respectively. The highest flexural strength and modulus loss are in BE (45.59%) and BCGE hybrid composites (11.18%), respectively. However, the tensile strength of the unconditioned BGE hybrid composites shows improvement over the GE, thanks to the involvement of basalt fiber. The fatigue test results reveal that bending fatigue properties of all composite samples show a degradation as the conditioning period on saltwater solution increases.

Keywords: Basalt Fiber, Bending Fatigue, Carbon Fiber, Glass Fiber, Hybrid Composites, Mechanical Tests, Saltwater Effect, Three-Point Flexure

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamda bana her türlü bilimsel katkı ve desteği veren, çalışmalarım konusunda beni teşvik ve motive eden danışmanım Doç. Dr. Gürol Önal'a değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Tez çalışmam süresince öneri ve tavsiyeleriyle tezime katkı sağlayan Tez İzleme Komitesi Üyesi hocalarım Prof. Dr. Mesut Uyaner ve Prof. Dr. Behçet Dağhan'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimde kompozit malzemelerin üretiminden, deneysel çalışmaların yürütülmesine kadar bana her aşamada yardımcı olan, tezimin tamamlanmasında her türlü katkı ve desteği sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Okan DEMİR ve çalışmalarımda fikir, öneri ve tecrübelerini paylaşan hocam Dr. Öğr. Üyesi Emine Feyza ŞÜKÜR'e sonsuz teşekkür eder, minnetlerimi sunarım.

Laboratuvarımızda bir eğilme fikstürü üretilmesinde aralıksız yardımlarından dolayı Araş. Gör. Mevlüt Aydın ve Araş. Gör. Yusuf Furkan Yapan'a özel teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Makine Mühendisliği Bölümü'nün tüm üyelerine ayrı ayrı teşekkür ederim. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında yardım ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Araştırma Görevlisi Ahmet Caner Taner ve Taner Coşkun'a da teşekkür ederim. Ayrıca optik mikroskoplarını kullandırdıkları için bana destek olan hocam Dr. Öğr. Üyesi M. Turan DEMİRCİ (Selçuk Üniversitesi) ve KTÜN Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne teşekkür ederim.

Bu tezi tamamlamak için bana maddi destek sağlayan Türkiye Bursları (YTB), Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP-KTUN), Adama Bilim ve Teknoloji Üniversitesi ve Etiyopya Bilim ve Yüksek Eğitim Bakanlığı'na teşekkür ederim.

Son olarak, bu çalışmada ve genel olarak hayatım boyunca beni her türlü sonsuz olarak destekleyen kıymetli babama, anneme, eşime, kızlarıma, kardeşlerime ve arkadaşlarıma teşekkür etmek istiyorum. Doktora çalışmam boyunca verdiği muazzam destek ve teşvik için eşim Seada Tarakegn'e özel teşekkürlerimi sunarım. Son birkaç yıldaki muazzam anlayışları ve teşvikleri olmasaydı, çalışmamı tamamlamam zor olurdu.

Esmael Adem ESLEMAN

KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
SİMGELER	xii
KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Kompozit Malzemeler.....	5
2.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması	5
2.3. Kompozit Laminat	6
2.4. Kompozit Malzeme Üretimi	7
2.4.1. El yatırması üretimi.....	7
2.4.2. Vakumlu torbalama.....	8
2.5. Hibrit Kompozitler.....	8
2.6. Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özellikleri	11
2.6.1. Bazalt/epoksi kompozitler	11
2.6.2. Mekanik özellikler üzerinde hibritleme sırası ve hibrit etkisi	12
2.6.3. Korozif ortamın mekanik özellikler üzerindeki etkisi	17
2.7. Yorulma Genel Bakış, Terminolojiler ve Test Parametreleri	19
2.8. Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Yorulma Özellikleri	23
2.9. Özet ve Literatürdeki Araştırma Boşlukları.....	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3.1. Kullanılan Materyaller	32
3.1.1. Takviye elyafları	32
3.1.2. Kullanılan laminasyon reçinesi ve sertleştiricisi.....	33
3.1.3. Kompozit numunelerin üretilmesi	34
3.1.4. Kompozit numunelerin kesilmesi	39
3.1.5. Kompozit numunelerin tuzlu suda şartlandırılması	40
3.2. Test Kurulumu	41
3.2.1. Çekme test koşulları.....	42
3.2.2. Eğilme test koşulları	43
3.2.3. Eğilme yorulma test koşulları	45
3.2.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	47
3.2.5. Endüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektroskopisi (ICP-OES) analizi	
48	
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	50

4.1. Tuzlu Suyu Şartlandırmasından Sonra Numunelerin Ağırlığı.....	50
4.2. Endüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES) Analizi .	51
4.3. Çekme Testi Sonuçları	53
4.3.1. Elyaf türlerinin çekme özelliklerine etkisi	53
4.3.2. Deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması.....	55
4.3.3. Tuzlu suyu ortam BE kompozitlerinin çekme özelliklerine etkileri	57
4.3.4. Tuzlu su koşullarının CE kompozitlerinin çekme özelliklerine etkileri	58
4.3.5. Tuzlu su koşullarının GE kompozitlerin çekme özelliklerine etkileri	60
4.3.6. Tuzlu su koşullarının BGE ve BCGE hibrit kompozitlerin çekme.....	61
özelliklerine etkileri	61
4.3.7. Çekme hasarları	65
4.4. Kompozit numunelerin Üç noktalı Statik Eğilme Testleri.....	67
4.4.1. Elyaf tiplerinin eğilme özelliklerine etkisi.....	67
4.4.2. Şartlandırılmamış eğilme numunelerinin hasar modları.....	68
4.4.3. BE kompozitlerin eğilme özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri	73
4.4.4. CE kompozitlerin eğilme özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri	74
4.4.5. GE kompozitlerin eğilme özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri	75
4.4.6. BGE ve BCGE hibrit kompozitlerin eğilme özellikleri üzerine tuzlu suyun	
etkileri	75
4.4.7. Eğilme numunelerinin hasarlı yüzeylerinin hasar modları ve morfolojik	
analizi	79
4.5. Hibrit ve Hibrit Olmayan Kompozitlerin Eğilme Yorulma Davranışı	82
4.5.1. Hibritleme eğilme yorulma davranışına etkisi	82
4.5.2. BE kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri.....	85
4.5.3. CE kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri.....	86
4.5.4. GE kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri.....	87
4.5.5. BGE ve BCGE hibrit kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine tuzlu suyun	
etkileri	88
4.5.6. Rijitlik (Stiffness) Kaybı.....	90
4.5.7. Eğme yorulma testi sonrası kompozit numunelerin kırılması	92
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	106
5.1. Sonuçlar	106
5.2. Öneriler	109
KAYNAKLAR	110
EKLER	120
EK-A1 VARTM Materials ve Dekupaj Testere	120
EK-A2 Eğilme Yorulma Fikstür Montaj Çizimleri	121

Şekil Listesi

Şekil 1.1. Kompozit yapılar için yapı taşı yaklaşımı (Daniel Adams, 2021)	1
Şekil 2.1. Takviye malzemesine göre kompozit malzeme sınıflandırılması	6
Şekil 2.2. Kompozit laminat yapılar (Koricho ve ark., 2015)	6
Şekil 2.3. El Yerleştirme Teknikleri (Gay, 2014).....	7
Şekil 2.4. Vakumlu torbalama işlemleri (Gay, 2014).....	8
Şekil 2.5. Çeşitli hibridizasyon yöntemlerinin şematik gösterimi (Zuo ve ark., 2021)....	8
Şekil 2.6. Hibridizasyon Teknikleri: hibrit elyafların formuna ve konfigürasyonuna dayalıdır.	9
Şekil 2.7. FRP hibrid kompozitlerin tipik Psödo-sünek davranışı (Zuo ve ark., 2021) .	10
Şekil 2.8. Yorulma Yükleme Tipleri: a) CA ve b) VA (Vassilopoulos, 2010)	20
Şekil 2.9. CA Yükleme Formları (Vassilopoulos, 2010)	21
Şekil 2.10. Hasar Modelleri ile Tipik FRPC'nin S-N eğrisinin Şematik Diyagramı (Zhao ve ark., 2016)	22
Şekil 2.11. FRP Kompozitlerin Rijitlik Bozulma Eğrisi (Vassilopoulos, 2010).....	23
Şekil 3.1. Elyaf Çeşitleri (a) Bazalt Elyaf (b) Karbon Elyaf ve (c) Cam Elyaf.....	32
Şekil 3.2. VARTM Şematik Diyagramı	34
Şekil 3.3. a) Kompozit Numunenin hibritleme Sırası b) Laminasyon Reçinesi L160 ve Sertleştirici H160'ın Mekanik Karıştırıcı ile Karıştırılması.....	35
Şekil 3.4. Laboratuvardaki kompozit üretim (VARTM) ünitesi	36
Şekil 3.5. Kompozit Numuneler, 50 mL %70 nitrik asit içeren bir behere yerleştirildi.	37
Şekil 3.6. Yıkamadan Önce Nitrik Asitle Sindirilmiş Kompozitler İçeren Beherler	38
Şekil 3.7. Hacim İçeriklerinin Hesaplanmasında Kullanılan Yıkanmış Numunelerin ve Kurutulmuş Liflerin Kurutulmasında Kullanılan Fırın.....	38
Şekil 3.8. Hazırlanan Numunelerin Kısmi Görünümü (a) BE (b) CE (c) GE (d) BGE (e) BCGE.....	40
Şekil 3.9. a) Kristal Deniz Tuzu ve b) Tuzlu suya batırılmış numuneleri içeren kavanozlar	40
Şekil 3.10. Çekme numunesinin geometrisi ve Instron 8801 Üniversal Test Cihazı	42
Şekil 3.11. Özel üç noktalı eğilme aparatı: a) Tasarım, b) İmalat.....	44
Şekil 3.12. Üç Noktada Eğilme Yorulma Testi Kurulumları	45
Şekil 3.13. Tam Tersine Yorulma Yükleme için Temsili Yükleme Süresi Grafiği.....	46
Şekil 3.14. SEM 'in Şematik Diyagramı.....	47
Şekil 3.15. Çalışmada kullanılan SEM (İLTEK Selçuk Üniversitesi)	48
Şekil 3.16. Atomic Absorpsiyon, Endüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma Optik Emisyon	49
Şekil 4.1. Kompozit numunelerinin kütle kazancı yüzdesi	50
Şekil 4.2. Şartlandırılmış kompozit numunenin SEM görüntüsü, fiber yüzeyinde 'pitting' (mikro delikler) gösterir.....	52
Şekil 4.3. Normal/şartlandırılmamış Numunelerin Gerilme-BŞD Diyagramı	54
Şekil 4.4. Kompozit numunelerini çekme kırılma modları: (a) BE, (b) CE, (c) GE, (d) BGE ve (e) BCGE.....	57
Şekil 4.5. Tuzlu Su Koşullarının BE Kompozitlerinin Çekme Özelliklerine Etkisi	58
Şekil 4.6. Tuzlu Su Koşullarının CE Kompozitlerinin Çekme Özelliklerine Etkileri....	59
Şekil 4.7. Tuzlu Su Koşullarının GE Kompozitlerinin Çekme Özelliklerine Etkileri ...	60
Şekil 4.8. Tuzlu Su Koşullarının (a) BGE ve (b) BCGE Hibrit Kompozitlerin Çekme Özelliklerine Etkileri.....	61
Şekil 4.9. Tüm Kompozitlerin Çekme Bozulmasını Gösteren Bir Çubuk Grafik: a) Çekme Mukavemeti, b) Elastisite Modül ve c) Yüzde Uzama.....	64

Şekil 4.10. Kompozitlerin Çekme Hasarı Modları: a) BE, b) GE, c) CE, d) BCGE, ve e) BGE	66
Şekil 4.11. Üç Noktalı Statik Eğilme Test Sonuçları	67
Şekil 4.12. BE numunenin eğilme yüklemesi altında hasar modları (a) optik mikroskop görüntüsü, (b-c) yüksek büyütme SEM görüntüleri	69
Şekil 4.13. CE numunenin eğilme yüklemesi altında hasar modları (a) optik mikroskop görüntüsü, (b-c) yüksek büyütme SEM görüntüleri	70
Şekil 4.14. GE numunenin eğilme yüklemesi altında hasar modları (a) optik mikroskop görüntüsü, (b-c) yüksek büyütme SEM görüntüleri	71
Şekil 4.15. Eğilme yüklemesi altında BGE ve BCGE numunelerinin hasar modları (a) BGE'nin optik mikroskop görüntüsü, (b-c) BGE'nin yüksek büyütme SEM görüntüleri, (d) BCGE'nin optik mikroskop görüntüsü ve (e-f) BCGE'nin yüksek büyütme SEM görüntüleri.....	72
Şekil 4.16. BE Kompozitinin Eğilme Gerilme-Eğilme BŞD Diyagramı	73
Şekil 4.17. CE Kompozitinin Eğilme Gerilme-Eğilme BŞD Diyagramı	74
Şekil 4.18. GE Kompozitinin Eğilme Gerilme-Eğilme BŞD Diyagramı	75
Şekil 4.19. Eğilme Gerilme-Eğilme BŞD Diyagramı (a) BGE and (b) BCGE Kompoziti	76
Şekil 4.20. Çubuk Grafik (a) Eğilme Mukavemeti, (b) Eğilme Modülü ve (c) Eğilme Yüzde Uzama.....	78
Şekil 4.21. Eğilme Kırılma Modları ve Morfolojik Görüntüler (a) şartlandırılmamış BE, (b) iki aylık şartlandırılmış BE, (c) dört aylık şartlandırılmış BE, (d) altı aylık şartlandırılmış BE, (e) şartlandırılmamış CE, (f) iki- aylık şartlandırılmış CE, (g) dört aylık şartlandırılmış CE, (d) altı aylık şartlandırılmış CE numune	80
Şekil 4.22. Eğilme Kırılma Modları ve Morfolojik Görüntüler (a) şartlandırılmamış GE, (b) iki aylık şartlandırılmış GE, (c) dört aylık şartlandırılmış GE, (d) altı aylık şartlandırılmış GE, (e) şartlandırılmamış BGE, (f) iki- aylık şartlandırılmış BGE, (g) dört aylık şartlandırılmış BGE, (d) altı aylık şartlandırılmış BGE numune	81
Şekil 4.23. Eğilme Kırılma Modları ve Morfolojik Görüntüler (a) şartlandırılmamış BCGE, (b) iki aylık şartlandırılmış BCGE, (c) dört aylık şartlandırılmış BCGE, (d) altı aylık şartlandırılmış BCGE.....	82
Şekil 4.24. Normal/Şartlandırılmamış kompozitlerinin S-N diyagramı.....	84
Şekil 4.25. Tuzlu Su Ortamında BE Kompozitlerinin S-N Eğrisi.....	85
Şekil 4.26. Tuzlu Su Ortamında CE Kompozitlerinin S-N Eğrisi.....	86
Şekil 4.27. Tuzlu Su Ortamında GE Kompozitlerinin S-N Eğrisi.....	87
Şekil 4.28. Tuzlu Su Ortamında Hibrit Kompozitlerin S-N Eğrisi: a) BGE, and b) BCGE.....	89
Şekil 4.29. %50 BŞD Seviyesinde Tüm Kompozitlerin Rijitlik Kaybı: a) BE, b) CE, c) BCGE,.....	91
Şekil 4.30. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış BE Kompozitin SEM görüntüleri.....	93
Şekil 4.31. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış BE Kompozitin SEM görüntüleri.....	95
Şekil 4.32. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış CE Kompozitin SEM görüntüleri.....	96
Şekil 4.33. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış CE Kompozitin SEM görüntüleri.....	97
Şekil 4.34. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış GE Kompozitin SEM görüntüleri.....	98

Şekil 4.35. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış GE Kompozitlerin SEM görüntüleri (a) İki aylık (b) Dört aylık (c) Altı aylık	100
Şekil 4.36. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış BGE Kompozitin SEM görüntüleri.....	101
Şekil 4.37. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış BGE Kompozitin SEM görüntüleri.....	102
Şekil 4.38. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış BCGE Kompozitin SEM görüntüleri.....	103
Şekil 4.39. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış BCGE Kompozitin SEM görüntüleri.....	105

Çizelge Listesi

Çizelge 3.1. Kumaşların özellikleri	33
Çizelge 3.2. Laminasyon Epoksi L 160 ve Sertleştirici 160'ın Özellikleri.....	34
Çizelge 3.3. Test Numunesinin Boyutu ve Miktarı	39
Çizelge 3.4. Kompozit Numunenin Ağırlık Kazanımı	41
Çizelge 4.1. ICP-OES analizi sonuçlar.....	51
Çizelge 4.2. Hibrit Kompozitlerin Çekme Testi Sonuçları	55
Çizelge 4.3. Deneysel ve ROM Tahmini Çekme Modülü.....	56
Çizelge 4.4. Tuzlu Su Çözeltisi Altında Çekme Özelliklerinin Yüzde Bozulması	65
Çizelge 4.5. Kompozitlerin Üç Noktalı Statik Eğilme Testi Sonuçları.....	68
Çizelge 4.6. Tüm kompozitlerin Eğilme Özelliklerinin Azalması sonuçları	79
Çizelge 4.7. Kompozit numunelerin yorulma parametreleri	85
Çizelge 4.8. Tüm Kompozitlerin Yorulma Parametreleri	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

E_0 – Başlangıç aşaması/hasarsız malzeme için elastisite modülü, GPa

E_f^{chord} – Eğilme elastisite modülü, GPa

F^{ut} – Maksimum çekme mukavemeti, MPa

M_0 – Numunenin yaşlandırma öncesinde başlangıçtaki kütlesi, gm

M_1 – Numunenin t yaşlandırma zamanındaki kütlesi, gm

M_g – Kütle kazanç yüzdesi, %

M_{sf} – Sindirimden sonra numunenin son kütlesi, gm

M_{si} – Numunenin ilk kütlesi, gm

P^{max} – Hasartan önceki maksimum kuvvet, N

V_c – Kompozit hacmi, %

V_f – Yüzde olarak fiber hacim oranı, %

V_m – Matris hacmi (reçin), %

V_r – Fiber hacmi, %

ρ_f – Fiberin yoğunluğu, gm/cm³

ρ_s – Numunenin deneysel yoğunluğu, gm/cm³

$\Delta\sigma$ – Seçilmiş iki gerilme noktası arasındaki fark, MPa

$\Delta\varepsilon$ – Seçilmiş iki şekil değiştirme miktarı arasındaki farkı, mm/mm

A – Wohler Modeli statik parametresi

b – Numunenin genişliği, mm

B – Wohler Modeli yorulma parametresi

D – Bozulma veya hasar ölçüsü,

E – Malzemenin elastisite modülü, GPa

E – N noktasında malzemenin elastisite modülü, GPa

f – Frekans, Hz, veya saniyedeki devir sayısı

h – Numunenin kalınlığı, mm

L – Numunenin Uzunluğu/Açıklığı, mm

L_g – Ekstansometre göstergesi uzunluğu, mm

P_i – N'deki bir i'inci veri noktasındaki kuvvet, N

R – Minimum ve maksimum döngüsel gerilimin oranı olan gerilim oranı, $\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

ε_i – i. veri noktasında gerinim, mm/mm
 σ_a – Uygulanan Gerilme, MPa
 σ_i – i. veri noktasındaki gerilme, MPa
 σ_{\max} – Uygulanan maksimum gerilme, MPa
 σ_{mean} – Ortalama uygulanan gerilme, MPa
 σ_{\min} – Minimum uygulanan gerilme, MPa
 A – Ortalama kesit alanı, mm²
 P – Uygulanan kuvvet, N
 δ – Orta nokta sapması, mm
 ε – Dış yüzeyde maksimum gerilim, mm/mm
 σ – Orta açıklığın dış yüzeyindeki gerilme, MPa



KISALTMALAR

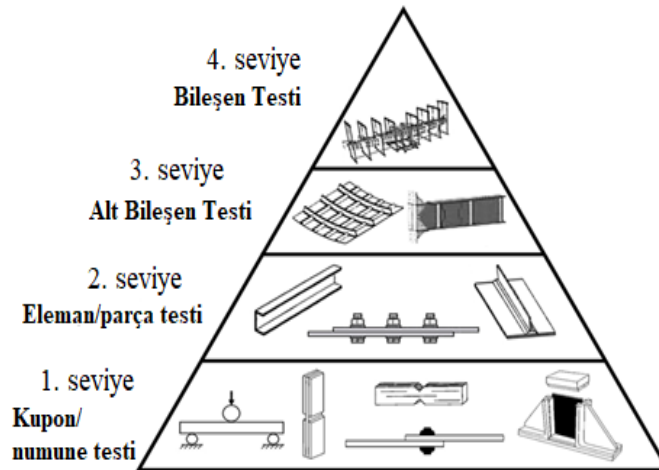
- 3D – Üç Boyutlu
3DOWC – Üç Boyutlu Dik Dokuma Kompozitler
ASM – Amerikan Metal Topluluğu
ASTM – Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BCGE – Bazalt Karbon Cam Hibrit Kompozitler
BE – Bazalt Epoksi Kompozitler
BFRP – Bazalt fiber takviyeli polimer
BGE – Bazalt Cam Epoksi Hibrit Kompozitler
CA – Sabit Genlik yüklemesi
C-C – Basma-Basma yüklemesi, $1 < R < +\infty$
CE – Karbon Epoksi Kompozitler
CFRP – Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
CLT – Klasik Laminat Teorisi
CMH – Kompozit Malzemeler El Kitabı
CNTs – Karbon nanotüpler
FE-SEM – Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu
FRP – Elyaf Takviyeli Plastik
FRPC – Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler
FTIR – Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi
GE – Cam Epoksi Kompozitler
GFRP – Cam Elyaf Takviyeli Polimer
GNPs/ GnPs – Grafen nanoplatelet
HCF – Yüksek Devirli Yorulma
HSF – Yüksek Mukavemeti Fiber
HM – Yüksek Modulu
ILSS – Laminerler Arası Kayma Dayanımı
KTUN – Konya Teknik Üniversitesi
LCF – Düşük Devirli Yorulma
LSF – Düşük Mukavemeti Fiber
N – Yorulma Çevrim sayısı
NIST– Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
PBO – Poliparafenilenl Benzobisoksazol

PMCs – Polimer Matris Kompozitler
PP – Polipropilen
PPCN – Polipropilen kil nanokompozitler
PPCN-B – Polipropilen Kil-Nano Bazalt kompozitler
ROM – Karışım Kuralı
RTM - Reçine Transfer Kalıplama
SEM - Taramalı Elektron Mikroskobu
SGO – Sülfonatlı grafen oksit
Si-MMT - Silanize-Montmorillonit
S-N– Gerilme ve Çevrim Sayısı (ömür) eğrileri
SWSSC - Simüle edilmiş deniz suyu ve deniz suyu deniz kumu betonu
T-C: Çekme-Basma Yüklemesi, $-\infty < R < 0$ ve özel olarak : $R = -1$
TEM - Transmisyon Elektron Mikroskobu
T-T: Çekme-Çekme Yüklemesi, $0 \leq R < 1$
UTM - Üniversal Test Makinesi
UTS – Maksimum Çekme Dayanımı
VA – Değişken Genlik yüklemesi: düzensiz, spektrum veya rastgele
VARTM – Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
XRD - X-ışını difraktometresi
 ε -N – Gerilim-Yorulma ömrü eğrisi

1. GİRİŞ

Araştırmacılar, malzeme hibritleme ve nano-parçacıkların eklenmesiyle özelliklerini bozmadan yapısal bileşenlerin ağırlığını ve maliyetini azaltmanın yollarını araştırıyorlar. Hibrit kompozit malzemeler havacılık, denizcilik, savunma, otomotiv, ulaşım ve inşaat mühendisliği yapılarında kullanılmaktadır. Avantajları arasında daha az ağırlık ile yüksek mukavemet, sertlik, aşınma ve korozyon direnci, çevre dostu olması ve uzun yorulma ömrü sayılabilir (Keller, 2001; Gay, 2014).

Bir yapısal ürünün tasarımı, Şekil 1.1.'de gösterildiği gibi, farklı seviyelerde bir dizi mekanik testten geçer (Barnes ve ark., 2010), Kompozit Malzemeler El Kitabı, CMH-17 V3, Bölüm 4'de "Yapı Taşı Yaklaşımı" olarak adlandırılan (Organization, 2012). Kupon/numune testi, eleman/parça testi, alt ürün testi ve bileşen testi, CHM-17 V3 el kitabındaki mekanik test kategorileri arasındadır. İlk tasarım aşaması olan kupon testi, uluslararası kabul edilmiş standartları kullanarak statik (çekme, kayma, basma ve eğilme) ve çevrimli yükleme (yorulma) gibi farklı yükleme koşulları altında kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan eleme testidir. Bu test, mekanik testi bileşen seviyesinde azaltmayı amaçlamaktadır.



Şekil 1.1. Kompozit yapılar için yapı taşı yaklaşımı (Daniel Adams, 2021)

Statik yükleme altında kompozitlerin özelliklerinin karakterizasyonu çeşitli çalışmalarla ele alınmış ve daha kapsamlı bir şekilde sunulmuştur (Carmisciano ve ark., 2011; Bozkurt, 2017; Bulut, 2017; El-Wazery, 2018; Chen ve ark., 2019; Chafiq ve ark., 2021). Bununla birlikte, çevrimsel yükleme altındaki kompozit malzemelerin özellikleri hakkında çok az çalışma vardır.

Ayrıca, çoğu yapısal hasarlar yorulma yoluyla meydana gelir (Halford, 2006). Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü tarafından yürütülen kapsamlı bir araştırmanın raporuna göre, incelenen 230 hasarın kabaca %60'ı yorulmadan kaynaklanmaktadır. Battelle Enstitüsünde test edilen başka bir çalışmada, yüzde oran 80 ile 90 arasında değişmektedir (Halfpenny, 2005).

Araştırmacılara göre, kompozit yapı elemanları veya yapılar için doğru yorulma ömrü tasarımı, çeşitli nedenlerle çok önemlidir (Halford, 2006; Vassilopoulos, 2010). Çelik, alüminyum veya betona alternatif olarak, önemli mühendislik yapıları için kompozitler kullanılmaktadır ve bunlar şu anda gelişmekte olan yapısal parçalarda potansiyel bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Örneğin bir beton köprü üzerindeki sabit yükler, hareketli yüklerden önemli ölçüde daha yüksektir ve bu nedenle köprü yorulmaya duyarlı değildir. Hafif bir kompozit köprü için ise yorulma bir zorluk haline gelir. Buna karşılık, uçaklar gibi operasyon boyunca büyük yorulma yükleri taşıyan yeni yapılarda birincil yapısal malzeme olarak kompozitlerin kullanılması, uygun yorulma ömrü modellerinin tasarımını gerektirir. Bu konuyu ele almak için araştırmacılar, her kompozit yapının yorulma duyarlılığı endişelerini ele alınması gereken çok önemli bir konu olarak kabul ettiler.

Deneme-yarılma metodu ile üretilen ürünlerin, önce prototiplerinin üretilerek gerçek dünya veya gerçek yükleme koşullarına uyarlanması gerekmektedir. Ancak bu prosedür pahalı ve zaman alıcıdır. Bir makine elemanı veya bir yapının yorulma özelliklerinin modellenmesi, para tasarrufu sağlar ve prototip sayısını artırmadan daha geniş bir ürün yelpazesinin oluşturulmasını sağlar. Ayrıca, kompozit yapıların dayanıklılığı kritik öneme sahiptir. Kompozitlerin dayanıklılığının yalnızca statik dayanım tasarımına dayalı olarak değerlendirilmesi ve çevrimsel yüklerin etkisinin ihmal edilmesi, yapının yorulma nedeniyle göçmesine neden olur. Dayanıklılık simülasyon prosedürlerinde yorulma ömrü tahmin metodolojilerinin kullanılması, bir ürünün dayanıklılık performansının erken değerlendirilmesini sağlar.

Genel olarak tek yönlü kompozit malzemeler gevrek ve yük altında doğrusal davranış sergiler. Hasarları aniden ve uyarı olmadan meydana gelir ve bu nedenle davranışlarını doğru bir şekilde modellemek ve yorulma ömürlerini tahmin etmek çok önemlidir. Ayrıca, bazalt fiber polimer kompozitler ve bunların hibritlerinin incelenmesi,

araştırmacılar için yeni bir konudur. Daha spesifik olarak, bazalt kompozitlerin yorulma özellikleri az sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Araştırma bilgisine göre, uzun süreli çevresel koşullar altında üç noktalı eğilme testleri kullanılarak bazalt fiber hibrit kompozitlerin yorulma davranışı üzerine bazı araştırmalar bulunmuştur. Bu nedenle tez konusu, korozif bir ortamda bazalt, karbon ve cam elyaflardan oluşan hibrit kompozitlerin yorulma özelliklerine ilişkin araştırma boşluğunu doldurmaya odaklanmaktadır.

Bu tezde, yorulma testlerinde numuneye uygun yerleştirilme ve desteklenmesi için üç noktalı fiķstür üretilmiştir. Bu çalışmada, hibritlemenin ve korozyonun (tuzlu suyu) mekanik özellikler üzerindeki etkileri hakkında ayrıntılı bir bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Tezin temel amacı, epoksi kompozitler ile güçlendirilmiş bazalt/karbon/cam elyafların ve hibritlerinin korozif bir ortamda yorulma davranışını ve mekanik özelliklerini araştırmak ve karakterize etmektir. Daha spesifik olarak, Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama yöntemi (VARTM) kullanılarak hibrit kompozit numunelerin üretimi; hibrit kompozitlerinin tuzlu suyu şartlandırmanın üzerindeki etkisini araştırmak; tuzlu suyu şartlandırılmış ve şartlandırılmamış hibrit kompozitlerin çekme ve statik üç noktalı eğilme testini gerçekleştirilmesi; şartlandırılmış ve şartlandırılmamış hibrit kompozitlerin üç noktalı eğilme yorulma testlerinin gerçekleştirilmesi, ve optik mikroskop ve SEM kullanarak testten sonra kırılma ve morfolojik analizi araştırılması amaçlanmıştır.

Bu tezin çıktısı, yapı bileşenleri üreten firmalar ve bu alanda daha fazla araştırma yapmak isteyen araştırmacılar için girdi olarak faydalıdır. şu anda, hibrit kompozitler, çeşitli endüstrilerde çelik, alüminyum veya beton gibi mevcut malzemeleri değiştirerek önemli mühendislik yapıları için kullanılmaktadır. Ayrıca, kompozitler, deniz yapıları, havacılık ve savunma bileşenleri, otomobil ve ulaşım sektörleri ve sivil yapılar için kullanılmaktadır.

Tez, beş bölüm olarak düzenlenmiştir. Birinci bölümde problemin tanıtımı yapılmıştır. Literatür taraması, hibrit kompozitler, çekme ve eğilme özellikleri ve kompozitlerin yorulması dahil olmak üzere tez ile ilgili önceki çalışmaların ayrıntılı bir değerlendirmesini içermektedir. Üçüncü bölüm, araştırma çalışmalarında kullanılan yöntem ve materyalleri içermektedir. Çekme, eğilme ve eğilme yorulma testi sonuçları dördüncü bölümde sunulmuştur. Ayrıca, sonuçların kapsamlı bir tartışması bu bölümde

yer almaktadır. Son bölüm, sonuçların özetini ve uygulama alanlarında gelecekte yapılacak çalışmaları ve öneriler içermektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, BE, CE, GE ve hibritleme ve hibritleme sırası, mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, çevresel koşulların bu kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak özetlenmiştir. Son olarak, bu kompozitlerin yorulma davranışı ve çevresel faktörlerin yorulma üzerindeki etkisi hakkındaki son araştırmaların kapsamlı bir incelemesi, araştırma boşluklarının bir listesi ve önceki çalışmaların bir özeti sunulmaktadır.

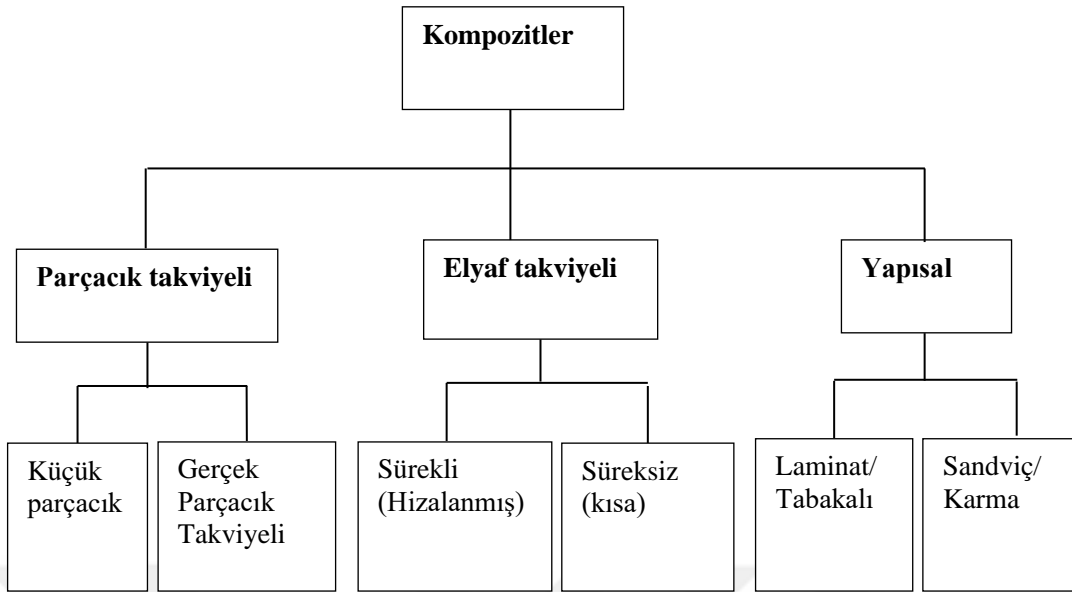
2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, 1960'lı yılların başlarından bu yana yapısal uygulamalar için yüksek performanslı malzemeler olarak gittikçe daha fazla kullanılmaya başlanmıştır (Carlsson ve ark., 2014; Koricho ve ark., 2015). ASM'e kitabı tarafından verilen kompozit malzemelerin resmi tanımı (Cramer ve ark., 2003) "aralarında tanımlanabilir bir arayüze sahip, iki veya daha fazla farklı malzemenin makroskopik kombinasyonu" dur. (Hazizan ve Cantwell, 2003; Cantor ve ark., 2008; Gay, 2014)'e göre, kompozit laminat, uygun biçimde karıştırılmış bir elyaf ve reçine kombinasyonudur. Takviye/elyaf, genellikle matris/reçineden çok daha güçlüdür ve kompozite iyi özelliklerini verir, mukavemeti matrise ve yük taşıma uygulamasına aktarır. Matris/reçine ise, takviyeyi takviye arasındaki bağlantıyı sağlayan yük aktarmak için kullanılan elemanlardır.

Havacılık, denizcilik, savunma, otomobil, ulaşım ve inşaat mühendisliği yapılarında kullanılan yapısal malzemeler arasında; kompozit malzemelerin kullanımı günümüz piyasasında dikkat çekicidir. Bu, yüksek ağırlık ve ağırlık / sertlik oranları, korozyon direnci, çevresel stabilite, aşınma direnci ve uzun yorulma ömrü gibi çekici özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Keller, 2001; Gay, 2014).

2.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması

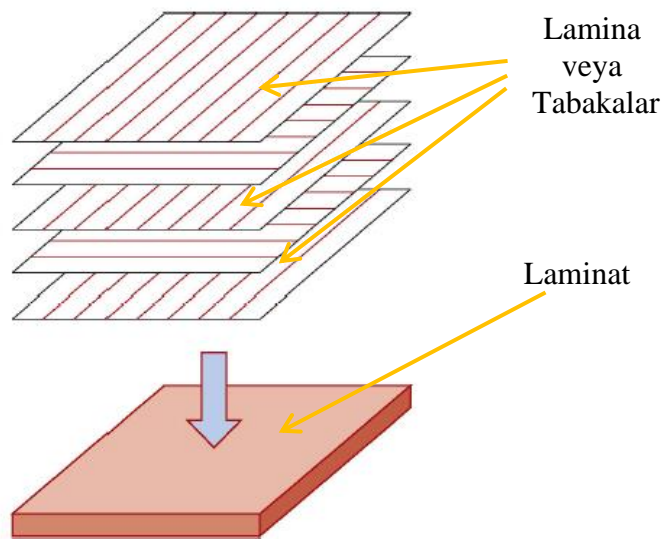
Araştırmacılara (Hazizan ve Cantwell, 2003; Cantor ve ark., 2008; Gay, 2014) göre, kompozit malzemeler, matris tipine, takviye malzemesine göre sınıflandırılmaktadır. Matris malzemesine göre, polimer, metal, seramik matris kompozit olarak sınıflandırabiliriz ve Şekil 2.1.'de gösterilen takviye ediciye göre sınıflandırmasıdır.



Şekil 2.1. Takviye malzemesine göre kompozit malzeme sınıflandırılması

2.3. Kompozit Laminat

Laminatlar, tabakaları belirtilen bir sırayla yerleştirilerek yapılır. Tabakaları çoğu zaman bir otoklavda hazırlanan “prepreg” (kısmen sertleşmiş reçine ile önceden emdirilmiş elyaf) şeklindedir. Bir laminat 4'ten fazla tabakaya sahip olabilir ve elyaf oryantasyonu tabakadan tabakaya, laminatın kalınlığı boyunca düzenli bir şekilde değişir. Şekil 2.2.'de, laminatın tabaka veya laminadan nasıl oluştuğunu göstermektedir (Hazizan ve Cantwell, 2003; Gay, 2014).



Şekil 2.2. Kompozit laminat yapılar (Koricho ve ark., 2015)

2.4. Kompozit Malzeme Üretimi

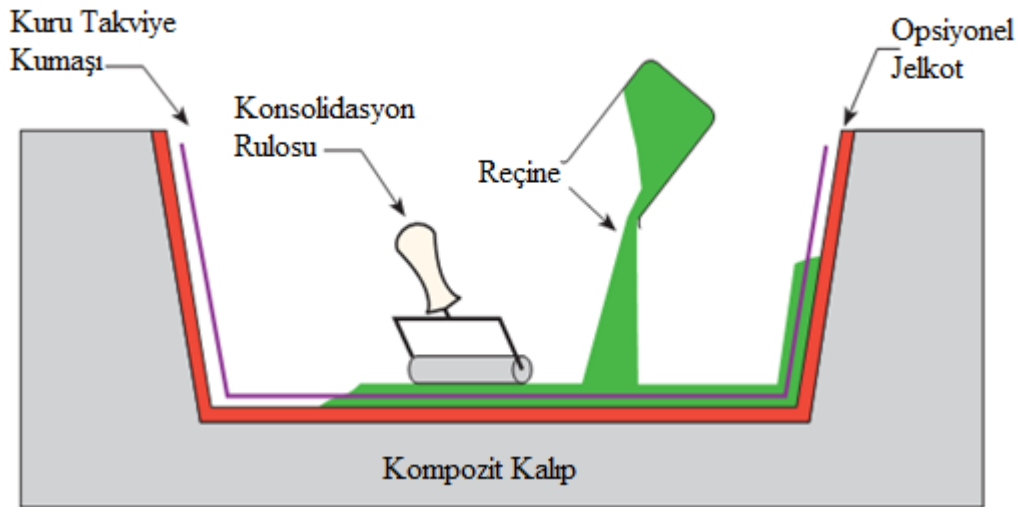
Kompozit malzemeler için iki tür üretim yöntemi vardır: Kürleme ve yerleştirme işlemi (Hazizan ve Cantwell, 2003; Gay, 2014). Fiberleri çeşitli şekillerde serme yöntemleri vardır: elle yatırma/elle tabakalama, spreyle yatırma, filament sarma. Vakum Torbalama, Reçine Transfer Kalıplama (RTM), Otoklav, Pultrüzyon, Kürleme işlemi altında gruplandırılır. Bu üretim proseslerinin seçimi aşağıdaki gibi birçok faktöre bağlıdır:

- ◆ Parça boyutu ve şekli,
- ◆ Maliyet,
- ◆ Zaman,
- ◆ Belirli tekniklere aşinalık, vb.

Burada El yatırma ve Vakum Torbalama teknikleri aşağıdaki alt bölümlerde detaylı olarak tartışılmıştır.

2.4.1. El yatırması üretimi

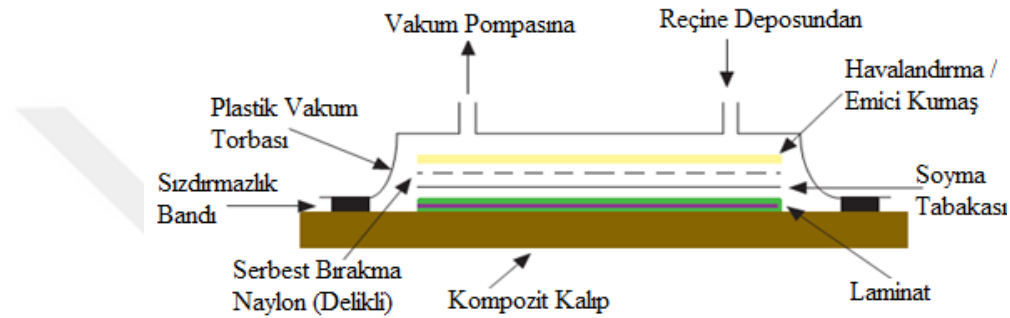
Reçineler, dokuma, örme, dikişli veya bağlı kumaş şeklindeki liflere elle emprenye edilir. Reçineler rulo veya fırça yardımı ile konsolide edilebilir. Döner silindirler ve bir reçine banyosu vasıtasıyla reçineyi kumaşlara zorlamak için silindir tipi emprenye ediciler kullanılabilir. Laminatlar standart atmosfer koşullarında kürlenmeye bırakılır. Şekil 2.3 tipik el yatırma üretimi göstermektedir. (Gay, 2014).



Şekil 2.3. El Yerleştirme Teknikleri (Gay, 2014)

2.4.2. Vakumlu torbalama

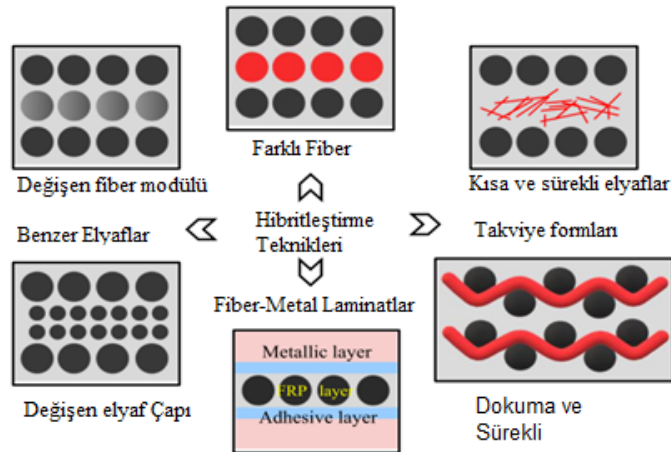
Bu yöntem, laminatın konsolidasyonunu iyileştirmek için yerleştirildikten sonra laminata basınç uygulandığı, yukarıda açıklanan el yatırma işleminin bir uzantısıdır (Şekil 2.4.). Bu, el yatırılmış laminatın üzerine ve aletin üzerine plastik bir filmin yapıştırılmasıyla elde edilir. Torbanın altındaki hava, laminat konsolidasyonu için bir atmosfere kadar basınç kapasitesine sahip olması gereken bir vakum pompası tarafından çıkarılır (Gay, 2014).



Şekil 2.4. Vakumlu torbalama işlemleri (Gay, 2014)

2.5. Hibrit Kompozitler

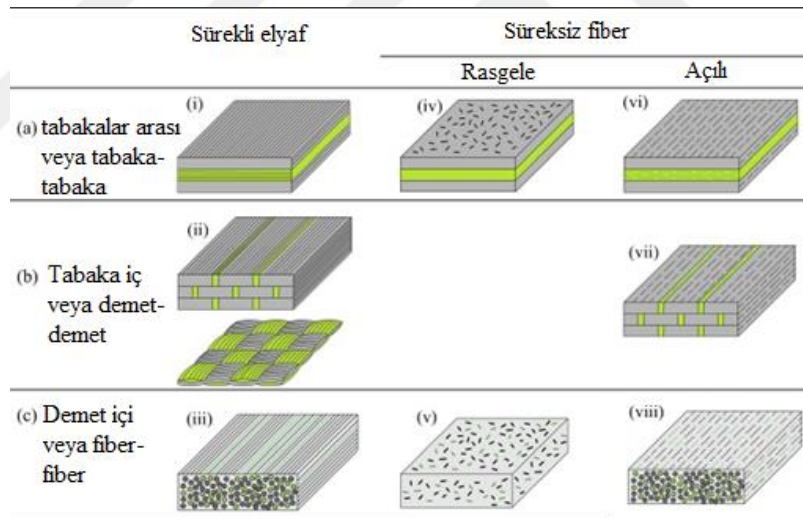
Hibrit kompozitler, benzer bir matrisle takviye edilmiş iki veya daha fazla farklı veya aynı fiberden oluşan kompozit türleridir. Hibridizasyon, polimer kompozitlerin özelliklerini değiştirmek ve üretimlerinde kullanılan bileşen malzemelerden yararlanmak için kullanılır (Swolfs ve ark., 2014; Thakur ve ark., 2017; Zuo ve ark., 2021). Fiber malzemesine, takviye tipine ve yerleşimine göre farklı hibridizasyon konfigürasyonları ve türleri vardır (Şekil 2.5.) (Zuo ve ark., 2021).



Şekil 2.5. Çeşitli hibridizasyon yöntemlerinin şematik gösterimi (Zuo ve ark., 2021)

Oluşturan malzemelere bağlı olarak, hibrit kompozitler Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi, tabakalar arası veya tabaka-tabaka, tabaka iç veya demet-demet ve demet içi veya fiber-fiber olarak sınıflandırılabilir (Swolfs ve ark., 2014; Yu ve ark., 2015; Zuo ve ark., 2021). Katman katman, Şekil 2.6. (a)'da gösterildiği gibi, bir fiber laminanın belirli bir istifleme sırasında diğerine katmanlandığı en basit hibrit düzenlemedir. Bununla birlikte, zayıf ara yüzey bağı feci bir hasara yol açtığından, çeşitli elyaf tabakaları arasındaki ara yüzey bağı, delaminasyon stabilizasyonu için son derece önemlidir. Şekil 2.6. (b)'de gösterilen ikinci düzenleme, iki elyafın ipliklerinin tek bir katman/kat halinde birlikte dokunduğu iç katmandır.

Diğer hibritleştirme türleri ile karşılaştırıldığında, hibrit kumaşlar kendi içinde daha iyi bir kombinasyon oluşturur; ancak gelişmiş dokuma yöntemleri gerektirir. Şekil 2.6. (c)'de gösterilen en karmaşık düzenleme olan üçüncü hibrit konfigürasyon türü, ara katman ve katman içi düzenlemeleri birleştiren iplik içidir (Zuo ve ark., 2021).

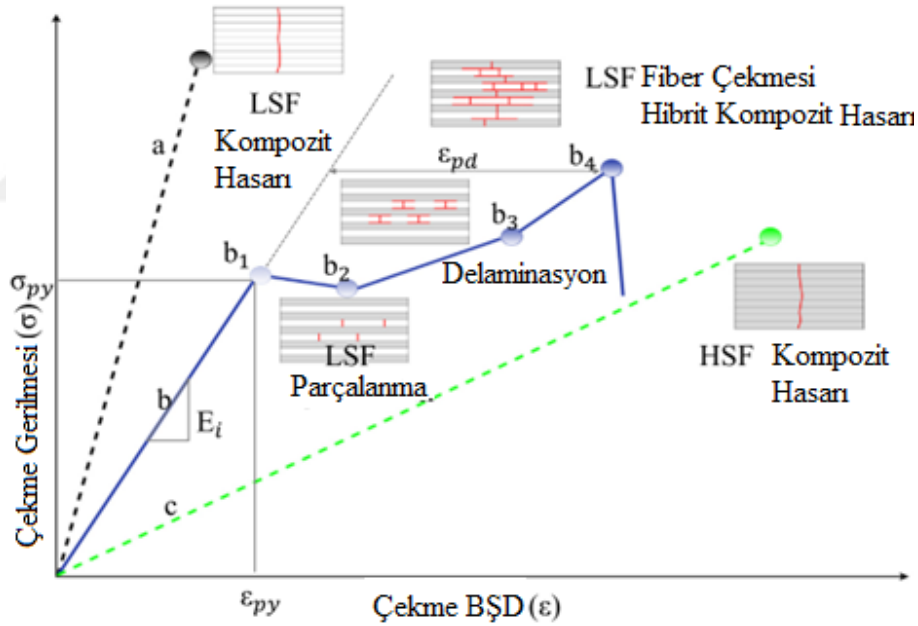


Şekil 2.6. Hibridizasyon Teknikleri: hibrit elyafların formuna ve konfigürasyonuna dayalıdır. (Swolfs ve ark., 2014; Yu ve ark., 2015; Zuo ve ark., 2021)

Genel olarak hibridizasyon, daha yüksek modüllü ve karbon fiber gibi daha pahalı fiberler ve daha küçük elastisite modüllü ve cam, kevlar, doğal fiber ve bazalt gibi daha ucuz fiberler ile yapılır (Demirci, 2017). Tek tip yüksek performanslı fiber ile takviye edilmiş tipik kompozitlere kıyasla, birçok yüksek performanslı fiber tipine sahip hibrit kompozitler üstün mekanik özellikler gösterir (Fan ve ark., 2019).

Aşağıdaki bölümlerde, çekme, eğilme ve çevrimsel yükleme (yorulma) uygulanan hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin kapsamlı bir incelemesi sunulmaktadır. Daha spesifik olarak, aşağıdaki konularda kapsamlı inceleme bazalt, karbon ve cam elyafı hibrit kompozitlerin özelliklerini vurgular. Hibrit kompozitlerin psödo-süneklik (pseudo-ductility) davranışı, onları araştırmayı özellikle ilginç kılan diğer bir özelliktir.

Hibrit olmayan kompozitlerde tipik olarak gözlemlenen yıkıcı hasarın aksine, psödo-süneklik (pseudo-ductility) kademeli bir bozulma ile sonuçlanır. Psödo-süneklik (pseudo-ductility) elde etmek için, hibrit, uygun oranda düşük ve yüksek birim şekil değiştirmeli fiberlerle tasarlanmalıdır. Psödo süneklik davranışı Şekil 2.7.'de gösterilmektedir. Hibrit kompozitler psödo süneklik gösterse de, LSF parçalanmasını takiben yükte önemli bir azalma gözlemlenebilir (Fuller ve Wisnom, 2015; Zuo ve ark., 2021).



Şekil 2.7. FRP hibrit kompozitlerin tipik Psödo-sünek davranışı (Zuo ve ark., 2021)

Bu, değişen çaplara veya modüllere sahip benzer liflerden oluşan ince katlı hibrit kompozitler kullanılarak çözülebilir, bu da hibrit kompozitlerde yüksek modüllü (HM) liflerin daha kararlı parçalanması ve delaminasyonu ile sonuçlanır. Sonuç olarak, gerilme-şekil değiştirme eğrisi doruğa ulaşır, ardından psödo akma gerilmesinde bir artış (metallerde olduğu gibi) ve son bozulmadan önce gerilmede daha fazla artış olur (Fuller ve Wisnom, 2015; Zuo ve ark., 2021).

2.6. Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Son yıllarda, hibritleme, istifleme sırası ve matrise nanoparçacık eklenmesi, kompozit alanındaki araştırmacıların ana odak noktası olmuştur. Birden fazla tipte yüksek performanslı fiber içeren hibrit kompozitlerde, tek tip fiberle takviye edilmiş geleneksel kompozitlere göre daha iyi mekanik özellikler gözlemlenmiştir (He ve ark., 2020). Bu araştırmanın sonucu diğer araştırma çalışmalarıyla da benzerlik göstermektedir (Subagia ve Kim, 2013; Sun ve ark., 2018; Chen ve ark., 2019; Fan ve ark., 2019; Ramakrishnan ve ark., 2019; Ricciardi ve ark., 2019; Papa ve ark., 2020; Darshan ve Suresha, 2021).

Ayrıca, Gupta tarafından yürütülen ayrıntılı inceleme, hibridizasyonun bir FRPC'nin mekanik davranışını geliştirebileceğini ortaya koymaktadır (Gupta ve Srivastava, 2016). Çalışmada, nispeten yüksek bir uzama ile entegre elyafların, doğal FRP kompozitlerinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Ayrıca, Swolfs ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, hibrit kompozitlerin daha iyi mekanik özellikler sağladığını ve tek fiberli kompozitlere göre tasarım özgürlüğü sunduğunu bildirmiştir (Swolfs ve ark., 2019).

2.6.1. Bazalt/epoksi kompozitler

Bazalt elyaf, volkanik kayalardan elde edilen doğal bir kumaştır. Donmuş lav 1500 ila 1700 santigrat derecede eridiğinde oluşur (Fiore ve ark., 2015). Bazalt, lav sertleştiğinde üretilen bir grup koyu volkanik kayayı ifade eder. Bazalt taşları çeşitli bileşimlerde bulunurken, teknik filamentlerin üretimi için sadece birkaçı kabul edilebilir. Kabaca %46 silikon dioksit (SiO_2) içeriğine sahip asit bazaltlar özellikle elyaf üretimi için çok uygundur (Bunsell, 2018).

Bir araştırmacı tarafından yapılan araştırmaya göre (Bulut, 2017), bazalt elyaf, takviye uygulamaları için çevre dostu bir aday malzemedir. Daha ucuz olması ve cam elyaflardan daha yüksek mukavemet ve modül gibi üstün mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle normal cam elyaflarının yerine kullanılmıştır (Bulut, 2017; Lebedev ve ark., 2020; Liu ve ark., 2020).

Bazalt elyaflar, ortak bir kimyasal bileşene sahip olmalarına rağmen, cam elyaflar'a göre daha üstün özellikler gösterirler. Bazalt elyafı, daha iyi çekme, basma ve modül özelliklerine sahiptir. Ayrıca, kimyasal, termal stabilite, elektrik ve akustik izolasyon ile cam elyafından daha iyi performans gösterir. Ek olarak, yanıcı ve zararsızdırlar. Bazalt elyaflar bu üstün özelliklere sahipken kırılğan yapıları nedeniyle darbe özellikleri zayıftır (Dhand ve ark., 2015; Bulut, 2017; Khandelwal ve Rhee, 2020).

Önceki birkaç yılda, bazalt/epoksi kompozit laminatlar, yaygın olarak kullanılan karbon laminatlardan daha mükemmel termal direnç, korozyon direnci ve süneklik dahil olmak üzere benzersiz özellikleri nedeniyle, harici betonarme döşemeleri ve kiriş eğilme ve kesme kuvvetini güçlendirmek için yaygın olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, aşırı sıcaklık ortamda bu tür laminatların ve bunların hibritlerinin mekanik özelliklerine ilişkin bir bilgi boşluğu bulunmaktadır (Wu ve ark., 2015; Hawileh ve ark., 2016).

2.6.2. Mekanik özellikler üzerinde hibritleme sırası ve hibrit etkisi

Hibrit oranının hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri (çekme, eğilme, ILSS ve darbe) üzerindeki etkisi farklı araştırmacılar tarafından araştırılmıştır. Örneğin, cam/bazalt/epoksi kompozitlerin eğilme ve çekme özellikleri Fiore ve ark. (Fiore ve ark., 2011) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmanın uygulama alanı denizcilik endüstrileridir. Araştırmalarında, hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki hibridizasyonun etkisi, birincil odak noktalarını oluşturmuştur. Sonuçlar, iki dış bazalt tabakasının hibrit laminatların mekanik özelliklerini orijinal cam/epoksi laminatlara kıyasla arttırdığını ortaya koymuştur.

Kevlar/Bazalt/polipropilen kompozitlerin düzlem içi basma ve çekme mukavemeti karakterizasyonu üzerine başka bir çalışma Bandaru ve ark. (Bandaru ve ark., 2016) tarafından incelenmiştir. Çalışma, hibritleşmenin etkisini ana kriter olarak kabul etmektedir. Numuneler basma kalıplama ile üretilmiştir ve testlerin sonuçları, hibrit kompozitlerin, temel kompozitlerine kıyasla üstün çekme ve düzlem içi basma davranışı sergilediği önceki bir çalışmayı desteklemektedir.

Ayrıca, Bozkurt (Bozkurt, 2017), hibritleşmenin aramid/bazalt/epoksi hibrit kompozit laminatların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Sonuçlar, aramid elyaflarında bir takviye olarak bazalt elyaflarının dahil edilmesiyle çekme ve

eğilme özelliklerinin iyileştirildiğini göstermiştir. Öte yanda, eğilme testi sırasında, bazalt elyafı, kompozit laminatların kalınlığının çekme tarafına kıyasla basma tarafına yerleştirildiğinden, laminatların eğilme özellikleri önemli ölçüde iyileşir.

VARTM ile üretilen epoksi ile takviye edilmiş karbon ve bazalttan yapılan hibrit kompozitlerin eğilme özellikleri Subagia ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır (Subagia ve Kim, 2013). Elyafın hibritleme sırasının, laminatların eğilme mukavemeti ve modülü üzerinde önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur. Bu nedenle, hibrit kompozitlerin gelişmiş özelliklerini elde etmek için iyi bir hibritleme sırası gereklidir. Sun ve arkadaşları tarafından yapılan benzer bir araştırma, eğilme mukavemeti üzerinde bir şekilde pozitif bir hibrit etki bildirilmiş olmasına rağmen, çekme mukavemeti üzerinde önemli bir hibrit etkisinin keşfedilmediğini göstermektedir (Sun ve ark., 2018). Bazalt elyaflarını hibrit oranı arttığında hibrit kompozitin eğilme mukavemeti ve elastisite modülü düşmüştür. Bununla birlikte, hibrit oranı arttıkça eğilme özellikleri üzerinde önemsiz etkiler görülmüştür. Ayrıca, bazalt veya cam elyafın %50 hibrit oranıyla sandviç benzeri bir şekilde hibritlenmesi eğilme mukavemetini artırır ve karbon tabakalarının çekme ve basma taraflarına simetrik olarak yerleştirilmesi eğilme modülünü artırır.

Ricciardi ve arkadaşlarının (Ricciardi ve ark., 2019) gösterdiği gibi, keten/bazalt/epoksi hibrit kompozitlerin hibritleme sırası eğilme modülünü etkilemez. Buna karşılık, hibritleme sırası nedeniyle matris içeriği ile eğilme ve ILSS özellikleri iyileştirilir. Darbe davranışı hibrit oranından etkilenmiştir.

Papa ve arkadaşlarına (Papa ve ark., 2020) göre, hibritleme sırası karbon/cam/vinilsterin darbe ve eğilme davranışını önemli ölçüde etkiler. Eğilme testinin ardından, hibritleme sırasının eğilme modülünü etkilemezken eğilme mukavemetini ve hasar modunu etkilediği keşfedilmiştir. Yazarlar, gelecekteki çalışmaların artık basma mukavemeti deneylerine odaklanması ve hibritleme sırasının etkilerini ve hasar modları üzerindeki hibrit etkiyi araştırmasını önermektedir.

Ayrıca El-Wazery (El-Wazery, 2018), el yatırma yöntemini kullanarak üreterek bazalt, karbon ve cam kompozitlerin hibrit etkisini araştırmıştır. Daha iyi mekanik özellikler elde etmek için en iyi istifleme sırasının [C/B/C/B/C] olduğu bildirildi; bunun nedeni, bu konfigürasyonda elyaf ve matris arasındaki iyi arayüz bağlantısıdır.

3-D ortogonal dokuma kompozit (3DOWC), Gao ve ark. (Gao ve ark., 2019) tarafından yarı statik koşullar altında üç noktalı eğilme ve yorulma davranışı için test edilmiştir. Eğilme yorulma testi için birkaç gerilme seviyesi seçilmiş ve numunelerin S-N eğrileri, gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri, sertlik bozulma eğrileri ve artık mukavemet belirlenmiştir. Aynı gerilme seviyesinde, sonuçlar, numunelerin 90° yönünde kırılmaya kadar olan yorulma çevrim sayısının 0° yönündeki numunelerinkinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, eğilme mukavemetinin azalma hızının, sertlik ile ters orantılı olduğu gösterilmiştir.

Yapı kaplaması olarak alüminyum 2024-T6 ile takviye edilmiş jüt/bazalt/epoksinin çekme ve tabakalar arası kayma mukavemeti başka bir araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir (Zareei ve ark., 2019). Tek tek kompozitlerle karşılaştırıldığında, hibrit sandviç kompozitin ortaya koyduğu sonuçlar maksimum çekme mukavemeti, modülü ve ILSS'ye sahiptir. Ayrıca, jüt lifleri alüminyum katmanlara zayıf yapışma sergilerken, bazalt lifler mükemmel yapışma sergiler.

Hawileh ve arkadaşları (Hawileh ve ark., 2016) tarafından yürütülen araştırma, sıcaklığın karbon, bazalt ve bunların hibrit kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, sıcaklık belirli bir noktanın üzerine çıkarken karbon ve bazalt kompozitlerinin modülünde ve çekme mukavemetinde bir bozulma olduğunu ortaya çıkarmıştır. Öte yandan, karbon laminat durumunda önemli derecede bozulma gözlemlenmiştir.

Ayrıca hibrit kompozit yüksek sıcaklıklar ortamında, modülleri ve çekme mukavemetleri maksimum olmuştur. Yazarlar, yüksek sıcaklıklar ortamında hibrit laminatların performansını iyileştirmek için gelecekteki araştırma projelerinde çeşitli matris türlerinin araştırılmasını tavsiye etti. Ayrıca, gelecekteki bir araştırma projesinin parçası olarak, bu tür kompozitlerin ısıtma süresine karşı mekanik karakterizasyonu incelenmelidir.

Karbon/bazalt/keten/epoksi hibrit kompozitlerin çekme, eğilme ve ILSS ve darbe yükleme testleri Nisini (Nisini ve ark., 2017) tarafından yapılmıştır. Hibrit kompozite bazalt ve keten tabakalarının eklenmesi, kompozitin eğilme ve tabakalar arası kayma mukavemetini arttırmıştır. Ayrıca, bir çekirdek malzeme olarak keten elyafını dahil

edilmesi ve bunun bazalt elyafı ile karıştırılması, darbe hasarında önemli bir azalma ile sonuçlanmıştır. Darbe yüklemesi altındaki kırılma mekanizması, deneyde kullanılan çok sayıda hibritleme sırası ile değiştirilmiştir.

Enjeksiyon kalıplama ile üretilen cam ve bazalt hibrit kompozitlerle takviye edilmiş polipropilenin çekme, eğilme ve darbe özellikleri Yan (Yan ve ark., 2017) tarafından incelenmiştir. Eğilme ve çekme modülü, bazalt elyafın dahil edilmesiyle bir gelişme gösterir; ancak, darbe özellikleri değişir. Diğer araştırmacılar, mukavemet ve sertliklerini belirlemek için keten/bazalt/vinilester üzerinde çekme, eğilme ve darbe testleri gerçekleştirilmiş (Fragassa ve ark., 2018). Elde edilen sonuçlara göre, hibrit laminatlar, özellikle eğilme performansı olmak üzere karışım kuralının öngördüğü düzeyde performans göstermemiştir. Bu çalışmanın bulguları, bazalt/keten hibrit laminatların ancak en dıştaki katmanların bazalt liflerinden oluşması durumunda işlevsel olacağı fikriyle çelişmektedir. Malzemenin akma sırasındaki plastik özelliklerinden de anlaşılacağı gibi, bu kombinasyon bazaltın sertliğini ve kırılabilirliğini azaltır. Ayrıca, hibridizasyon, ağırlığını artırmadan keten kompozitin darbe performansını önemli ölçüde iyileştirir.

Polyesterle takviye edilmiş bazalt ve cam hibrit kompozit, (Patel ve ark., 2018) tarafından çekme, eğilme ve darbe yüklemesi ile test edilmiştir. Çalışmada hibrit etki ve hibritleme sırası analizi elde edilmiştir. Yazarlar, daha yüksek çekme özellikleri elde etmek için bazalt elyafın ortaya ve cam elyafın dış yüzeye yerleştirilmesini önermişlerdir. Ayrıca, “eğilme ve darbe özelliklerini artırmak için bazalt elyafı kompozitin dış ve iç yüzeylerine sırasıyla yerleştirilmelidir” demişlerdir.

Bazalt/muz/epoksi hibrit kompozitlerin çekme, eğilme, darbe ve sertliği çeşitli konfigürasyonlarda test edilmiştir. Hibridizasyon sonucunda hibrit kompozitlerin mono fiber kompozitlere göre daha iyi çekme ve eğilme dayanımları olması önemli bir avantajdır. Numunenin morfolojisi, elyaf kırılmasını ve elyaf çekilmesini ortaya çıkarır (Ramakrishnan ve ark., 2019).

Hibritleme sırası ve hibridizasyonun eğilme özellikleri ve maliyeti üzerindeki etkileri Chen (Chen ve ark., 2019) tarafından araştırılmıştır. Yazar, VARTM ile bazalt, karbon ve cam epoksi hibrit kompozit numuneler üreterek üç noktalı bir eğilme testi

gerçekleştirdi. Sonuç, bazalt liflerinin hibrit oranı, %0'dan %50'ye yükseldiğinde, hibrit laminatların eğilme mukavemeti ve modülünün düştüğünü; bununla birlikte, hibrit oranı %75'e yükseltildiğinden eğilme özellikleri üzerinde önemsiz etkiler rapor edilmiştir. Bu nedenle, yazarın tavsiyesine göre, hem çekme hem de basma taraflarına dengeli bir şekilde karbon tabakaları yerleştirilerek daha büyük eğilme modülü elde edilecektir; ve bazalt veya cam elyafın %50 hibrit oranıyla sandviç benzeri bir hibritleme sırasında yerleştirilmesiyle daha yüksek eğilme mukavemeti elde edilecektir.

Sandviç yapısı için bir kaplama olarak cam elyafın statik ve yorulma eğilme özellikleri üzerindeki etkisi Choleni (Cheloni ve ark., 2018) tarafından incelenmiştir. Yazar, sandviçte yüksek oranda cam ile statik eğilme mukavemetinde bir gelişme olmadığını, ancak eğilme modülünde yüzde 34,96'lık bir artış olduğunu bildirmiştir. Ek olarak, yorulma ömrü az miktarda cam ile iyileştirilmiştir.

Dipak K., deniz suyu ortamında karbon ve cam elyaf hibrit kompozitlerin mekanik davranışı üzerinde istifleme sırasının etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, hibrit kompozitler, GFRP ve CFRP'den daha az su emilimi göstermektedir. Ek olarak, yazarın raporu, [CG2CG]S hibritleme sırasıyla elle yatırma tekniklerinde üretilen bir hibrit numunenin şartlandırılmış ve şartlandırılmamış ortamında GFRP'den daha iyi çekme, eğilme ve darbe özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir (Jesthi ve Nayak, 2019).

Wolter ve arkadaşları, takviyenin bazalt, karbon ve cam takviyeli polibenzoksazin kompozitlerinin mekanik ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma, cam/polibenzoksazin ve bazalt/polibenzoksazin'in yanıcılık, duman ve toksisite özelliklerinin karbon/polibenzoksazin kompozitlerinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, karbon/polibenzoksazin kompozitinin çekme eğilmesi altındaki mekanik özellikleri olağanüstüdür (Wolter ve ark., 2020).

He ve arkadaşlarına (He ve ark., 2020) göre, karbon ve poliamid hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri tuzlu su ortamında incelenmiştir. Araştırmanın birincil odak noktası, hibrit etki ve hibritleme sırasının etkisidir. Hibrit kompozitin kayma, eğilme ve çekme özellikleri temel malzemelerden daha iyi performans gösterir.

Saleem ve arkadaşları, bazalt, cam ve karbon lifleri gibi doğal ve sentetik liflerden yapılmış hibrit kompozitlerin kapsamlı bir değerlendirmesini gerçekleştirdi (Saleem ve ark., 2020). Çalışmada hibrit kompozitlerin hibrit etkisi, üretim yöntemi ve uygulaması üzerinde durulmuştur. İnceleme, mekanik özelliklerdeki artışın ve su emme davranışındaki azalmanın, doğal elyafın yüksek mukavemetli sentetik elyafla hibritlenmesiyle elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışmaya göre ayrıca, mekanik özellik, kullanılan elyaf tabakasının hibritleme sırası ve tiplerinden büyük ölçüde etkilenir. Çevre dostu ve uzun ömürlü nitelikleri nedeniyle, karbon veya cam elyaf yerine doğal elyaf hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için bazalt elyaf kullanılabilir.

Hibrit oranı ve hibritleme sırasının keten, bazalt ve cam hibrit kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe özellikleri üzerindeki etkisi Abd Al-Baky ve arkadaşları (Abd El-Baky ve ark., 2020) tarafından incelenmiştir. Sonuç, hibrit kompozitin mekanik özelliklerde keten/epoksi kompozitlerden ve ağırlık ve maliyette cam/epoksi ve bazalt/epoksi kompozitlerden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

Bazalt/epoksi ve cam epoksi kompozitlerin yüksek gerilme oranı altında çekme özellikleri Elmahdy ve Patricia (Elmahdy ve Verleysen, 2021) tarafından incelenmiştir. Çalışmada, bazalt kompozitlerin darbe dayanımı gerektiren uygulamalar için potansiyel niteliklere sahip olduğu keşfedilmiştir. Chafiq ve ark. (Chafiq ve ark., 2021), geçmişte elle yatırma yöntemi kullanılarak yapılan bazalt, karbon ve cam elyaf hibrit kompozitlerin çekme özellikleri üzerindeki yüksek gerilme hızının etkisi üzerine benzer bir araştırma yürütmüştür. Sonuç olarak, bazalt elyaf nedeniyle hibrit kompozitlerin yüzde uzama oranı iyileştirildi. Ayrıca, BFRP'nin çekme özellikleri, diğer ikisine göre yüksek gerilme hızında bir gelişme gösterir. Bununla birlikte, bu çalışmada sadece bir hibritleme sırası kullanıldığından, BCGE kompozitinin çekme özelliklerinin daha yüksek bir gerilme hızında daha üstün olduğu sonucuna varmak imkansızdır.

2.6.3. Korozyon ortamının mekanik özellikler üzerindeki etkisi

Kompozit malzemelerin korozyon özellikleri, denizcilik endüstrisi gibi bazı uygulama alanlarında çok önemlidir. Bu bağlamda, gemi bileşenlerini değiştirmek için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır (Rege ve Lakkad, 1983; Kootsookos ve Mouritz, 2004;

Menail ve ark., 2009; Assarar ve ark., 2011; Fiore ve ark., 2015; Fricke, 2017; Rubino ve ark., 2020). Bunlar arasında, bazalt/epoksi ve cam/epoksi kompozitlerin çekme ve eğilmesi üzerindeki korozif ortamın (deniz suyu ortamı) etkisi Wei ve ark. (Wei ve ark., 2011) tarafından araştırılmıştır. Yazar, bu kompozit üzerindeki kütle kazancının, çözünür materyalin çekilmesi ve su absorpsiyonundan kaynaklandığını bildirmiştir. Her iki kompozit de şartlandırma süresi arttıkça çekme ve eğilme mukavemetinde bozulma göstermiştir. Ek olarak, bazalt/epoksi kompozitin korozyon direnci özelliği, cam/epoksi kompozit ile karşılaştırılabilir. Benzer şekilde, Zhaougyu Lu ve ark. (Lu ve ark., 2017), BFRP'nin siklik klorür iyonu çözeltisi üzerindeki uzun vadeli durumunu inceler. Sonuç, BFRP'nin gerilme modülünde bir gelişme ve çekme mukavemeti ve bsd'de bir azalma olduğunu göstermiştir.

Tuzlu su ve deniz suyunun GFRP'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Chakraverty ve ark. (Chakraverty ve ark., 2015) tarafından araştırılmıştır. Yazar, Ca⁺ penetrasyonu ve bunun epoksi ile etkileşimi nedeniyle mekanik özelliklerin azalmasına yol açan matris çatlağı ve elyaf kopması olduğunu sunmaktadır.

Tuzlu su ortamında keten ve bazalt elyafların vinilester ile takviye edilmiş hibrit kompozitlerini darbe davranışı Zivkovic ve arkadaşı (Živković ve ark., 2017) tarafından incelenmiştir. Kompozitleri üretmek için, merkeze keten elyafı ve laminatın dış yüzeyine yerleştirilmiş bazalt ile el yatırması kullanıldı. Şartlandırılmış hibrit numuneler, darbe özelliklerini temel malzemelerden daha fazla iyileştirdiğini tesbit etmiştir.

Tuzlu su, deniz suyu ve diğer çevresel koşulların karbon ve cam ve metal-karbon hibrit kompozitler üzerindeki etkisi, Hernandez ve arkadaşları (Hernandez-Sanchez ve ark., 2019) tarafından çekme statik ve yorulma yüklemesi altında incelenmiştir. Yazarlar, denizcilik ihtiyaçlarını desteklemek için alt bileşeni doğal deniz suyu ve kuru/normal koşullarla test etmişlerdir. Sonuçlar, tuzlu su absorpsiyonunun mukavemet/mechanik özellikleri azalttığını ve karbon kompozitlerin korozyonunu hızlandırdığını göstermektedir. Yazarlar, kompozitlerle çalışırken korozyonun kritik bir konu olduğunu ve tasarımcıların tasarımlarına etkilerini dahil etmeleri gerektiğini önerdiler. Tuzlu suyun, GNPs modifiye bazalt/epoksinin çekme, korozyon ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisi (Sükür ve Önal, 2021) tarafından araştırılmıştır. Sonuçlar, epoksi üzerine GNPs'lerin

eklenmesi nedeniyle çekme, su absorp etme ve sürtünme katsayısında bir gelişme olduğunu göstermektedir.

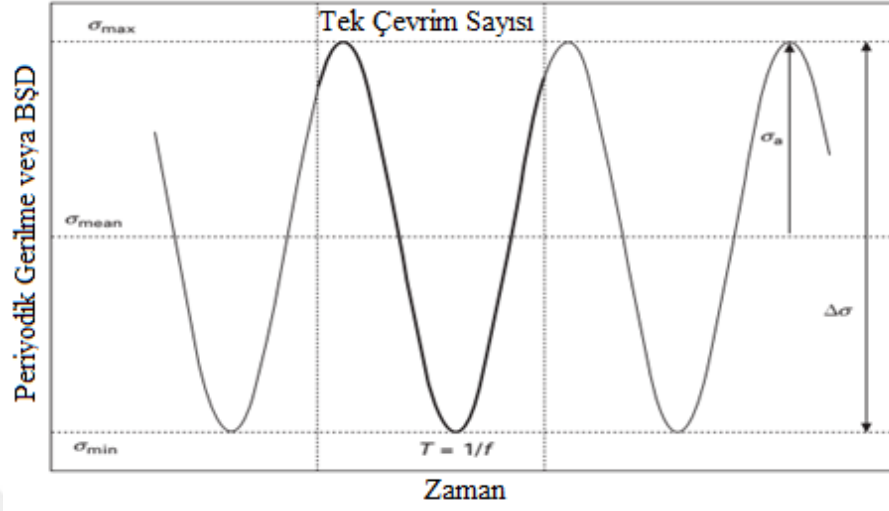
Geçmişte deniz yapıları için FRP kompozitlerinin uygulanmasının bir incelemesi araştırılmıştır (Rubino ve ark., 2020). Şimdiye kadar FRP, tekneler, pervaneler ve boru sistemleri gibi farklı gemi bileşenlerinde kullanılmıştır. Ayrıca, çevresel koşulların FRP'nin mekanik özellikleri üzerindeki sonucu HB. Mayyal ve diğerleri (Mayya ve ark., 2021) tarafından gözden geçirilmiştir. İnceleme, çatlakların, daha az fiber matris bütünlüğünün ve boşlukların, mekanik özellikleri (özellikle sertlik ve eğilme) yüksek oranda etkileyen nem emilimine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, çekme özellikleri daha yüksek sıcaklıklardan etkilenir. Deniz suyu, tuzlu su ve sıcaklığın FRP'nin statik ve yorulma özellikleri üzerindeki etkilerine ilişkin başka bir ayrıntılı inceleme rapor edilmiştir (Kepir ve ark., 2021; Kini ve Pai, 2021). Rapor, mekanik özelliklerin azalması nın nem absorbe etmesi nedeniyle olduğunu ve yorulma hasarının çekmeden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yazarlar, farklı çevresel koşullar altında kompozit özelliklerini belirlemek için analitik yöntemler geliştirmeyi önermektedir.

BFRP ve GFRP'nin deniz suyu ve SWSSC koşulları altında çekme özelliklerinin bir incelemesi Li ve ark. (Li ve ark., 2021) tarafından yapılmıştır. Yazar, önceki çalışmalara benzer şekilde, farklı çevresel koşullar altında şartlandırma süresinin artmasıyla FRP'nin azalması nı belirtmektedir. Ayrıca, uzun vadeli çevresel koşullar altında FRP özelliklerinin araştırılmasına ilişkin araştırmalar sınırlıdır. Sonuç, yüksek demir içeriği nedeniyle BFRP kompozitinin GFRP'den daha az dayanıklı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çekme yorulma özellikleri, matrisin plastikleşmesi ve bağların ayrılması nedeniyle deniz suyundan da etkilenir.

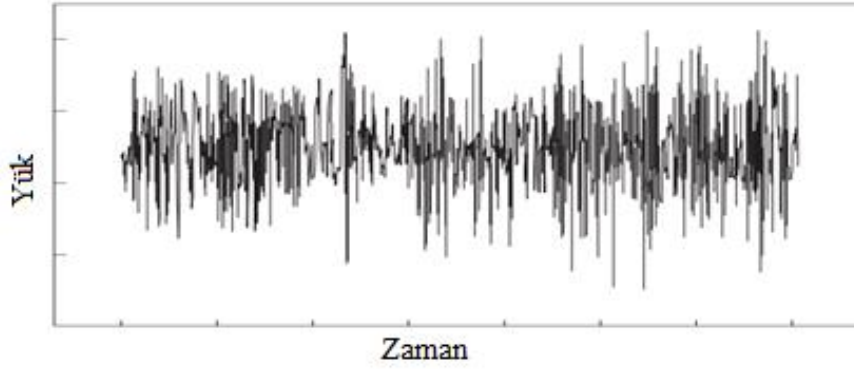
2.7. Yorulma Genel Bakış, Terminolojiler ve Test Parametreleri

Bir yapı veya bileşen, daha yüksek yükler uygulandığında bir kerede bozulabilirken, daha düşük yükleri verimli bir şekilde kaldırabilir. Öte yandan, aynı yapı veya bileşen, daha uzun zaman dilimlerinde sabit (sürünme) veya çevrimsel (yorulma) bir şekilde uygulandığında daha düşük yükler altında da hasarlı olabilir. Zamanla dalgalanan yüklerin uygulanması nedeniyle bir malzemenin özelliklerinin azalması

olgusuna yorulma denir ve sonuçta ortaya çıkan bozulmaya yorulma hasarı denir (Önal, 2002; Gürol ve Ahmet, 2009; Vassilopoulos, 2010).



(a)



(b)

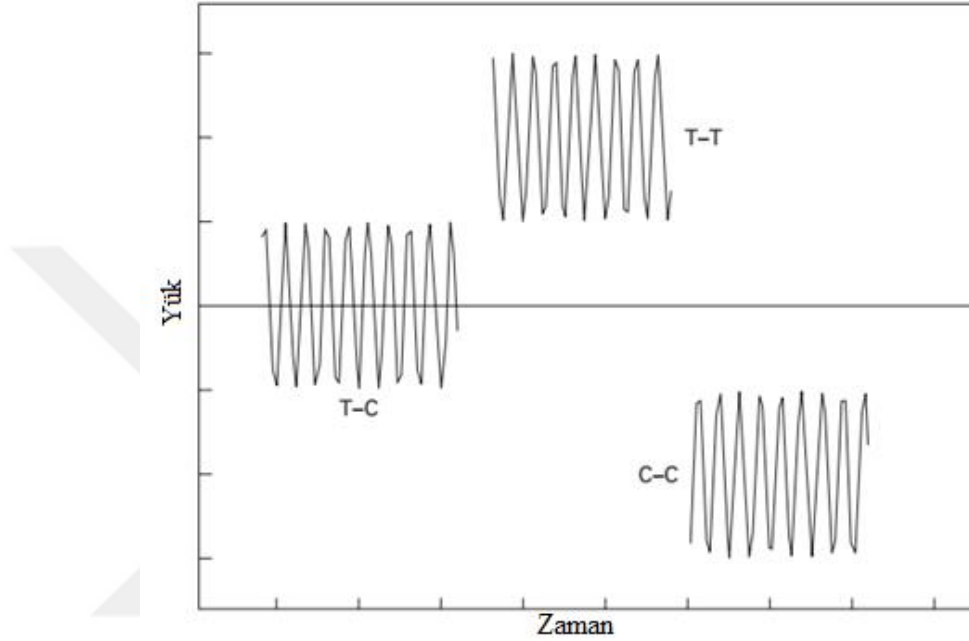
Şekil 2.8. Yorulma Yükleme Tipleri: a) CA ve b) VA (Vassilopoulos, 2010)

Yorulma, malzemelerin maksimum mukavemetinin altında meydana gelebilecek ve yapının dayanıklılığını etkileyen kalıcı hasardır (Broer, 2018). Örneğin, yorulma yükü sabit genlik (CA) olabilir - çevrim yükünün ortalama gerilimi ve genliği sabit kaldığında ve değişken genlik (VA) - çevrim yükü rastgele olduğunda, Şekil 2.8 'de gösterilmiştir (Vassilopoulos, 2010).

Yorulma testi birkaç parametreden oluşur: CA veya VA gibi yükleme modelleri, kontrol kodu (gerilme veya yer değiştirme), test frekansı, dalga formu (en yaygın olarak kullanılan sinüzoidal), test sıcaklıkları ve gerilme oranı ($R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$) (Vassilopoulos, 2010). CA, yorulma tasarımı için malzemelerin yorulma davranışını/özelliklerini belirlemek amacıyla sıklıkla kullanılır. Yorulma testi söz konusu olduğunda, CA

yüklemesi, Şekil 2.9'de gösterildiği gibi uygulanan gerilmeye göre üç forma sahiptir (Vassilopoulos, 2010; Broer, 2018).

- ✓ Çekme – Çekme (T – T)
- ✓ Çekme – Basma (T – C), bu tamamen tersine çevrilmiş bir yüklenme.
- ✓ Basma – Basma (C – C)



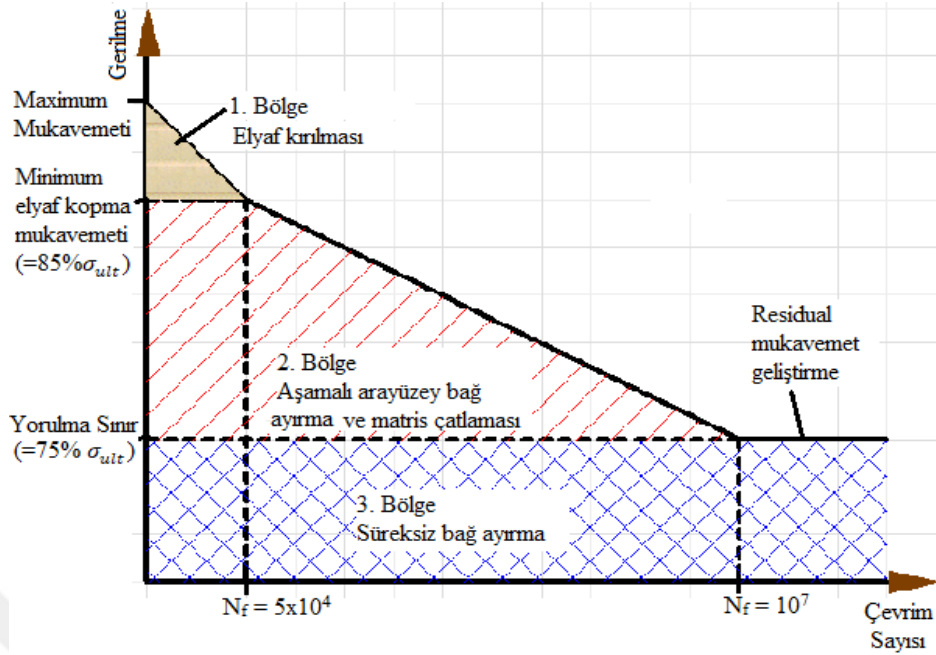
Şekil 2.9. CA Yükleme Formları (Vassilopoulos, 2010)

Yorulma testi sonuçları, gerilim ömrü (S - N) veya gerilme ömrü (ϵ - N) eğrisinde, sertlik bozulma eğrisinde ve hasar analizi eğrisinde ifade edilebilir (Broer, 2018). Alternatif olarak Wöhler eğrisi olarak adlandırılan S-N eğrisi, Şekil 2.10. 'de gösterildiği gibi, hasara kadar olan tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak uygulanan gerilimi temsil eder ve Denklem 2.1'e, Wöhler eğrisinin matematiksel denklem olarak gösterir.

$$\sigma_a = A - B * \log(N) \quad (2.1)$$

Burada σ_a - MPa cinsinden uygulanan gerilme olduğunda,

- A - ve B - malzemenin doğal sabitleridir: A-tek bir çevrim sayısı için bir malzemenin statik mukavemeti ve B- yorulma mukavemeti katsayısı ve
- N - uygulanan her gerilme için çevrim sayısıdır.



Şekil 2.10. Hasar Modelleri ile Tipik FRPC'nin S-N eğrisinin Şematik Diyagramı (Zhao ve ark., 2016)

Şekil 2.10. FRP kompozitleri için S-N eğrisinin üç bölgesini gösterir, yani fiber kırılması, aşamalı matris ayırma ve matris çatlaması ve sürekli matris ayırma. Çevrim sayısına bağlı olarak, yorulma testleri düşük çevrim yorulma, LCF ($< 10^4$ çevrim) ve yüksek çevrim yorulma, HCF ($> 10^4$ çevrim) olabilir (Schijve, 2009; Xia ve ark., 2020).

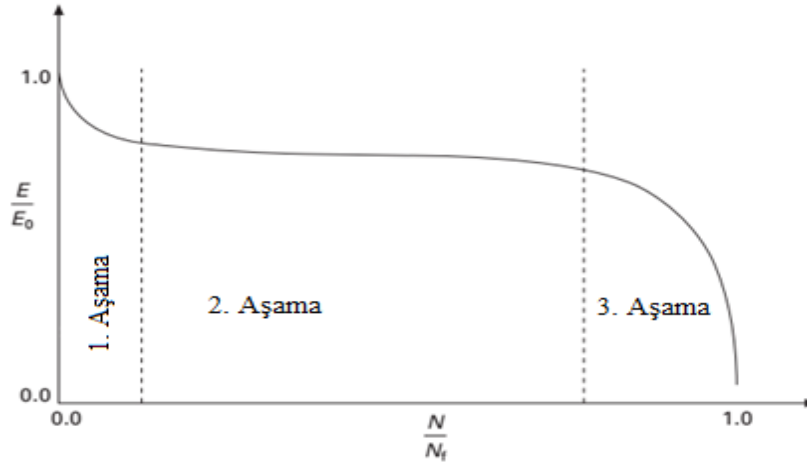
Yorulma testinden elde edilen diğer en önemli sonuç, rijitlik azalmasıdır (Şekil 2.11.). Elyaf takviyeli kompozit yapıların yorulma yüklemesi sırasında elastisite özelliklerin, özellikle aksenal/uzunlamasına sertliğin (kademeli) azalmasıdır. Artık rijitlik, belirli sayıda yorulma yükleme döngüsünden sonra laminatın kalan rijitliğidir (Vassilopoulos, 2010). Rijitlik azalmasını hasar parametresi ile ilişkilendiren matematiksel Denklem 2.2. 'de gösterilmiştir.

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (2.2)$$

Burada D – bozulma veya hasarın ölçüsü,

E_0 – başlangıç aşaması/hasarsız malzeme için elastisite modülü,

$E - N$ çevrim sayısındaki malzemenin modülüdür.



Şekil 2.11. FRP Kompozitlerin Rijitlik Bozulma Eğrisi (Vassilopoulos, 2010)

Şekil 2.11. çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve son kırılma olmak üzere üç fazı ortaya çıkaran malzemenin rijitlik bozulma diyagramını göstermektedir (Jamison ve ark., 1984; Halfpenny, 2005; Schijve, 2009; Vassilopoulos, 2010). İlk faz, kabaca %2-5'lik bir rijitlik kaybı ile iyi karakterize edilir ve matris çatlama baskındır. Enine matris çatlaklarının gelişimi, bu ilk aşamada tespit edilen rijitlik azalmasına hakimdir. İkinci aşama, kenar delaminasyonu ve çatlakların baskın olduğu çevrim sayısı ile doğrusal olarak %1-5'lik bir rijitlik düşüşünün meydana geldiğini göstermektedir. Son aşama, numunenin kırılmasına yol açan rijitlikte ani bir düşüş gösterir (Vassilopoulos, 2010).

2.8. Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Yorulma Özellikleri

(Belingardi ve ark., 2006), Hibrit cam/karbon takviyeli epoksi kompozitin yorulma davranışı incelenmiştir. 0,10 gerilme oranında statik çekme, eğilme testleri ve yer değiştirme kontrollü eğilme yorulma testleri yapılmıştır. Eğilme yorulma testi yapılırken numune, ilk maksimum yük seviyesinden itibaren nihai eğilme dayanımının %85'ine tabi tutulmuştur. 10^6 çevrimden sonra yorulma testi durduruldu ve artık özellikler ölçülmüştür. Çapraz katlı numuneler, yüksek yorulma yüklemesinde açılı katlı numunelerden daha fazla hasar görmüştür ve bu, iki numune grubu için farklı hasar mekanizmalarına bağlanmıştır. 10^6 çevrimden sonra malzeme mukavemetinde ve elastisite modülünde bir azalma gözlemlenmiştir.

Karbon, cam, poliparafenilenl benzobisoksazol (PBO) ve bazalt elyaf takviyeli polimer (FRP) kompozitlerinin ve bunların hibrit kompozitlerinin (karbon/cam ve

karbon/bazalt kompozitleri) yorulma davranışı Zhishen Wu ve ark. (Wu ve ark., 2010) tarafından sunulmuştur. Mekanik özellikleri incelemek için bir kompozit numune monotonik ve çevrimsel yüklere tabi tutulmuştur. Ayrıca uygulanan yük aralığı ve hibridizasyon türleri test parametresi olarak alınmıştır. Bu çalışma, ortaya çıkan PBO ve bazalt elyafların geleneksel karbon ve cam elyafı karşılaştırılabilir mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, kompozitin kırılma modu, elyafların gerilme modülünden oldukça etkilenmiştir ve ilerleyen hasar yayılımı, kompozitlerin yorulma hatasına neden olmuştur. Ayrıca, hibrit karbon/bazalt kompozitlerinin yorulma direnci, bazalt kompozitlere kıyasla önemli ölçüde iyileştirildi. Bununla birlikte, karbon/cam hibrit kompozitlerin direncinde herhangi bir gelişme yoktur.

Colombo ve ark. (Colombo ve ark., 2012), bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin Statik ve yorulma karakterizasyonunu incelenmiştir. Çeşitli statik ve yorulma testlerinin deneysel sonuçları açıklanmıştır. Vinilester ve epoksi matrislerin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin statik ve yorulma davranışları üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Mekanik testlere (Çekme ve basma statik testleri, delaminasyon testleri ve yorulma testleri) ek olarak, numunelerin mekanik yüklere karşı termal davranışı termografi yardımıyla değerlendirilmiştir. Sonuç, bazalt takviyeli epoksi kompozitlerin vinilesterden daha yüksek mekanik özellikler (çekme ve basma davranışı) gösterdiğini ve eğilmede elyaf çekmesi olmadığı için hasar modunun daha kompakt olduğunu göstermektedir.

Dorigato ve Pegoretti, epoksi kompozit laminatlarla takviye edilmiş bazalt, E-cam ve karbon fiberlerin yorulma direncini araştırmıştır. Aynı alan yoğunluğunda bazalt, E-cam ve karbon fiber kumaşlar hazırlandı. Sonuçlar, BE laminatların elastisitemodül ve mukavemet değerlerinin karşılık gelen GE laminatlardan daha yüksek olduğunu ve çekme mukavemeti değerlerinin CE laminatların yakın olduğunu göstermektedir. Yorulma direnci araştırmaları, GE kompozitleri ile karşılaştırıldığında BE laminatların üstün performanslarını göstermiştir. BE, GE laminatlara göre aşamalı hasar ve biraz daha yüksek sönmüleme özelliklerini sürdürme konusunda gelişmiş bir yeteneğe sahiptir. Yorulma davranışı söz konusu olduğunda, yazarlar yapısal uygulamalarda GE'nin BE kompozit ile değiştirilmesini tavsiye etmektedir (Dorigato ve Pegoretti, 2012).

Karbon/polyester kompozitlerin değişken yorulma zorlaması (fully-reversed loading) altında yorulma davranışı, araştırmacılara yeni bir bakış açısı sağlar (Amiri ve Cavalli, 2013). Yorulma ömrünün tahmini, dört noktalı eğilme yüklemesine dayanmaktadır. CFRP laminatın 3 boyutlu hasarı, eğilme yorulma ömrü ve eğilme sertliği azalması başka bir araştırmacı tarafından incelenmiştir (Liu ve ark., 2016). Sonuç, matris çatlağı, bağ ayrılması, delaminasyon ve fiber azalmasının CFRP'nin ilişkili 3B hasarları olduğunu göstermektedir. Yazarlar, rijitliği, her çevrimde karşılık gelen bşd ile uygulanan maksimum gerilme oranından hesaplanmış. Bu çalışmada, yazarların yer değiştirme kontrollü yorulma yüklemesi kullanması nedeniyle yorulma modülünün eğilme yükünün bir fonksiyonu olarak arttığı gösterilmiştir. CFRP laminatların kuvvet kontrollü T-C yorulma testinde, sertlik daha düşük gerilme seviyelerinde daha hızlı bozulduğu tespit edilmiştir.

Zhao (Zhao ve ark., 2016), BFRP'nin farklı gerilme seviyelerindeki periyodik yüklemeler altında yorulma davranışı ve bozulma mekanizması üzerinde çalışmıştır. Numune, yerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile birlikte gelişmiş yorulma yükleme ekipmanı kullanılarak çekme-çekme yorulma yüklemesi altında test edilmiştir. Numunelere 1×10^7 çevrim sayısı kadar uzun süreli periyodik yükler uygulanmıştır. Sonuçlarda belirtildiği gibi, yorulma dayanımı güvenilirlik yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Rijitlik azalması, S–N eğrileri ve tükenilmiş numunelerin artık mukavemeti test sırasında kaydedilmiş. Farklı gerilme seviyelerinde numunelerin hasar yayılımını ve kırılmasını analiz etmek için 'In-Situ' SEM kullanılmaktadır. Sonuç olarak, yorulma mukavemeti tahmininin (2×10^6 tekrar sayısı, verilerden daha düşük, 1×10^7 tekrar sayısı) uzun süreli çevrimleri ile karakterize edildiği rapor edilmiştir. Geleneksel iki milyon salğı çevrim sayısı, yorulma davranışını doğru bir şekilde tahmin etmek için yeterli değildir. SEM görüntülerinden kritik elyaf kopma hatası, yüksek seviyeli yorulma gerilmede baskın hasar iken, BFRP için düşük ve orta yorulma gerilme seviyesinde matris çatlaması ve ara yüzey bağlarının ayrılması ana hasar modelleridir.

Deniz suyu ortamında bazalt elyaf takviyeli epoksi polimer (BFRP) tendonlarının yorulma davranışı üzerine başka bir çalışma Shi ve ark. (Shi ve ark., 2017) tarafından yapılmıştır. Yorulma analizi, sıcaklık hızlandırılmalı bir deney ile bir tuz çözeltisi içinde yaşlandırmanın ardından gerçekleştirilmiştir. Yaşlanma sıcaklığının yorulma mukavemeti azalması üzerindeki etkisini analiz etmek için hem deneysel veriler hem de

taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri kullanılmıştır. Ayrıca, Arrhenius denklemi, farklı sıcaklıklarda BFRP tendonlarının yorulma mukavemeti azalmasını tahmin etmek için de kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, zayıflamış fiber matris arayüzünün, numunelerin yorulma mukavemeti azalmasını yönettiğini göstermektedir. Bu, bir tuz çözeltisinde Si–O–Si kimyasal bağlarının hidrolizinden kaynaklanmaktadır. SEM görüntüleri, numunelerin 55 °C sıcaklıkta 63 gün yaşlandırıldığını ortaya koymuş ve diğer gruplara göre daha fazla korozyona uğradıklarını doğrulamıştır. Arrhenius denklemleriyle tahmin edilen BFRP tendonlarının yorulma mukavemetleri, deniz ortamlarında 100 yıl şartlandırma süresinden sonra üç sıcaklıkta (25, 40 ve 55 °C) sırasıyla 0.41, 0.43 ve 0.45 fu'dur. Makalede verilen sonuçlar, deniz ortamında BFRP tendonlarının yorulma tasarımı için bir kılavuz olarak alınabilecektir.

Yang ve ark. (Yang ve ark., 2017), frekansın, üç noktalı eğilme yüklemesi altında CFPC'nin yorulma davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuç, yorulma ömrünün artan frekans ve uygulanan gerilme ile azaldığını göstermektedir. Hasar bölgesi, matris çatlaması, bağ ayrılması, delaminasyon ve elyaf kırılmasını gösterir. Sertlik bozulması, çevrim sayısının yüzdesi bir fonksiyonu olarak çizilir ve üç bölge gösterir. Yazar, daha güvenli yorulma testleri için ve yorulma yüklemesi altında gerekli hasar parametrelerini elde etmek için 10 Hz'lik bir frekans önermektedir.

Bazalt elyaf takviyeli epoksi polimer kompozitlerin çekme-çekme yorulma davranışı ve mikro hasar mekanizması üzerindeki gerilme oranlarının etkisi sunulmuştur (Zhao ve ark., 2018). Yorulma testi için kullanılan gerilme oranları ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) 0.1 ve 0.5 idi. Gerilme oranlarının etkisi, ömür ve sertlik bozulmasının izlenmesi ve analiz edilmesiyle araştırılmıştır. Hasar yayılımını izlemek için yorulma testi sırasında 'In-Situ' taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Deney sonuçları, incelenen BFRP kompozitlerinin yorulma ömrünün azaldığını ve gerilme oranı azaldıkça yorulma ömrü bozulma oranının arttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, sertlik bozulması farklı gerilme oranlarına da duyarlıdır; Daha düşük bir gerilme oranında, hasardan önce daha büyük bir sertlik kaybı gözlemlendi. SEM görüntüleri, mikro-hasar modunun, gerilme oranları azaldıkça arayüz bağlarının ayrılmasından ve matris kırılmasından fiber kırılmasına dönüştüğünü göstermektedir.

Sıcaklığın bazalt elyaf takviyeli epoksi polimer (BFRP) kompozitlerin statik ve çekme-çekme yorulma davranışı üzerindeki etkisi (Zhao ve ark., 2019) tarafından incelenmiştir. BFRP kompozitlerinin yorulma performansını değerlendirmek için bu çalışmanın yazarları, -20, 0, 20, 40 ve 60 °C sıcaklıklarda S-N eğrilerini, enerji dağılımını, rijitlik kaybı ve ömürle birlikte yer değiştirme artışını değerlendirdi. Deney sonuçları, maksimum gerilme ile sıcaklıklar düştüğünde statik mukavemet ve yorulma ömrünün arttığını göstermektedir. Öte yandan, sıcaklığın yorulma ömrü üzerindeki etkisi, düşük devirli yorulma rejiminde daha belirgin olmuştur. Ayrıca, çeşitli sıcaklıklar arasındaki ömür farkları, daha yüksek ömür ile daha küçük hale geldi.

Bu makalede, yazar tüm numuneler için enerji kaybının küçük olduğunu belirtmiştir; Öte yandan, sertlik bozulması ve kalıcı yer değiştirme artışı farklı sıcaklıklara duyarlıdır. Bu, daha düşük sıcaklıklar hasar olmadan önce daha önemli bir rijitlik kaybı ve kalıcı yer değiştirme artışı gösterir.

Tuz çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra, bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) kompozitinin çekme-gerilim yorulma testi altında yorulma bozulması ve ömür tahmini araştırılmıştır (Wang ve ark., 2019). Deneyde $R = 0.1$ ve $R = 0.8$ gerilme oranı alınmıştır. Yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış numunelerin hasar yayılımını ve kırılma yüzeyini analiz etmek için yerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ek olarak, farklı yaşlandırma süreleri için kompozit numunelerin rijitlik bozulması ve S-N eğrileri kaydedildi. Sonuca göre, BFRP'nin statik mukavemeti, bir tuz çözeltisinde yaşlanmadan sonra ihmal edilebilir bir bozulma olduğunu ortaya koymaktadır. Farklı yaşlandırma süreleri için yorulma hasarının SEM görüntüleri, fiber/matris arayüz bölgesinin, yaşlandırılmış numunelerde erken arayüzey bağlarının ayrıldığını göstermektedir. Yazarlar, yorulma ömrü tahmininin, tuzlu su korozyonunun meydana gelmesinden sonra BFRP'nin yorulma dayanımını kabul edilebilir bir seviyeye düştüğünü gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Grafen içeriğinin bazalt elyaf takviyeli poliamid altının yarı statik ve yorulma özellikleri üzerindeki etkisi (Mészáros ve Szakács, 2016) tarafından incelenmiştir. Hibrit kompozitler ve mono-kompozit numuneler enjeksiyon kalıplama ile üretilmiştir. Grafenin varlığının monokompozitlerin mekanik özelliklerini değiştirmediği bildirilmiştir. Bununla birlikte, düşük grafen içeriğine sahip hibrit kompozitler

durumunda modülünde bir miktar artış ortaya çıkmıştır. Yarı statik sonuçlara ek olarak, grafen içerikli nanokompozitlerin düşük periyodik yorulma testleri sırasında yorulma ömründe önemli azalmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca, saf Poliamid 6'nın sonucuna kıyasla ağırlıkça %0.25 GnP içeren nanokompozitlerde periyodik sürünme ömürlerinde önemli ölçüde azalma meydana gelmiştir. Öte yandan, uygulanan tüm yük seviyelerinde bazalt fiber mono-kompozitine kıyasla ağırlıkça %0.25 GnP içeren hibrit kompozitlerin yorulma ömürleri dikkate değer bir şekilde artmıştır.

Silanize-montmorillonitin (Si-MMT) bazalt elyaf/epoksi kompozitlerin deniz suyu koşullarında yorulma ve kırılma davranışı üzerindeki etkisi (Kim ve ark., 2019) tarafından araştırılmıştır. Si-MMT/bazalt/epoksi (Si-MMT BFRP) ve Saf bazalt/epoksi (saf BFRP) kompozitleri şartlandırılmamış ve deniz suyu ortamında incelenmiştir. Silan işleminden sonra yapısal değişiklikleri analiz etmek için TEM, XRD ve FTIR kullanılmıştır. Ayrıca, çekme mukavemeti, periyodik yükleme (yorulma) ve kırılma özelliklerini incelemek için üniversal bir test cihaz (UTM) ve FE-SEM kullanılmıştır. Deney sonuçları, MMT katmanlarının matriste daha iyi uyumluluğu ve dağılımı nedeniyle MMT silanlama işleminden sonra özelliklerin iyileştirildiğini göstermektedir. Deniz suyuna daldırıldıktan sonra Si-MMT BFRP kompozitlerinde özellikleri iyileştirilmiş arayüzey etkileşimi sayesinde, yorulma testindeki artık mukavemet ve kırılma testindeki enerji salma oranı sırasıyla %33 ve ~%28 oranında azalmıştır.

Suwartaa ve arkadaşları (Suwarta ve ark., 2019), statik ve çekme yorulma yüklemesi altında sandviç CE ve GE ince katmanlarının yorulma özelliklerini araştırılmışlar. Çalışma öncelikle yorulma yükü altında hasarın başlaması ve yayılması ile ilgilidir. Bulgular, karbonun kırılma geriliminin altına bir yorulma yükü uygulandığında sertlik kaybı olmadığını göstermiştir. Orta düzeyde enerji salma oranları nedeniyle, hibritler, %90 yorulma gerilmei altında yavaş delaminasyon ve aşamalı sertlik bozulması sergiler. Yazar, yorulma hasarı karakterizasyonu koşulları altında delaminasyon oranını hesaplamak için enerji salınım oranı yöntemini şiddetle tavsiye etmektedir.

Prabhakar ve ark. (Prabhakar ve ark., 2020), eğilme yüklemesi altında karbon/venylester kompozitlerinin yorulma özellikleri üzerinde deniz suyu şartlandırmasının etkilerini araştırmaktadır. Yazarlar, deniz suyu şartlandırmasından sonra kompozitlerin eğilme yorulma yüklemesi altındaki çevrim sayısının bir azalma

gösterdiğini açıklamaktadır. Kompozit numunenin ömrü, düşük birim şekil değiştirme seviyesinde karşılaştırılabilir ve daha yüksek birim şekil değiştirme seviyesinde fark daha yüksek olacaktır. Yazarlar, dış yüzeyin eğilme yorulması sırasında matris çatlaması ve elyaf kırılması gösterdiğine dikkat çekerek, şartlandırılmamış ve şartlandırılmış numuneler arasındaki hasar benzerliklerini tartışmışlardır. Ek olarak, şartlandırılmış numunelerin eğilme sertliği, karşılaştırılabilir uygulanan birim şekil değiştirmelere maruz kaldıklarında şartlandırılmamış numunelere kıyasla başlangıçta azalan bir eğilim gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Hibrit kompozit üzerine yapılan diğer araştırma, Seghini ve arkadaşlarının (Seghini ve ark., 2020), T-T yüklemesi altında keten-bazalt/epoksi kompozitlerinin yorulmasını vurgulayan bir çalışmasıdır. Yazarlar, hibrit kompozitlerin yorulması üzerine araştırma eksikliğini açıklamışlardır. Sonuç, BE'nin hibrit olmayan kompozitleriyle karşılaştırıldığında, hibridizasyonun yorulma davranışı üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir. Ayrıca yazarlar, keten lifinin çatlakları emme ve direnme kapasitesi nedeniyle BE ve keten/epoksi kompozitler arasındaki hibritin statik gerilme özelliklerini tartışmışlardır.

Balkoglu ve arkadaşları, GE kompozitlerin statik ve yorulma özelliklerini farklı ortamlara maruz bırakılarak araştırmıştır. Makalede belirtildiği üzere aynı anda on numuneyi test edebilen yeni bir yorulma test makinesi tasarlanmış ve üretilmiştir. Asit ve alkali şartlandırılmış numuneler, bu incelemede üç noktalı yorulma yüklemesine tabi tutulmuş. Sonuçta, şartlandırma çözeltisinin pH'ının hem statik hem de yorulma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Numunenin mukavemeti, şartlandırma süresi ve şartlandırma malzemelerinin konsantrasyonundaki bir artış ile farklılık göstermiştir. Bu nedenle araştırmacılar, çevre şartlarında bir malzeme tasarlarken özellikle dikkat gösterilmesi gerektiğini önermektedir (Balcıoğlu ve ark., 2021).

Zuo ve ark. (Zuo ve ark., 2021), hibrit kompozitlerin yorulma özelliklerini gözden geçirmiş ve hibridizasyon nedeniyle yorulma özelliklerinin gelişimini araştırmıştır. Ayrıca hibrit kompozitlerin yorulması üzerindeki hibrit etkisinin doğrudan araştırılmadığını vurgulamıştır. Hibritlerin uzun süreli çevresel koşullar altında yorulması üzerine yapılan çalışmalar, gerektiği kadar mevcut ve yeterli değildir.

2.9. Özet ve Literatürdeki Araştırma Boşlukları

Bazalt, karbon ve cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik ve yorulma özellikleri üzerine daha önce yapılmış çalışmalar gözden geçirilmiştir. İncelenen çalışmalardan, aşağıdaki sonuçlar ve araştırma boşlukları tespit edilmiştir.

Mekanik özellikler (çekme, eğilme ve darbe direnci) test sonuçları, bazalt vinilester kompozitlerin E-cam ile karşılaştırıldığında daha yüksek eğilme modülü ve görünür tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) gösterdiğini ortaya koydu. Ayrıca, bazalt takviyeli epoksi kompozitler, vinilesterden daha yüksek mekanik özellikler göstermiştir ve elyafı patlama eğilimi göstermediğinden hasar modu daha kompakttır.

Araştırmacılar, matris ve bazalt lifleri arasındaki yapışmayı arttırmak için çeşitli nanopartiküller kullanmışlardır. Polipropilen nano-kil, grafen nano-peletler, karbon nano-tüpler, SGO nano-dolgu maddesi ve Si-MMT dahil olmak üzere çeşitli katkı maddeleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, her bir örnekte mekanik özelliklerde (mukavemet, modül ve darbe) önemli bir gelişme görülmüştür. Örneğin, darbe sınırı hızı ve enerji emilimi, GSMH nanokompozitinin ağırlığına göre %0,3 kullanılarak geliştirildi. Ayrıca, ağırlıkça %0,4'lük SGO dolgulu kompozit ilavesi, BF/epoksi kompozitin çekme, eğilme ve basma dayanımlarında (%18, %59 ve %61'e göre) maksimum gelişme gösterir. Bununla birlikte, bazı durumlarda (PPCN), maksimum çekme mukavemeti azalmıştır.

Bazalt takviyeli polimer kompozitin yorulma özellikleri söz konusu olduğunda, yorulma direnci araştırmaları, GF kompozitlere kıyasla BF laminatların üstün performanslarını göstermiştir. BF, GF laminatlara göre aşamalı hasar ve biraz daha yüksek sönmüleme özelliklerini sürdürme konusunda gelişmiş bir yeteneğe sahiptir. Yorulma ömrü bozulması, sıcaklık ve gerilme oranından büyük ölçüde etkilenebilir. Örneğin, BFRP kompozitlerinin yorulma ömrü azaldı ve gerilme oranı azaldıkça yorulma ömrü bozulma oranı arttı. Öte yandan, sıcaklıklar belirli maksimum gerilmeyle düştüğünde statik dayanım ve yorulma ömrü arttı. Sıcaklığın yorulma ömrü üzerindeki etkisi, düşük çevrim yorulma rejiminde daha belirgindir.

BFRP'nin yorulma mukavemeti, tuzlu suyu şartlandırma yaptıktan sonra kabul edilebilir bir seviyeye düşer. Saf Poliamid 6 'nın sonucuna kıyasla GnP

nanoparçacıklarının ağırlıkça %0.25 eklenmesiyle periyodik sürünme önemli ölçüde azaldı. Öte yandan, uygulanan tüm yük seviyelerinde bazalt fiber mono-kompozitine kıyasla ağırlıkça % 0.25 oranında GnP nanoparçacıklarının eklenmesiyle hibrit kompozitlerde yorulma ömründe dikkate değer bir artış sergilenmiştir. Deniz suyuna daldırıldıktan sonra Si-MMT BFRP kompozitlerinde iyileştirilmiş arayüzey etkileşimi nedeniyle, yorulma testindeki artık dayanım ve kırılma testindeki enerji salınım hızı azaldı.

Araştırmaya göre, bazalt elyafı, altyapı, otomotiv endüstrisi ve tüketici uygulamaları için yapısal uygulamalar için gelecek nesil malzemeler olma potansiyelini belirleyen umut verici özelliklere sahiptir. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler hakkında mekanik, termal ve kimyasal özelliklere odaklanan birkaç makale olmasına rağmen, bazalt elyaf takviyeli nano modifiyeli kompozitlerin yorulma ve korozyon özellikleri üzerine araştırmalar için şiddetle tavsiye edilir.

Son olarak, hibrit kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine yapılan inceleme, hibritleme nedeniyle yorulma özelliklerinin iyileştirildiğini göstermektedir. Ayrıca araştırmacılar, hibrit kompozitlerin yorulma üzerindeki hibrit etkisinin doğrudan araştırılmadığını vurguladılar. Hibritlerin uzun süreli çevresel ortamda yorulması ile ilgili çalışmalar gerektiği kadar mevcut ve yeterli değildir.

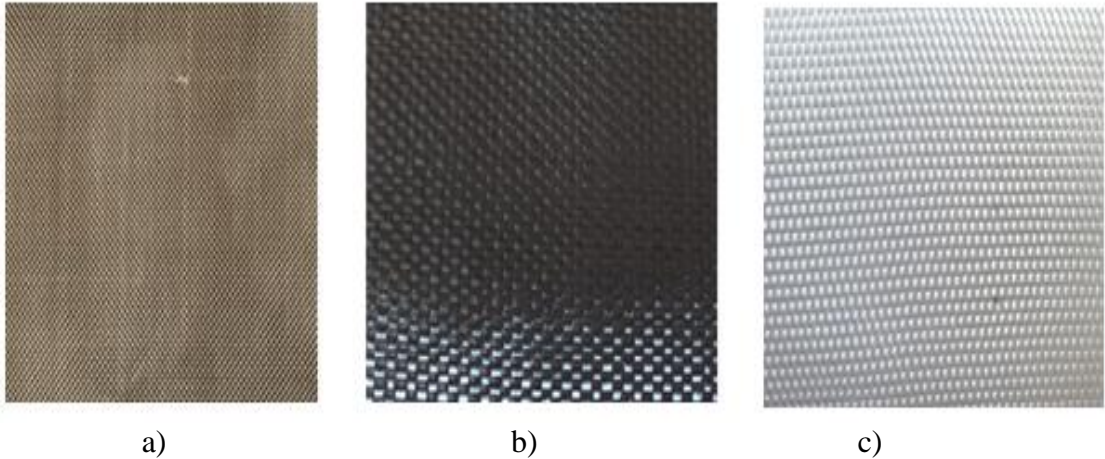
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde kullanılan malzemelerin ayrıntıları açıklamaktadır. Bu malzemeler dokuma kumaşlar (takviye), matris (laminasyon reçineleri ve sertleştiriciler) ve VARTM'da kullanılan malzemelerdir. Kompozit plakaların üretimi, test kuponlarının hazırlanmasını, test numunelerinin tuzlu suda şartlandırması ve tüm testler için test koşulları araştırılmıştır.

3.1. Kullanılan Materyaller

3.1.1. Takviye elyafları

Şekil 3.1, çalışmada kullanılan üç farklı tipte takviyeyi (dokuma kumaş) göstermektedir. Dokuma kumaşlar, Dost Kimya tarafından tedarik edilmiştir. Çalışmada kullanılan ilk elyaf türü, 200 gr/m² alan ağırlığı (kumaşın metrekare başına ağırlığı) olan düz dokuma bazalt kumaşlardır (Şekil 3.1 (a)). İkinci takviye 200 gr/m² alan ağırlıklı dokuma 3K düz karbon kumaşlar (Şekil 3.1 (b)), diğeri ise 200 gr/m² alan ağırlıklı dokuma düz cam kumaşlar (Şekil 3.1 (c)) olup bilinen ürün kodu 'HexForce® E GLASS FABRIC 01266 0800 TF970 CLEAR'dır ve Hexcel şirketinin bir ürünüdür.



Şekil 3.1. Elyaf Çeşitleri (a) Bazalt Elyaf (b) Karbon Elyaf ve (c) Cam Elyaf

Tedarikçiye göre kumaşların özellikleri Çizelge 3.1'de belirtilmiştir. Çizelge, fiziksel, mekanik ve elyaf dokuma stillerini tanımlar. Çizelgeden karbon elyafın çekme mukavemeti ve elastisite modülünün bazalt ve cam elyaflardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Öte yandan, bazalt elyafın çekme birim şekil değiştirme, karbon elyafın iki katından fazladır.

Çizelge 3.1. Kumaşların özellikleri

Özellikleri	Elyaf lar			Açıklama
	Bazalt	Karbon	Cam	
Model numarası	WARP=WEFT= Bazalt iplik BS12 110	WARP=WEFT= 3K HS Karbon Fiber 100GR	EC9 136 hem WARP hem de WEFT	Elyaf üreticileri ürün tipi veya model numarası
Yoğunluk	2,75 gr/cm ³	1,79 gr/cm ³	N/A	
Spesifik yer çekimi	2,75 gr/cm ³	1,79 gr/cm ³	N/A	
Birim uzunluk başına kütle	110 (gr/1000m)	200 (gr/1000m)	WARP 60% WEFT 40%	
İplik Yapımı	Warp 10pics/cm Weft 9pics/cm		WARP 8.9 İplik /cm, WEFT 6 Atkı /cm	İplik Yapımı
Çekme Mukavemeti	3170 MPa	3800MPa	N/A	Alan genişliği ile ölçülen fiber kırılma kuvveti
Çekme Modülü	89 GPa	240 GPa	N/A	Elastik sertliğin ölçülmesi
Çekme BŞD	3,5%	1,6%	N/A	Elyafın kopma noktasında uzaması
Boyutlandırma Seviyesi	1,20%	1,20%	N/A	Toplam elyaf ağırlığına karşı kimyasal işlem yüzdesi
Erime noktası	1250 °C	N/A	N/A	
Uygulama Sıcaklığı	460 °C'ye kadar	N/A	N/A	
Kalınlık	N/A	N/A	0.15 mm	

3.1.2. Kullanılan laminasyon reçinesi ve sertleştiricisi

Bu çalışmada, HEXION SPECIALTY CHEMICALS B.V tarafından üretilen ve Dost Kimya End. Ham. San. Ve Tic. Ltd. Sti, İstanbul Deri Organize San. Böl., İstanbul/ TÜRKİYE, tarafından tedarik edildiği, MGS® L160 laminasyon reçinesi ve H160 Sertleştiriciler kullanılmıştır.

Bu tür reçinenin ana uygulamaları, planör, motorlu planör ve motorlu uçak, model uçak, tekne ve gemi yapımı, spor malzemeleri, kalıplar ve aletlerin imalatı içindir. Reçine, düşük karışım viskozite, düşük toksisite, yüksek ısı direnci, iyi mekanik özelliğe ve yaklaşık 45 dakika ile yaklaşık 5 saat kap ömrüne sahiptir. MGS® L160, 10 °C ile 50 °C arasındaki sıcaklıklarda bir saatlik çalışma süresine sahiptir, bu da her türlü imalat

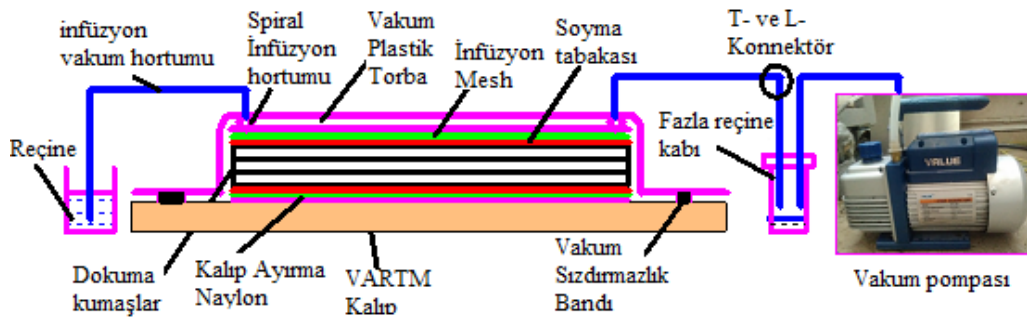
teknikğine izin verir. Net epoksi reçine ve sertleştiricinin karışım oranı, üreticinin kılavuzunda belirtildiği gibi 100:25 'tir (ağırlıkça 100 kısım epoksi 25 kısım sertleştirici). Tedarikçi tarafından belirtilen epoksi ve sertleştiricinin temel özellikleri Çizelge 3.2. 'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. Laminasyon Epoksi L 160 ve Sertleştirici 160'ın Özellikleri

Özellikleri	Laminasyon reçinesi L 160	Sertleştirici 160	Açıklama
Yoğunluk [g / cm ³]	1,13	0,96- 1,00	
Viskozite [mPas]	700	10- 50	
Epoksi eşdeğeri [g / eşdeğeri]	166	N/A	
Epoksi değeri [eşdeğer /100 gram]	0,55 1,5480	N/A 1,5200- 1,5210	
Refrakter indeksi	N/A	550- 650	
Amin değer [mg KOH / g]	110- 140	N/A	
Eğilme mukavemeti [N / mm ²]	3,2- 3,5	N/A	
Elastisite modülü [kN/ mm ²]	70- 80	N/A	
Çekme mukavemeti [N / mm ²]	80- 100	N/A	
Darbe dayanımı [N / mm ²]	5,0- 6,5	N/A	
Kopmada uzama [%]	40- 50	N/A	

3.1.3. Kompozit numunelerin üretilmesi

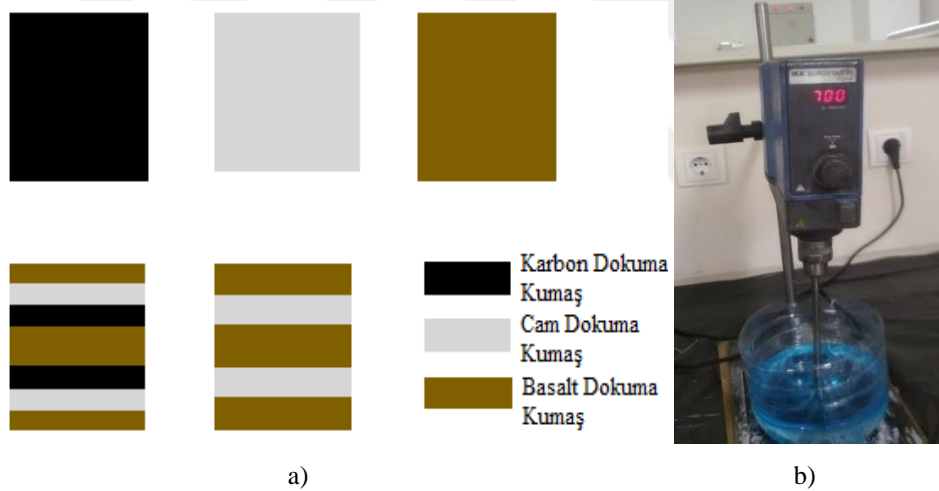
Şekil 3.2, çalışmada kompozit numunelerin üretilmesinde kullanılan VARTM yaklaşımını göstermektedir. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM), bir reçinenin bir elyaf tabakası içeren bir kalıba infüze edildiği/akıtılarak ve formu bir vakum torbasına koyarak kompozit numuneleri üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem reçine içeriğini kontrol etmek için avantajlıdır ve büyük ve karmaşık bileşenlerin üretilmesi için uygun maliyetlidir (Chen ve ark., 2019).



Şekil 3.2. VARTM Şematik Diyagramı

Bu yöntemde kullanılan malzemeler vakum pompası, vakum poşeti naylonu, kalıp ayırma naylonu, infüzyon filesi, soyma kat, infüzyon vakum hortumu, infüzyon spiral hortumu, T ve L hortum bağlantıları, vakum sızdırmazlık bandı, reçine kaynağı ve fazla reçine camıdır. VARTM malzemelerine ait şekiller Ek A1'de gösterilmektedir.

Dokunmuş kumaşlar, 500 mm x 600 mm boyutlarında dikdörtgen şeklinde kesilmiştir. Benzer şekilde, kalıp ayırma, infüzyon filesi, soyma katı ve vakum poşeti naylonu gerekli boyutlarda kesildi. Kalıbı temizledikten sonra, kalıp ayırma naylonu, infüzyon filesi ve soyma katı sırasıyla VARTM dikdörtgen kalıbına yerleştirildi. Daha sonra dokuma kumaşlar Şekil 3.3.(a) 'da gösterilen hibritleme sırasına göre katmanlandı. Hibritleme sırası, literatürdeki çalışmalardan da faydalanılarak seçildi (Chen ve ark., 2019). Bu çalışmada ana hedeflerden birisi de farklı hibritleme ile bazalt hibrit kompozitlerin eğilme özelliklerini iyileştirilebilmektir.



Şekil 3.3. a) Kompozit Numunenin hibritleme Sırası b) Laminasyon Reçinesi L160 ve Sertleştirici H160'ın Mekanik Karıştırıcı ile Karıştırılması

Şekil 3.3.(a) 'da gösterilen hibritleme sırasına göre tüm 20 tabakalı kumaş bitirildikten sonra kalıp ayırma naylonu ve infüzyon filesi yerleştirilir. Daha sonra tabakalı infüzyon filesinin sağ ve sol taraflarına infüzyon spiral hortumu uygulandı. İnfüzyon hortumunu reçinenin giriş ve çıkışına T ve L hortum bağlantıları eklemeleriyle bağladık, vakumlu naylon torbayı ekledik ve vakumlu sızdırmazlık bandı kullanarak kalıba bağladık. Son olarak, infüzyon hortumunu reçine kabına, diğer yandan reçine fazlası için cam kabına ve vakum pompasına, Şekil 3.2. 'de gösterildiği gibi bağlandı. Önceki çalışmaların deneysel sonuçlarına göre, yüksek kalıp sıcaklığı, yüksek vakum ve

uygun şekilde azaltılmış giriş basıncı ile yüksek elyaf hacim oranlı ürün ile düşük boşluk elde edildi (Kedari ve ark., 2011).

Bir sonraki adım, Şekil 3.3.(b) 'de gösterildiği gibi bir mekanik karıştırıcı kullanılarak ağırlıkça 100:25'lik bir karıştırma oranıyla laminasyon reçinesi L160 ve sertleştiricinin H160 karıştırılmasıdır. Karıştırma işlemi, yaklaşık 700 d/d 'da 5 dakika süreyle yapıldı. Daha sonra karıştırılan reçine bir bar kapasiteli vakum pompası ve infüzyon filesi yardımıyla tabakalı dokuma kumaşlara uygulanır ve homojen bir şekilde plakanın tamamına dağıtılır. Ayrıca sisteme reçine transferi ve hava geçişi, bir infüzyon vakum hortumu ve T- & L- konektörleri ile desteklenmektedir. Böylece sistem fiber-reçine oranını ayarlamış ve havanın sistemden çekilmesini sağlayan ve reçinenin geçişine izin vermeyen spiral infüzyon hortumu kullanılarak hava kabarcıkları en aza indirilmiştir. Şekil 3.4. 'de laboratuvardaki kompozit üretim (VARTM) ünitesi gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Laboratuvardaki kompozit üretim (VARTM) ünitesi

Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi, fazla reçine kalıptan çıkarılarak vakum pompası ve hortumlar yardımıyla cam şişe kabına boşaltılır. Kürleme işlemi, vakum basıncı sabit tutularak VARTM kalıbında 80 °C sıcaklıkta bir saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kompozitler kesilmeden önce bir hafta oda sıcaklığında kürlenir. Bu yöntemle Basat/Epoksi (BE), Karbon/Epoksi (CE), Cam/Epoksi (GE), Bazalt-Cam/Epoksi (BGE) ve Bazalt-Karbon-Cam/Epoksi (BCGE) olmak üzere beş kompozit plaka elde edilmiştir. Her konfigürasyondan 3,3 mm ila 3,5 mm kalınlığında iki adet 500 mm x 600 mm kompozit plaka ile üretildi. Elyaf hacim oranı, karışım kuralı Denklemleri (3.1) ila (3.2) kullanılarak analitik olarak tahmin edildi. Ayrıca, bu amaçla üretim öncesi ve sonrası matris, elyaf ve kompozit ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Buna göre, elyaf hacmi yaklaşık %60'dır.

$$V_f = \left(\frac{V_r}{V_c} \right) \quad (3.1)$$

$$V_c = V_r + V_m \quad (3.2)$$

Burada, V_f – Fiber hacim oranıdır,

V_r – Elyafını hacmi,

V_c – Kompozitin hacmi,

V_m – Matris (reçine) hacmidir.

Ayrıca, elyaf hacim oranı, ASTM D3171-15 (International, 2015) yöntem I, matrisin nitrik asit sindirimi uyarınca ölçülür. Bu test yöntemi, nitrik asit sindirimini kullanarak kompozit malzemelerin elyaf, reçine ve boşluk içeriklerini belirler. Nitrik asitle parçalama yöntemi, reçineyi elyafa zarar vermeden uzaklaştırır. Bu nedenle, elyaf veya reçine içeriği (hacim veya ağırlık olarak), bu yöntem kullanılarak elde edilen elyaflardan hesaplanabilir.

Bu yöntemi kullanarak reçineyi kompozit numuneden çıkarmak için aşağıdaki prosedürlerin uygulanması gerekir:

1. Yaklaşık 20 x 20 mm²'lik her bir kompozit numune hazırlanır ve Şekil 3.5.'te gösterildiği gibi 50 mL %70 nitrik asit içeren farklı bir behere yerleştirilir.



Şekil 3.5. Kompozit Numuneler, 50 mL %70 nitrik asit içeren bir behere yerleştirildi.

2. Beherler, 40°C kontrollü ve sabit sıcaklıktaki bir sıcak plaka üzerine yerleştirilir ve matris sindirimi (digestion) tamamlanana kadar beklenir. Kılavuza göre maksimum bekleme süresi altı saattir.
3. Şekil 3.6., yıkamadan önce nitrik asitle sindirilmiş (digested) kompoziti göstermektedir. Beherler ocaktan alındıktan sonra soğumaya bırakılır. Daha

sonra içeriği filtrelemek için 17 kPa vakum uygulanır ve nitrik asidi çıkarmak için su ile üç defadan fazla yıkanır.



Şekil 3.6. Yıkamadan Önce Nitrik Asitle Sindirilmiş Kompozitler İçeren Beherler

4. Bir sonraki adım ise, yıkanan numuneleri bir saat boyunca 100°C sıcaklıktaki bir fırına koymaktır. Bu adım, Şekil 3.7. 'de gösterildiği gibi numunelerin kurutulması için kullanılır.



Şekil 3.7. Hacim İçeriklerinin Hesaplanmasında Kullanılan Yıkanmış Numunelerin ve Kurutulmuş Liflerin Kurutulmasında Kullanılan Fırın

5. Son adım, kurutulmuş elyafın oda sıcaklığında soğutulması ve 0.0001g kalibre edilmiş bir cihazla ağırlığının ölçülmesidir. Daha sonra, elyafın ağırlık içerikleri ve kompozit ve elyafın yoğunlukları kullanılarak elyaf hacim oranı hesaplanır.

Buna göre elyaf hacmi oranını Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanır ve BE için yaklaşık %57, CE için %59, CE için %61, BGE için %58 ve BCGE hibrit kompozitler için %59'dur.

$$V_f = \left(\frac{M_{sf}}{M_{si}} \right) \times \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right) \times 100\% \quad (3.3)$$

Burada, V_f – yüzde olarak elyaf hacim oranıdır,

M_{si} – Numunenin başlangıç kütlesi,

M_{sf} – Parçalamadan sonra numunenin son kütlesi,

ρ_s – Ölçülen numunenin yoğunluğu ve

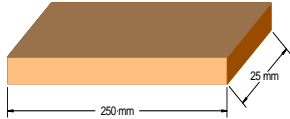
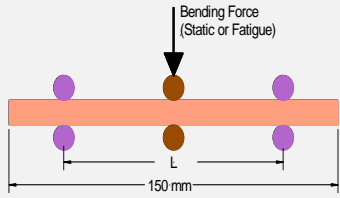
ρ_f – elyafın yoğunluğu.

3.1.4. Kompozit numunelerin kesilmesi

Kompozit numuneler, üretilen kompozit levhaların ASTM gerekliliklerine uygun olarak kesilmesiyle hazırlanır. Kompozit kesim, Ek A1'de gösterilen PST 650 dekupaj testeresi kullanılarak, ek fikstürler ve kılavuz plakalar ile yapılır. Numuneler iki ASTM standardına göre kesilmiştir: çekme numuneleri için ASTM D3039-08 (Standard) ve statik ve yorulma eğilme numuneleri için ASTM D7264-15 (Standard). Hazırlanan numune sayısı ve boyutları Çizelge 3.3.'te gösterilmiştir.

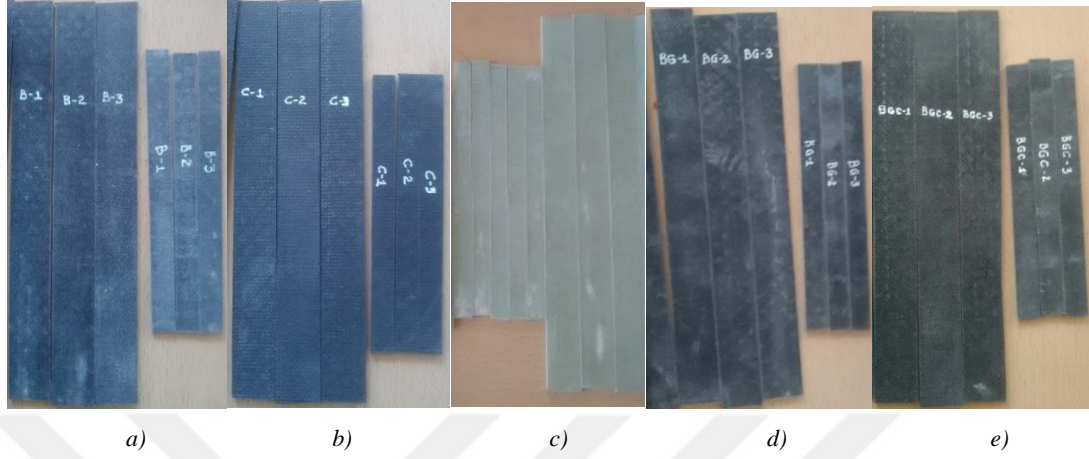
Çizelge 3.3.' de bu çalışma için gerekli toplam numune sayısını göstermektedir. Çekme testi, tezde ele alınan her bir kompozit konfigürasyonundan 15 numune, üç tekrar gerektirir. Ayrıca dört farklı çevresel koşul vardır: normal/şartlandırılmamış, iki aylık şartlandırılmış, dört aylık şartlandırılmış ve altı aylık şartlandırılmış numune. Bu yüzden çekme testleri için toplam 60 numune ihtiyacımız var. Benzer şekilde, statik eğilme testi için 60 numune ihtiyaç vardır.

Çizelge 3.3. Test Numunesinin Boyutu ve Miktarı

Test Türleri	Numune Sayısı	Numune boyutu			Şematik diyagram
		Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)	
Çekme	60	25	250	3,5±0,2	
Statik 3-Noktalı Eğilme	60	12,5	150	3,5±0,2	
Eğilme Yorulması	240	12,5	150	3,5±0,2	

Bununla birlikte, eğilme yorulması, her bir konfigürasyondan şartlandırılmamış 12 numuneye ihtiyaç duyar. Beş farklı kompozit (BE, CE, GE, BGE ve BCGE) için, 60 şartlandırılmış numune gereklidir, yani, toplam 180 tuzlu suyu şartlandırılmış kupon numune gereklidir. Bu nedenle, beş tip kompozitin yorulmasını test etmek için toplam

240 numune yapılmıştır. Şekil 3.8. örnek olarak hazırlanan numunelerin fotoğrafını göstermektedir. En uzun olanı çekme, daha kısa olanı ise eğilme numuneleridir.



Şekil 3.8. Hazırlanan Numunelerin Kısmi Görünümü (a) BE (b) CE (c) GE (d) BGE (e) BCGE

3.1.5. Kompozit numunelerin tuzlu suda şartlandırılması

Bu çalışmanın temel amaçlarından biri, hibrit kompozitlerin tuzlu su koşulları altında mekanik ve yorulma özelliklerini değerlendirmektir. Test numunelerinin hazırlanmasının ardından, tuzlu su çözeltilerine ne kadar süreyle daldırıldıklarına bağlı olarak normal/şartlandırılmamış, iki aylık, dört aylık ve altı aylık şartlandırılmış test numuneleri olarak kategorize edildiler. Tuzlu su çözeltisi, Şekil 3.9. (a)'da gösterilen kristal deniz tuzu kullanılarak hazırlanır.



Şekil 3.9. a) Kristal Deniz Tuzu ve b) Tuzlu suya batırılmış numuneleri içeren kavanozlar

Daha sonra, üç grup kompozit numune Şekil 3.9. (b)'de gösterildiği gibi iki ay, dört ay ve altı ay boyunca %6'lık tuzlu suya (yani 100 gr suya 6 gr tuz eklenir) daldırıldı. Farklı araştırmacıların tavsiyelerine göre yaşlanmayı hızlandırmak için burada tuz

konsantrasyonu iki katına çıkarıldı (Wei ve ark., 2011; Ulus ve ark., 2019; Sukur ve Onal, 2021). Çözeltiyi homojen hale getirmek için tuz konsantrasyonu önceden belirlenmiş aralıklarla manuel olarak karıştırılır. Tuzlu suya daldırılmadan önce ve sonra tüm numunelerin ağırlıkları Çizelge 3.4. 'te gösterildiği gibi ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Çizelge 3.4. Kompozit Numunenin Ağırlık Kazanımı

Kompozit Numune Tipi	Normal Numune Ağırlığı, M_0 (gr)	2-Aylık Numunenin Ağırlığı, M_1 (gr) (Ağırlık artış yüzdesi, M_g (%))	4-Aylık Numunenin Ağırlığı, M_1 (gr) (Ağırlık artış yüzdesi, M_g (%))	6-Aylık Numunenin Ağırlığı, M_1 (gr) (Ağırlık artış yüzdesi, M_g (%))
BE	35,67	36,88 (%0,340)	37,07 (%0,393)	37,63 (%0,550)
CE	35,58	36,39 (%0,228)	36,48 (%0,251)	36,48 (%0,251)
GE	35,07	35,52 (%0,129)	35,52 (%0,129)	35,64 (%0,163)
BGE	37,61	37,66 (%0,012)	37,97 (%0,095)	37,98 (%0,098)
BCGE	35,17	35,77 (%0,171)	36,30 (%0,320)	36,30 (%0,320)

Rajan R. ve arkadaşlarına göre, şartlandırılmış numunenin yüzde ağırlık artışının Denklem (3.4) kullanılarak hesaplanmıştır (Rajan ve ark., 2014).

$$M_g = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (3.4)$$

Burada, M_g – ağırlık artış yüzdesi, %,

M_1 - gr cinsinden belirli bir süre tuzlu suya daldırıldıktan sonra kompozit numunenin kütlesi,

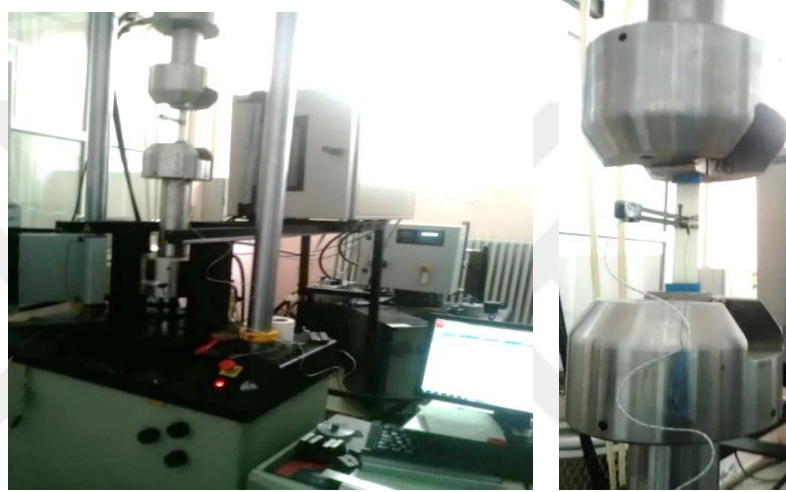
M_0 - gr cinsinden daldırılmadan önceki kompozit numunenin kütlesidir.

3.2. Test Kurulumu

Bu alt bölüm, tezde gerçekleştirilen tüm testlerin test koşullarını açıklamaktadır. Test türleri, kullanılan makine ve uygulanan test parametreleri tartışıldı. Bu çalışmada yapılan testler, çekme, statik üç nokta eğilme ve üç nokta eğilme fikstürleri altında eğilme yorulmasıdır.

3.2.1. Çekme test koşulları

Beş kategorinin tamamındaki çekme numuneleri, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi üniversal test cihazı (Instron 8801) kullanılarak test edildi. Çekme testi, ASTM D3039 (Standard) standardına göre 2 mm/dk. çapraz kafa hızıyla gerçekleştirilir. Toplam 60 numune test edildi ve bunlardan 15'i tuzlu su çözeltisi kullanılarak çevresel şartlandırmaya tabi tutulmadan analiz edildi. Ek olarak, sonuçların tekrarlanabilirliğini göstermek için her kategoriden üç numune test edildi.



Şekil 3.10. Çekme numunesinin geometrisi ve Instron 8801 Üniversal Test Cihazı

ASTM 3039-08'e göre (Standard), çekme gerilmesi, çekme BŞD ve çekme kirişi elastisite modülü, sırasıyla Denklemler (3.5) ila (3.7) kullanılarak hesaplandı.

$$\sigma_i = \frac{p_i}{A} ; F^{ut} = \frac{p^{max}}{A} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \quad (3.6)$$

$$E^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.7)$$

Burada, σ_i – i. veri noktasındaki çekme gerilme, MPa;

p_i – i. veri noktasındaki kuvvet, N;

A – ortalama kesit alanı, mm²;

F^{ut} – nihai çekme mukavemeti, MPa;

p^{max} – hasardan önceki maksimum kuvvet, N;

ε_i – i. veri noktasındaki BŞD, mm/mm;

δ_i – i. veri noktasında ekstansometre yer değiştirilmesi, mm;

L_g – ekstansometre ölçer uzunluğu, mm;

E^{chord} – çekme kirişi elastisite modülü, GPa;

$\Delta\sigma$ – iki birim Şekil değiştirme noktası (0,001 & 0,003) arasındaki uygulanan gerilme farkı, MPa;

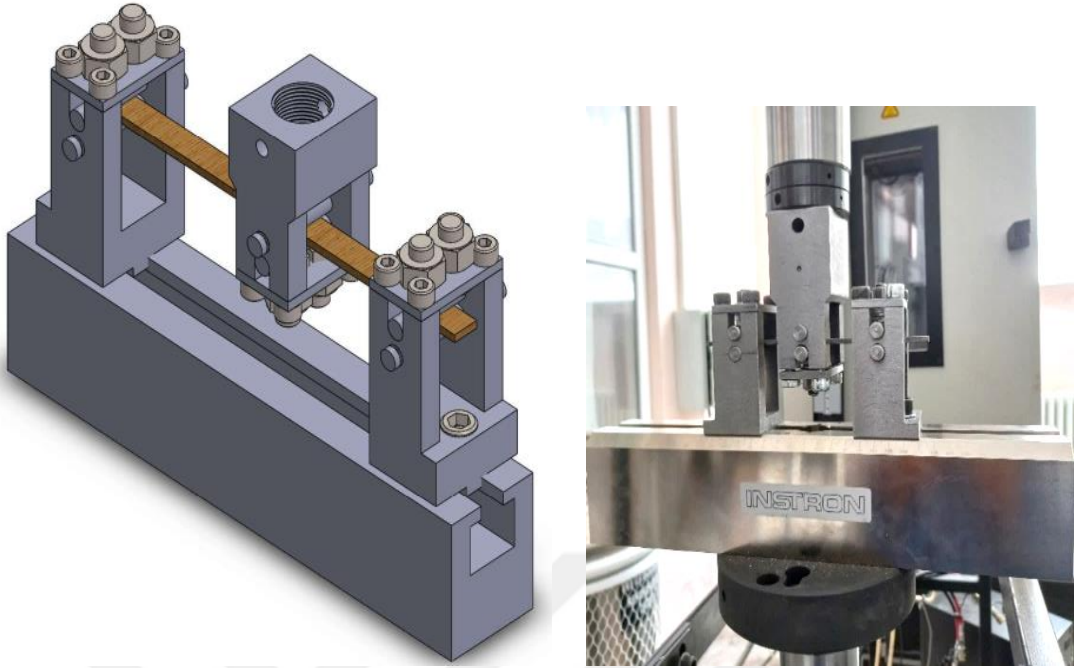
$\Delta\varepsilon$ – iki birim Şekil değiştirme noktası (0,001 ve 0,003) arasındaki fark, mm/mm, (nominal olarak 0,002).

3.2.2. Eğilme test koşulları

Benzer Şekilde, statik üç noktalı eğilme testi, Instron 8801 UTM kullanılarak 1 mm/dk. çapraz kafa hızında gerçekteşirilmiş. Ancak, bu makinedeki fikstür, ASTM 7264-17'ye göre kompozitlerin test edilmesi için uygun değildir. Sonuç olarak, özel üç noktalı eğilme fikstürü, KTUN'un Makine Mühendisliği bölümü imalat laboratuvarında tasarlanmış ve üretilmiştir. Fikstür, üç noktalı yükleme altında plastiklerin yorulması için bir standart olan ASTM D7774-12'ye göre tasarlanmıştır (International, 2012). Bu nedenle, fikstür yükleme burnunu ve destek burnunu üst ve alt taraflarda destekler.

Fikstürü, Şekil 3.11.'de görüldüğü gibi iki alt destek ve bir üst destek olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır. Alt destek, numuneyi rulo ile uç desteklerde sabitlemeye yardımcı olur ve üst destek, kuvveti uygulamak için kullanılır. Bu fikstürün detaylı çizimleri Ek A2'de sunulmaktadır ve aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- ✓ İzin verilen maksimum numune genişliği 30 mm'dir.
- ✓ Sistemde kabul edilebilir maksimum numune kalınlığı 10 mm'dir.
- ✓ İzin verilen maksimum sapma 25 mm'dir.
- ✓ Fikstür ile izin verilen maksimum spam uzunluğu 180 mm'dir.
- ✓ Destekteki silindir çapı ve kuvveti 10 mm'dir.
- ✓ Detay boyutu ekte verilmiştir.



Şekil 3.11. Özel üç noktalı eğilme aparatı: a) Tasarım, b) İmalat

ASTM 7264-17'ye göre destekler, numuneyi yerinde tutmak için minimum basınç kullanarak numuneyi destekler. Numune, test sırasında uçların desteklerden kaymaması için yeterince uzun olmalıdır.

Ayrıca, burada kullanılan numune genişlik-kalınlık oranı 32:1'dir ve numunelerin genişliği 12,5 mm'dir. Sonuç olarak, tuzlu suda ön şartlandırılmış 45 numune ile altmış numunesi test edildi. Sonuçların tekrarlanabilirliğini göstermek için her kategoriden üç numune test edildi. Eğilme gerilme, eğilme birim şekil değiştirme ve kiriş eğilme elastisite modülü, ASTM standardına göre sırasıyla Denklemler (3.8) ila (3.10) kullanılarak hesaplanır (Standard).

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^3} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (3.9)$$

$$E_f^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.10)$$

Burada, σ – Orta açıklığın dış yüzeyindeki gerilme, MPa;

P – uygulanan kuvvet, N;

L – destek aralığı, mm;

b – numunenin genişliği, mm;

h – numunenin kalınlığı, mm;

ε – dış yüzeyde maksimum birim şekil değiştirme, mm/mm;

δ – orta açıklıklı sapma, mm;

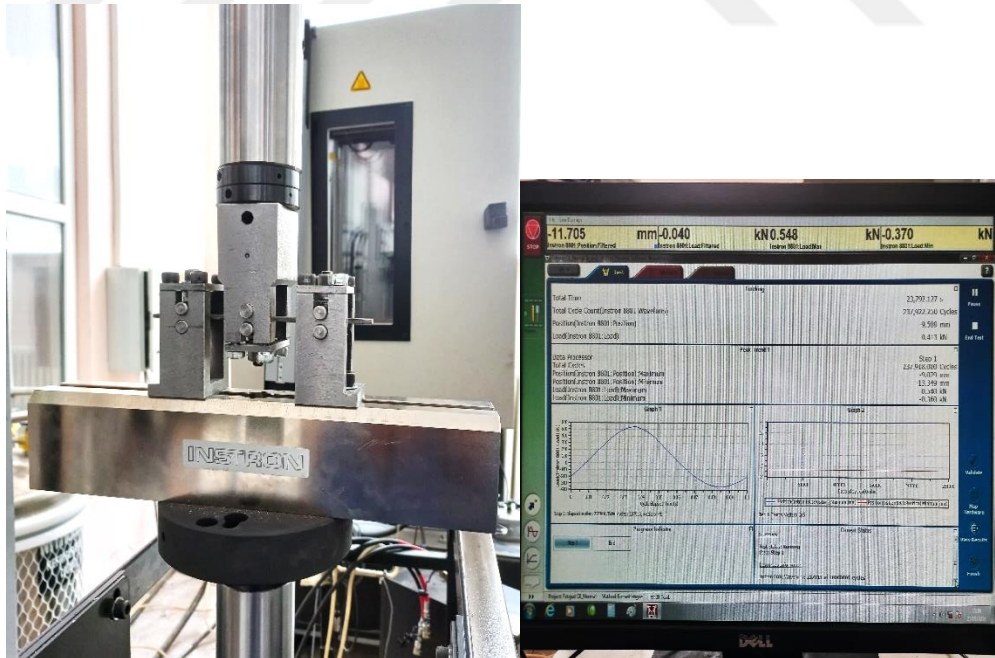
E_f^{chord} – eğilme kirişi elastisite modülü, GPa;

$\Delta\sigma$ – seçilen iki birim şekil değiştirme noktası arasındaki eğilme gerilme farkı (0,001 & 0,003), MPa;

$\Delta\varepsilon$ – seçilen iki birim şekil değiştirme noktası arasındaki fark (0,001 ve 0,003), mm/mm, (nominal olarak 0,002).

3.2.3. Eğilme yorulma test koşulları

Eğilme yorulma testi, Şekil 3.12'da gösterildiği gibi Instron 8801 üniversal test makinesinde tamamen ters yükleme koşuluna izin veren özel olarak tasarlanmış üç noktalı bir eğilme fikstürü kullanılarak gerçekleştirilir. Tamamen tersine çevrilmiş bir eğilme yorulma testi, çekme-basma yorulma hasarı modellerini doğrular (Amiri ve Cavalli, 2013).



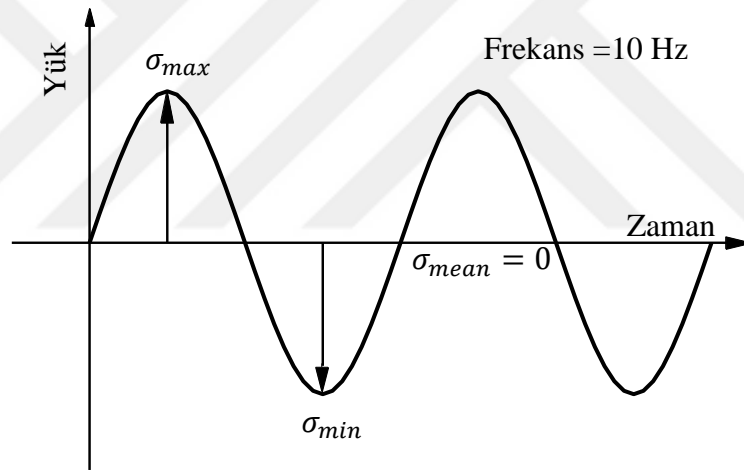
Şekil 3.12. Üç Nuktada Eğilme Yorulma Testi Kurulumları

Hibrit kompozit numuneler ASTM D7264-17 (Standard) ve ASTM D7774-12 (International, 2012) standartlarına göre 150 mm uzunluğa, 12,5 mm genişliğe ve 32:1

açıklık-kalınlık oranına sahip olarak hazırlanır. Destek ve yükleme burnunda kullanılan silindir çapı 10 mm'dir.

Standarda göre, yorulma hasarını karakterize etmek ve bazalt, karbon ve cam elyafı hibrit kompozitlerin eğilme yorulma özellikleri üzerindeki etkilerini görmek için dört bşd seviyesi (%30, %50, %70 ve %80) seçildi. Ayrıca, tuzlu su şartlandırmanın hibrit kompozitlerin yorulma özellikleri üzerindeki etkileri de bu tezde incelenmiştir. Yorulma yüklemesinden sonra hibrit kompozitlerin hasar morfolojilerini gözlemlemek için kırılma özellikleri SEM kullanılarak analiz edildi. Eğilme yorulma testi aşağıdaki koşullarla gerçekleştirildi:

- ✓ Çalışmada kullanılan periyodik yük Şekil 3.13'da gösterildiği gibi sinüzoidal bir dalga biçimidir.
- ✓ Tüm testler için frekans 10 Hz'e eşittir



Şekil 3.13. Tam Tersine Yorulma Yükleme Süresi için Temsili Yükleme Süresi Grafiği

- ✓ Gerilme oranı, R (minimum ila maksimum gerilme), tam tersine çevrilmiş modda $R = -1$ 'e eşittir.
- ✓ Maksimum çevrim sayısı (testin sonu) 2.3×10^6 çevrim sayısı olarak ayarlandı.
- ✓ Yorulma testi, %30, %50, %70 ve %80 BŞD seviyelerinde yer değiştirme (deplasman) kontrolü ile gerçekleştirilmiştir.
- ✓ Her bir BŞD seviyesi için üç numune test edildi. Bu nedenle toplam 240 adet numunesi test edilmiştir.

Standarda göre, seçilen gerilme veya BŞD seviyesinin yükü ve sapma sırasıyla Denklemler (3.11) ve (3.12) kullanılarak hesaplanır.

$$p = \frac{2\sigma bd^2}{3L} \quad (3.11)$$

$$\delta = \frac{2\varepsilon L^2}{6d} \quad (3.12)$$

Burada, p – N cinsinden yük,

σ – MPa'da eğilme gerilme

b – numunenin mm cinsinden genişliği

L – destek açıklığı, mm,

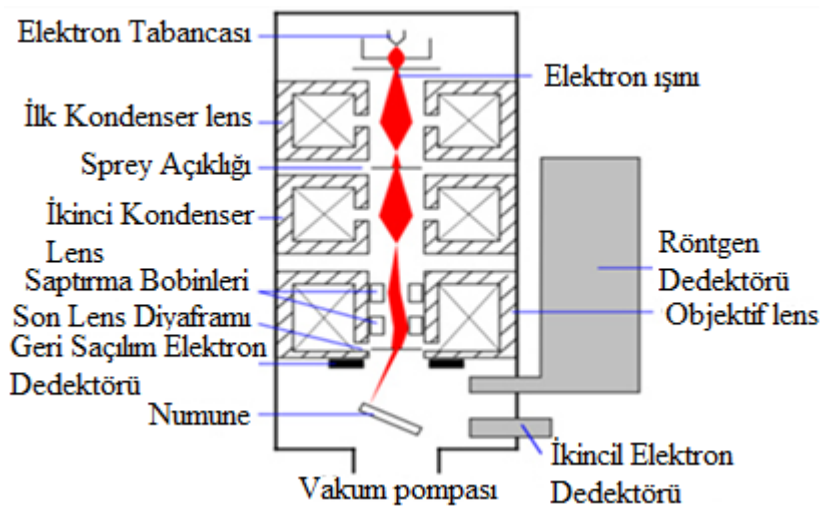
d – mm cinsinden numunenin derinliğidir

ε – mm/mm cinsinden BŞDdir, ve

δ – mm cinsinden orta nokta sapması.

3.2.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

SEM analizi, bir malzemenin morfolojisinin ayrıntılı, yüksek çözünürlüklü görüntülerini oluşturmak için odaklanmış bir elektron ışını kullanan oldukça etkili bir analitik tekniktir¹. Literatürde açıklandığı gibi, SEM analizi, bir kompozit malzemenin kırık, delaminasyon, bağ ayrılması ve diğer hasarlarının yüksek çözünürlüklü bir görüntüsünü sağlar. SEM'in çalışma prensibini gösteren şematik diyagramı Şekil 3.14. 'te gösterilmiştir².



Şekil 3.14. SEM 'in Şematik Diyagramı³

¹ <https://labtesting.com/services/materials-testing/metallurgical-testing/sem-analysis/>

² <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>

³ <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>

Üst yüzeyde oluşan elektronlar, tarama bobinleri tarafından kontrol edilen odaklanmış elektron ışınlarıyla altın boyalı numunenin yüzeyine çarpmak için mercekler ve açıklıklarla aşağı doğru hareket ediyor. Son olarak, numune ve elektron ışını arasındaki etkileşim, 2D görüntülerde algılanabilen ve gösterilebilen bir sinyal oluşturur.

Bu çalışmada, test sonrası statik eğilme ve yorulma numunelerinin hasar davranışlarını analiz etmek için SEM kullanılmıştır. Ayrıca, tuzlu suyun hasar modları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Analizi yapmak için Şekil 3.15'te gösterildiği gibi ZEISS Evo LS 10 model SEM kullanılmıştır.



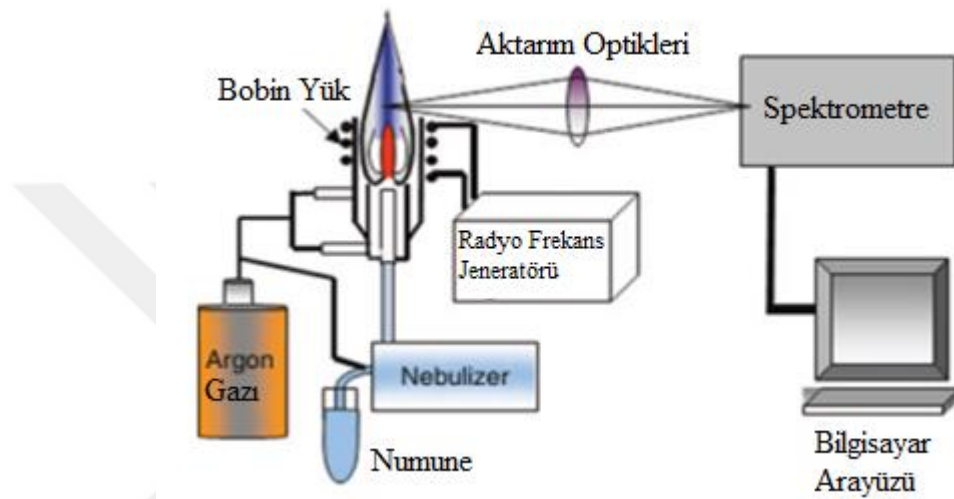
Şekil 3.15. Çalışmada kullanılan SEM (İLTEK Selçuk Üniversitesi⁴)

3.2.5. Endüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektroskopisi (ICP-OES) analizi

ICP-OES, numuneyi hızla eritmek, buharlaştırmak ve atomize etmek için endüktif bir birleştirme işlemi yoluyla argonu 6000K-10000K sıcaklıkta ısıtır. Şekil 3.16., ICP-OES'in şematik diyagramını göstermektedir. Plazmalı şaloma, metal bir bobin içinde ortalanmış üç açık uçlu kuvars veya seramik boruya sahiptir. Merkez ve dış tüpler argon ile doldurulur. Yük bobini radyo frekansı gücü olarak 27 veya 40 MHz'de salınan bir manyetik alan oluşturur. Elektron-argon nötr çarpışmaları Joule ısınmasına ve ikincil argon iyonları ve elektronlarına neden olur. Argon akışının yüzde biri iyonlara dönüştürülür. Radyofrekans alanı uygulandığı sürece plazma stabil ve kendi kendini

⁴ https://www.selcuk.edu.tr/Birim/ileri_teknoloji_arastirma_ve_uygulama_merkezi-aum

idame ettirir. Numuneye temas eden merkezi kanal, yaklaşık yüzde 0,1 argon iyonu içerir. Meşale malzemeyi desolvate eder, atomize eder ve iyonize eder. Elektronlar tarafından emilen termik enerji onların "uyarılmış" durumunu yükseltir (Rutzke, 2018). Elektronlar alt seviyesine geri döndüğünde, ışık serbest bırakılır (fotonlar). Bir spektrometre, emisyon spektrumunu ölçer. Dalga boyu ışık yoğunluğu ölçülür ve bir konsantrasyona kalibre edilir⁵.



Şekil 3.16. Atomic Absorpsiyon, Endüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma Optik Emisyon (ICP-OES)(Rutzke, 2018)

Bu çalışmada, bir tuzlu su çözeltisindeki elementlerin konsantrasyonunu belirlemek için PERKİN ELMER / ICP-MS ELAN DRC-E model olan ICP-OES kullanılmıştır; bu cihazla yapılan testler, kompozitin hasar mekanizmasını ve su emme davranışını tartışmada önemlidir.

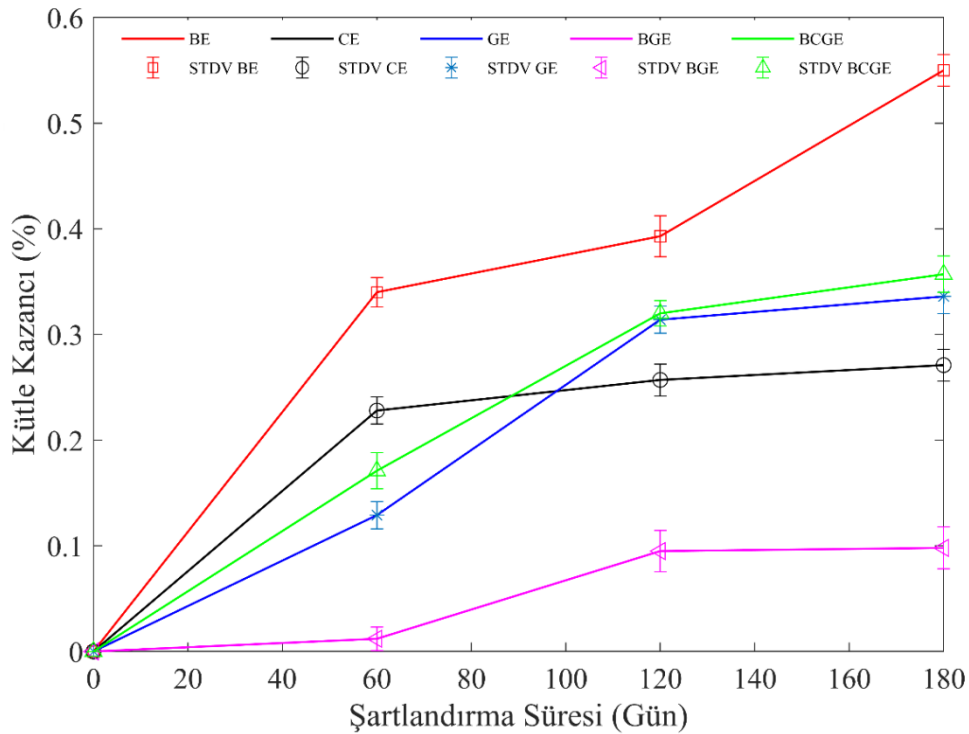
⁵ <https://www.ru.nl/science/gi/facilities-activities/elemental-analysis/icp-oes/>

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölüm, çekme, statik eğilme ve üç nokta eğilme yorulma testi sonuçlarını ele almaktadır. Ayrıca, deneysel sonuçların yorumlanması ve tartışılması sunulmuştur. Tuzlu suyun BE, CE, GE, BGE ve BCGE kompozitlerinin mekanik ve yorulma özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve tartışılmıştır. Testten sonra, hasar modları ve morfoloji SEM kullanılarak analiz edildi ve bu bölümde yorumlanmıştır.

4.1. Tuzlu Suyu Şartlandırmasından Sonra Numunelerin Ağırlığı

Tuzlu suyun cam ve karbon fiber ile hibritlenen bazalt fiberin çekme, eğilme (statik ve yorulma) özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi bu çalışmanın odak noktalarından biridir. Bu bağlamda numunelerin ağırlığı artışı düzenli olarak ölçülerek ve kayıt altına alınarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, tüm kompozit numuneler için su absorpsiyonu, Şekil 4.1'de ağırlığı artışı yüzdesi (%) cinsinden ifade edilmektedir.



Şekil 4.1. Kompozit numunelerinin kütle kazancı yüzdesi

Çoğu numunenin ağırlığı, önceki çalışmalara benzer şekilde, şartlandırma süresi ile artar (Jesthi ve Nayak, 2019). Artan şartlandırma süresi ile epoksi reçinenin plastikleşmesi meydana gelir ve bu da polimer zincirlerinin bağlarının zayıflamasına katkıda bulunur. Bu fenomen, kompozitlerde mikro boşluklara, çatlaklara ve gözenek

oluşumuna yol açar. Bu nedenle ağırlığı artışın temel nedeni, su moleküllerinin polimer matrisli kompozitlerin mikro boşluklarından, çatlaklarından ve deliklerinden girerek kütle kazancına yol açmasıdır (Chakraverty ve ark., 2015; Živković ve ark., 2017; Şükür ve Önal, 2021).

İki aylık şartlandırılmış numuneler için ağırlık kazancındaki maksimum ve minimum yüzde artışları BE kompozitleri için yüzde 0,34 ve BGE kompozit numuneleri için yüzde 0,012'dir. Dört aylık ve altı aylık şartlandırılmış numuneler için en yüksek ağırlık kazancı yüzdesi BE Composite numunesi için %0,393 ve %0,550 olarak kaydedilmiştir. Bununla birlikte, minimum ağırlık artış yüzdesi, 4 aylık ve 6 altı şartlandırılmış BGE numuneleri için sırasıyla %0,095 ve %0,98'dir. Bunun nedeni, hibrit olmayanlara kıyasla ağırlık kazancının azaltılmasına katkıda bulunan hibrit kompozitlerin fiber-matris arayüzü olabilir. Genel olarak bazalt/Epoksi, diğer kompozit numunelere göre daha yüksek su emme özelliğine sahiptir.

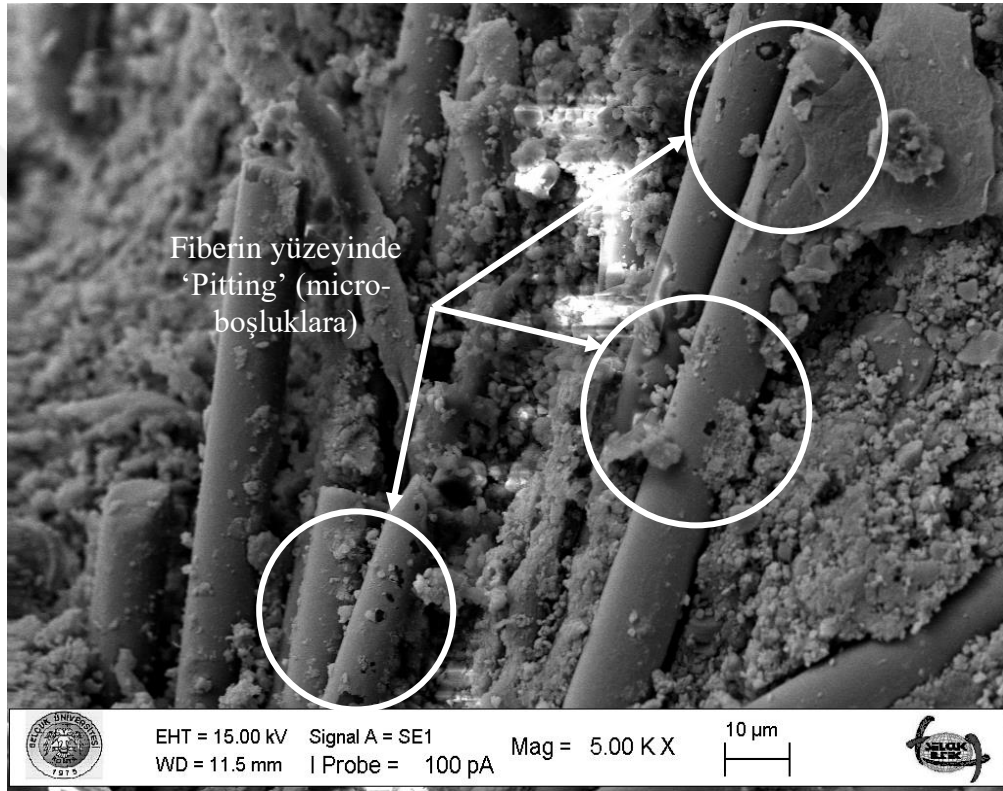
4.2. Endüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES) Analizi

ICP-OES analizi, kompozitlerin dört ve altı aylık şartlandırılmasından sonra tuzlu su çözeltisindeki element konsantrasyonunu belirlemek için Selçuk Üniversitesinde İLTEK'te gerçekleştirildi. Analiz, bir tuzlu suyu çözeltisindeki dağınık elementin kompozit elyafların yapısından difüze olup olmadığını belirlemek için yapıldı. ICP-OES analizinin sonuçları Çizelge 4.1.'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1. ICP-OES analizi sonuçlar

Kompoziti	Ölçüm Ayı	Element Konsantrasyonu [ppm (mg/L)]			
		Ca	K	Mg	Na
BE	4.	95,55	24,75	42,15	23685
	6.	96,05	26	40,2	23225
CE	4.	102,4	24,95	44,05	23200
	6.	96,9	25,9	42	22920
GE	4.	103,8	26	45,95	24105
	6.	94,7	25,25	41,2	22115
BGE	4.	92,3	29,9	50,45	23790
	6.	86,9	28,8	48,3	22845
BCGE	4.	92,05	25,15	44,25	22940
	6.	87,75	25,3	42,8	22295

Kompozit şartlandırmanın başlangıcında, su çözeltisi sadece Na ve Cl içerir. Ancak 4. ve 6. ayların sonunda sulu çözeltide Na iyonunun yanı sıra Ca, K ve Mg iyonları da bulunmuştur. ICP-OES analizinin sonuçları, kompozitlerin elementlerinin tuzlu su çözeltisinde yayıldığını ve bunun da kompozit malzemenin daha fazla su emmesine neden olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, eğilme ve çekme testleri altında, kompozit tabakanın yüzeyi, mekanik özelliklerde bir azalmaya işaret eden mukavemette bozulma belirtileri gösterir.



Şekil 4.2. Şartlandırılmış kompozit numunenin SEM görüntüsü, fiber yüzeyinde 'pitting' (mikro delikler) gösterir.

Ayrıca, BE kompoziti için şartlandırma zaman ile birlikte Ca iyonunun konsantrasyonu bir artış gösterirken, diğer kompozitler için bir azalma göstermektedir. Potasyum (K) iyonu BE, CE ve BCGE hibrit kompozit için şartlandırma süresi ile birlikte bir artış gösterir; ancak GE ve BGE hibrit kompozit için bir azalma gösterir. Öte yandan, Na ve Mg iyonları tüm kompozitler için şartlandırma zaman ile bir azalma göstermektedir.

Kompozit numunelerin uzun bir süre tuzlu suya daldırılmasının bir sonucu olarak, yukarıda tartışıldığı gibi elyaf elementleri transfer eder. Bu nedenle, iyonların göçü

fiberin yüzeyinde mikro delikler (çukurlaşma) oluşturacaktır. Çukur oluşumu fenomeni, yüksek çözünürlüklü SEM altında gözlemlenir ve görüntüler Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Önceki çalışmalara benzer şekilde (Chakraverty ve ark., 2015; Živković ve ark., 2017; Şükür ve Önal, 2021), polimer fiber kompozitler bir tuzlu su çözeltisine daldırıldığında oluşan ana kusur çukurlaşmadır. Bu, tuzlu su ile şartlandırılmış kompozit numunelerin mekanik özelliklerinin azalmasının nedenlerinden biri olabilir.

4.3. Çekme Testi Sonuçları

4.3.1. Elyaf türlerinin çekme özelliklerine etkisi

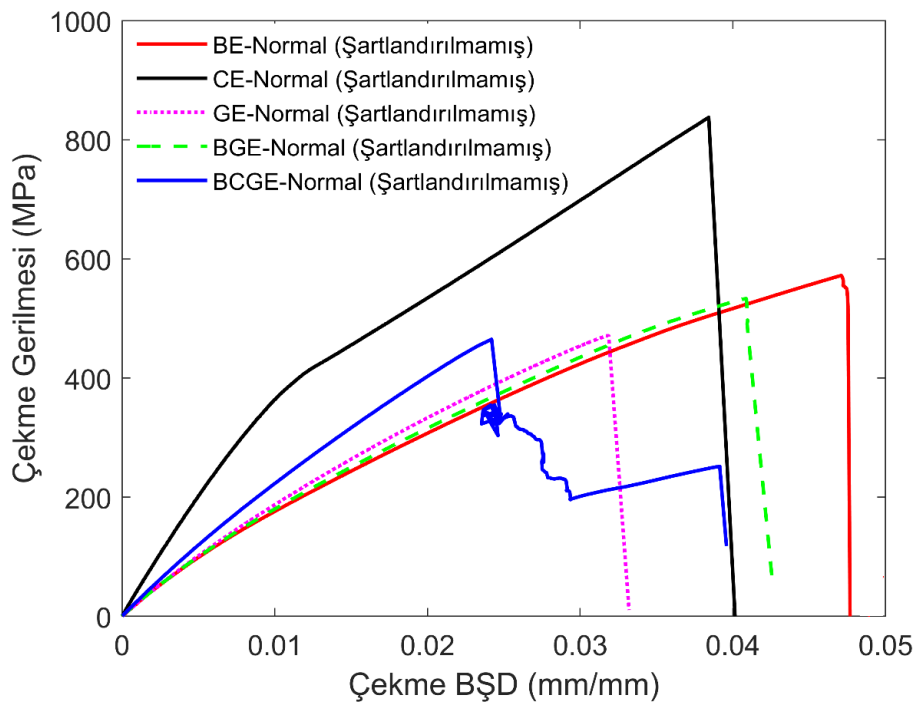
Şekil 4.3., BE, CE, GE, BGE ve BCGE kompozitlerinin şartlandırılmamış/ normal numunelerinin çekme testi sonuçlarını (gerilme-BŞD diyagramı) göstermektedir. Beklendiği gibi en yüksek değerler, CE kompozit numunesinin nihai çekme mukavemeti (837,43 MPa) ve elastisite modülüdür (39,52 GPa). Bununla birlikte, BE'nin kopmasındaki uzama yüzdesi diğerlerinden daha iyi çıkmıştır. Bu da daha iyi süneklik ve bütünlük olduğunu gösterir. Numunelerin çoğunda ölçüm alanında hasar oluşmuştur. Hasarlarda delaminasyon, ayrılma, patlamalar ve yanal hasarlar gözlemlenmiştir. Bazı numunelerde farklı yerlerde çok modlu bir hasar gözlemlenmiştir.

BCGE hibrit kompozitinin gerilme-bşd diyagramı, ani bir hasardan ziyade kademeli bir hasara gösterir. Bu özellik, önceki çalışmalarda belirtildiği gibi, hibrit kompozitlerin psödo-süneklik (pseudo-ductility) davranışı olarak bilinir. Karbon fiber gibi yüksek modüllü elyafını delaminasyonu ve parçalanması sonucunda maksimum özellikten bir düşüşle çekme özelliği ve bazalt gibi yüksek birim şekil değiştirmeli elyaf nedeniyle çekme özelliği geri kazanma eğilimi gösterir. Sonuç olarak, psödo-sünek davranış elde edilebilir. Psödo-süneklik, yapının veya parçanın hasar lanmasından önce uyarı veren önemli bir özelliktir.

BE'nin elastisite modülü en düşüktür. BGE hibrit kompozit, önceki çalışmalara benzeyen GE ve BCGE hibrit kompozitten daha iyi bir yüzde uzama ve nihai çekme mukavemeti gösterir (Sapuan ve ark., 2020). Bu nedenle BGE hibrit kompozitinin GE kompozitine göre daha iyi sünek davranış gösterdiği söylenebilir. Bu, bazalt elyafın cam kompozitlere eklenmesiyle sağlanabilir. Şekilden, BCGE hibrit kompozitinin GE, BE ve BGE'den daha yüksek bir modülle sonuçlandığı fark edilebilir; bununla birlikte, kopmada

en kötü nihai çekme mukavemetini ve uzamayı gösterir. Bunun ana nedeni, özellikle karbon ve cam elyafları arasındaki ara yüzey bağlarında, farklı elyaf arasındaki zayıf ara yüzey bağları olabilir.

Çizelge 4.2, tüm kompozit numunelerin çekme testi sonuçlarının özetini göstermektedir. UTS sonuçlarını, elastisite modülünü ve tüm kompozitlerin çekme yüküne maruz kaldığında kopma uzamasını gösterir. CE kompozit numunesinin UTS'si BE, GE, BGE ve BCGE numunelerinin UTS'sinden sırasıyla %32,05, %43,33, %37,25 ve %46,55 daha yüksektir. BGE hibrit kompozitleri, GE ve BCGE kompozitlerinden daha iyi UTS gösterir. Başka bir deyişle, BGE'nin UTS'si, GE ve BCGE kompozitinden sırasıyla %9,7 ve %14,82 daha yüksektir. Bunun ana nedeni, BGE kompozitlerinde bazalt elyafını daha yüksek hacimli içeriğidir.



Şekil 4.3. Normal/şartlandırılmamış Numunelerin Gerilme-BŞD Diyagramı

CE kompozitlerinin modülü, tüm kompozit numunelerden yaklaşık %50 daha yüksektir. CFRP hibrit numunesi (BCGE), numunelerin geri kalanından daha yüksek elastisite modülüne sahiptir. Bazalt ve cam hibrit fiberlere dört karbon katmanının eklenmesi, BCGE kompozitlerinde modül iyileştirmesine yol açar. BGE kompozit numunelerine bazalt fiber ilavesi nedeniyle modülü GE ve BE kompozitlerinin modülü arasında yer alır.

Çizelge 4.2. Hibrit Kompozitlerin Çekme Testi Sonuçları

Çekme Testi Sonuçları			
Kompozit türleri	UTS (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma uzaması yüzdesi (%)
BE	569,03	20,12	4,69
CE	837,43	39,52	3,93
GE	474,49	20,32	3,27
BGE	525,46	20,22	4,01
BCGE	447,54	23,81	2,35

Çizelge, BE kompozitinin çekme uzamasının CE, GE, BGE ve BCGE kompozitlerinin uzamasından sırasıyla %45, %23, %15 ve %54 daha yüksek olduğunu göstermektedir. BE kompozitlerinin yüzde uzama ile ilgili heyecan verici özelliklerinden dolayı, BGE hibrit kompoziti BE'nin yanında daha yüksek uzama gösterir.

4.3.2. Deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması

Deneysel değerler, önceki araştırmacılar tarafından benimsenen karışım kuralı denklemleri ile kontrol edilebilir (Fragassa ve ark., 2018; Sun ve ark., 2018). Buna göre, Denklem 4.1, çekme modülü değerlerini tahmin etmek için kullanılmış ve karşılaştırma için Çizelge 4.3.'te sunulmuştur.

$$Q_p = V_{f1}Q_{f1} + V_{f2}Q_{f2} + V_{f3}Q_{f3} \quad (4.1)$$

Burada, Q_p – Tahmini değer, V_{f1} – elyaf 1'in elyaf hacim oranı, Q_{f1} – elyaf bir kompozitin ortalama deneysel değeri, V_{f2} – elyaf iki kompozitin fiber hacim oranı, Q_{f2} – elyaf iki kompozitin ortalama deneysel değeri, V_{f3} – elyaf 3'ün elyaf hacim oranı, Q_{f3} – elyaf üç kompozitin ortalama deneysel değeri.

Burada, hibrit katmanların katkısına dayalı olarak her bir fiberin hacim oranı hesaplanmıştır. Örneğin, BGE hibrit kompozit hesabında altı kat cam ve 14 kat bazalt $(6/20) * \%100 = \%30$ ve BGE'nin toplam fiber hacim oranının %70'i. Benzer şekilde, BCGE hibrit kompozit bileşenlerinin lif hacim oranı $(4/20) * \%100 = \text{cam için } \%20, (4/20) * \%100 = \text{karbon için } \%20$ ve toplamın kalan %60'ıdır. BCGE'nin hacim oranı bazalt elyafı içindir. Bu varsayımlara dayanarak ve deneyden elde edilen BE, CE ve GE

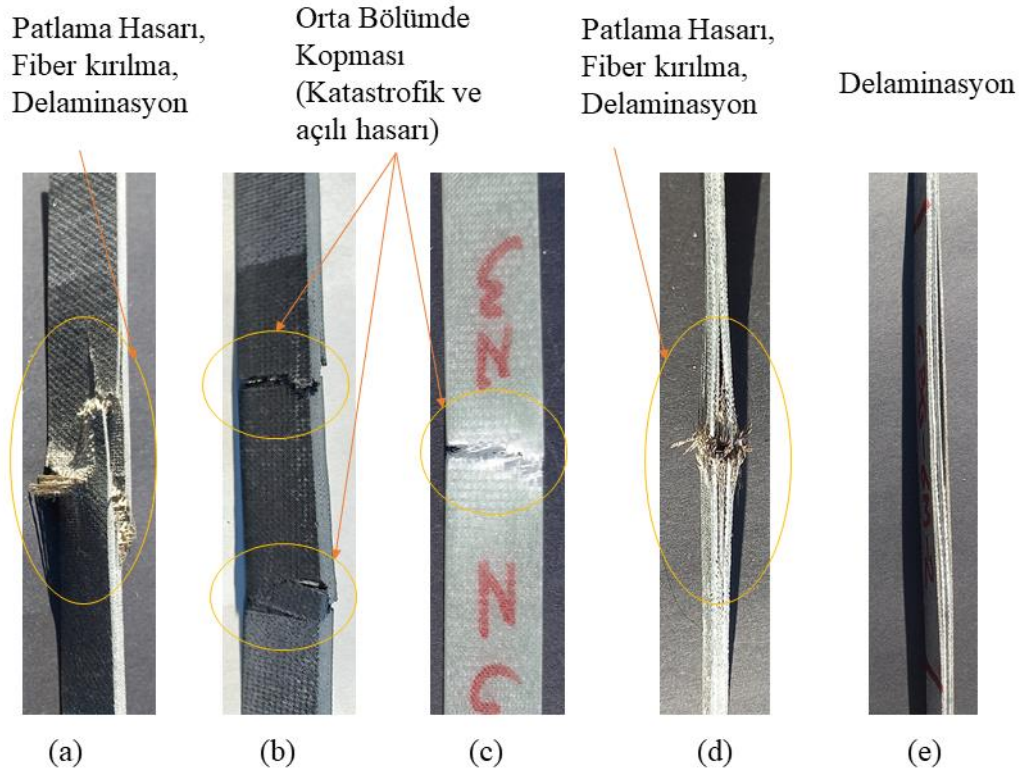
kompozitlerinin ortalama deneysel değerleri kullanılarak tahmin edilen değerler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Deneysel ve ROM Tahmini Çekme Modülü

Mekanik özellikleri	Hibrit Kompozitler			Hibrit Kompozitler		
	BGE		Fark, %	BCGE		Fark, %
	Test Sonuç	ROM Tahmini sonuç		Test Sonuç	ROM Tahmini sonuç	
Çekme Mukavemeti (MPa)	525,46	540,67	-2,89	447,54	603,80	-34,92
Elastisite Modülü (GPa)	20,22	20,18	0,20	23,81	24,04	-0,97
Eğilme Mukavemeti (MPa)	395,61	467,63	-18,20	425,72	495,53	-16,40
Eğilme Modülü (GPa)	24,40	23,93	1,94	24,71	30,68	-24,19

Çizelge 4.3. 'ten karışım kuralı tahmin yöntemi kullanılarak elde edilen sonucun BGE hibrit kompozitlerin deneysel değerlerine benzediği anlaşılabilir. Öte yandan, BCGE hibrit kompozitlerin tahmin edilen ve deneysel değerleri arasında çekme modül değerleri dışında büyük bir fark vardır. Bu fark, mikro boşlukların göz ardı edilmesinden, farklı lifler arasındaki zayıf arayüzey arayüzünden, gözeneklilikten ve ROM denklemindeki diğer üretim hatalarından kaynaklanabilir (Fragassa ve ark., 2018). Şekil 4.10. 'da (d-e) gösterilen farklı lifler arasındaki arayüzdeki delaminasyon, zayıf arayüzey arayüzünün işaretidir. Bu nedenle hibrit kompozitlerin imalatında özel dikkat gösterilmesi önerilebilir.

Şekil 4.4. çekme testi numunelerinin kırılma modlarını göstermektedir. BE ve hibrit kompozitlerinin (BGE ve BCGE) kırılma modları, patlayıcı hasarı, delaminasyon, elyaf kopması ve ölçüm alanında kırılma ile karakterize edilir. Bu tür bir hasar, BE ve mezlelerinin sünek davranışını gösterdi. Bununla birlikte, CE ve GE hasar modları, gevrek malzemelerin özellikleri olan ölçüm bölgelerindeki kırılmayı gösterir. Liflerin hibridizasyonu, kompoziti kademeli olarak hasarlı hale getirirse de, farklı liflerin zayıf arayüzey bağlarından dolayı delaminasyon, hibrit kompozitlerin belirgin bir hasar modu olarak gözlenir.



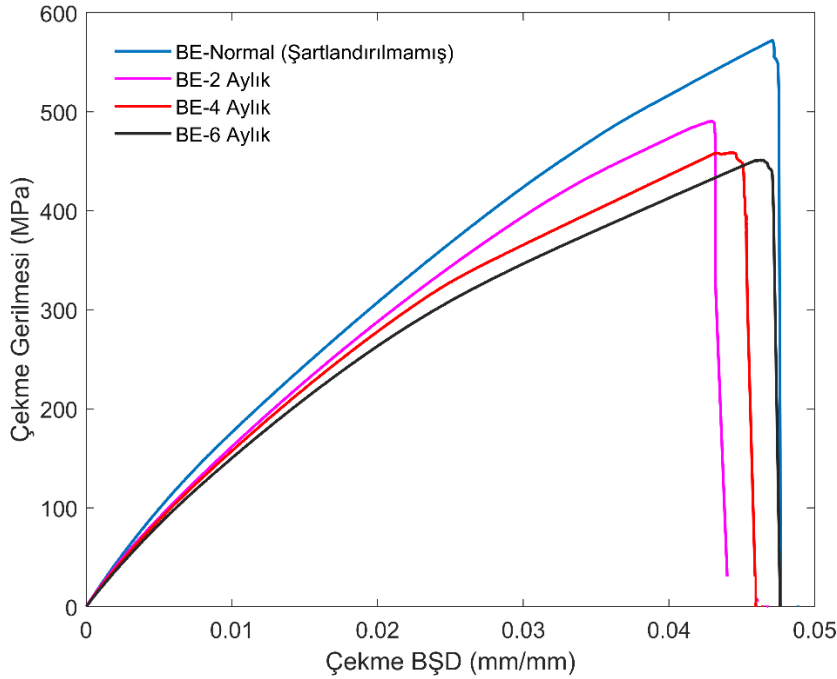
Şekil 4.4. Kompozit numunelerini çekme kırılma modları: (a) BE, (b) CE, (c) GE, (d) BGE ve (e) BCGE

4.3.3. Tuzlu suyu ortam BE kompozitlerinin çekme özelliklerine etkileri

Şekil 4.5. bazalt/epoksi (BE) numunesinin tuzlu suya bekleme süresi bir artış sonucunda mekanik özelliklerinin bozulmasını gösterir. İki, dört ve altı ay şartlandırılmış BE numunelerinin normal numunelerle birlikte çekme gerilme-BŞD diyagramı Şekil 4.5. 'te sunulmaktadır. Burada sunulan çekme sonucu, testten elde edilen ortalama çekme özelliklerine dayanmaktadır. Şartlandırma süresinin artmasıyla birlikte, BE numunesinin çekme mukavemeti ve elastisite modülü, literatürle uyumlu olarak azalma gösterir (Wei ve ark., 2011; Jesthi ve Nayak, 2019; Sükür ve Önal, 2021).

Bölüm 4.2. 'de açıklandığı gibi, ICP-OES sonucu, bazalt lifinden su çözeltisine daha yüksek Ca, K ve Mg iyonlarının transfer edildiğini ve mikro boşluklar ve gözeneklilik oluşturduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, daha yüksek su emilimi gözlemlenir, bu da BE numunelerinin daha yüksek kütle kazancına yol açar. Bu nedenle BE'nin mekanik özelliklerinin bozulmasının su alımından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca, artan su absorpsiyonuyla üretilen polimerizasyon etkisi, çekme mukavemetinin kaybından sorumludur. Polimer zincirleri arasındaki Van der Waals bağlantıları, serbest su molekülünün hareketi yoluyla emilen nem tarafından yok edilir. Artan polimer zincir

mesafeleri ve su difüzyonu için daha fazla alan, bağ bozulmasının sonuçlarıdır. Ek olarak, polimer molekülleri, arayüzey mukavemetinin bozulması nedeniyle daha serbest hareket eder (Wei ve ark., 2011; Sükür ve Önal, 2021).



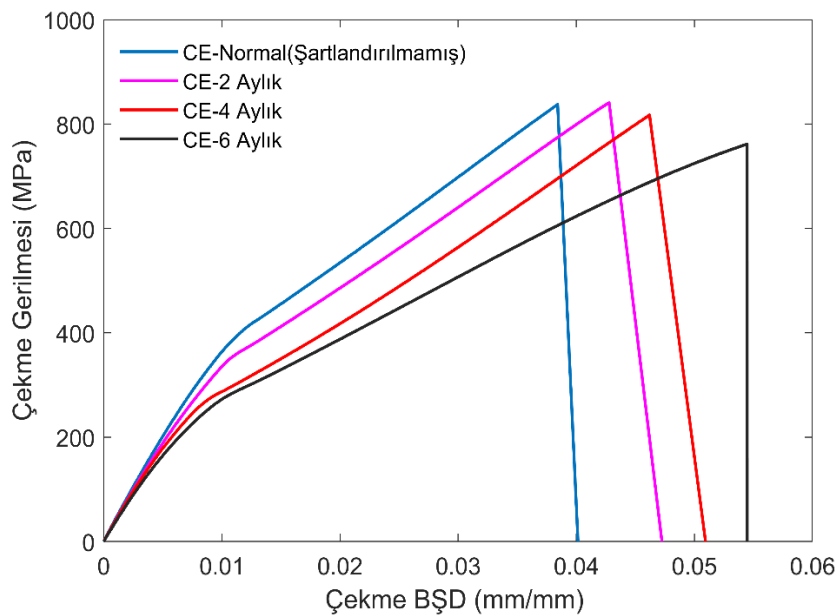
Şekil 4.5. Tuzlu Su Koşullarının BE Kompozitlerinin Çekme Özelliklerine Etkisi

2 aylık numune için çekme gerilme, elastisite modülü ve yüzde uzama azalma yüzdesindeki sırasıyla %14,28, %7,74 ve %8,81'dir. 4 aylık numune için çekme mukavemeti ve modülündeki yüzde azalma sırasıyla %19,8 ve %11,93'e yükselirken, yüzde uzaması 2 aylık numuneye göre bir gelişme göstermektedir. Altı aylık numune için çekme mukavemeti (%21,11) ve modülün (%17,12) en yüksek yüzde azalması gözlemlenmiştir. ICP-OES analizi, şartlandırma süresi arttıkça iyonların transferinde bir artış olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, iyon konsantrasyonu altı aylık şartlandırılmış numuneler için dördüncü aylık şartlandırılmış numunelere göre daha yüksektir. Şartlandırma periyodu boyunca mekanik özelliklerin azalmasının nedeni bu olabilir.

4.3.4. Tuzlu su koşullarının CE kompozitlerinin çekme özelliklerine etkileri

BE kompozitlerinin aksine, CE kompoziti, çekme mukavemetinde hafif bir değişiklik, modülde daha yüksek bir bozulma ve şartlandırma periyodu ile uzamada bir

gelişme gösterir. BE kompozit numuneleri tarafından gösterilen kütle kazancı ile karşılaştırıldığında, CE kompozitinin kütle kazancı önemli ölçüde daha düşüktür. Ayrıca, şartlandırma süresi uzadıkça iyonların hareketinde hafif bir azalma oldu. Örneğin altıncı ayda kalsiyum (Ca) iyonları 102,4'ten 94,7 ppm'e, magnezyum (Mg) iyonları ise 44,05'ten 42 ppm'ye düşmüştür. Ancak potasyum (K) iyonu altıncı ayın sonunda artış gösterir. Şekil 4.6. 'da gösterildiği gibi, iki aylık CE numunelerinin çekme mukavemeti, şartlandırılmamış numunelerin sonucunu andırmaktadır. Bununla birlikte, dört aylık ve altı aylık şartlandırılmış numuneler, çekme mukavemetinde bozulma göstermektedir. Ek olarak, yüzde azalması, altı aylık numuneler için daha yüksektir, %9,09.

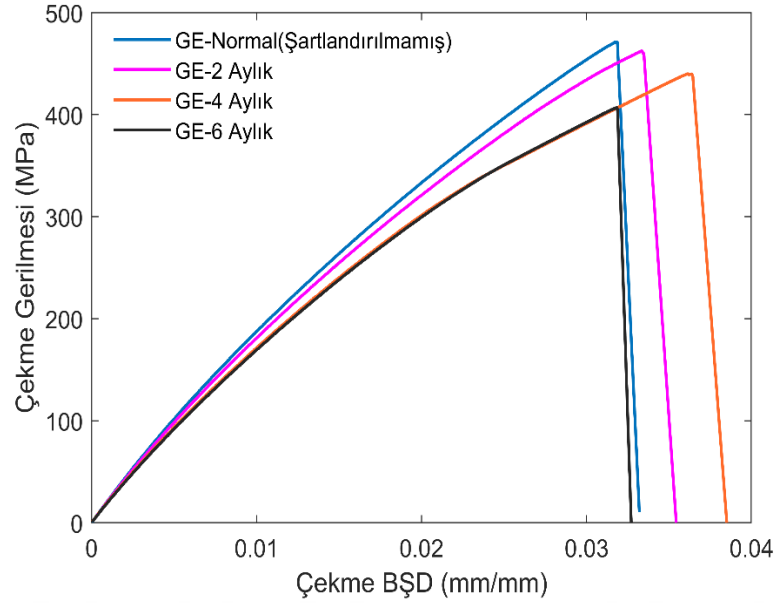


Şekil 4.6. Tuzlu Su Koşullarının CE Kompozitlerinin Çekme Özelliklerine Etkileri

Şartlandırma süresi arttıkça elastisite modülü azaldı ve uzama yüzdesi arttı. Bundan çıkarılabilecek sonuç, modülün CE'nin tuzlu su şartlandırmasından önemli ölçüde etkilendiğidir. Öte yandan, CE numunesi, şartlandırma süresi ilerledikçe sünek bir davranış sergilemektedir. Elastisite modülü bir azalma gösterir ve şartlandırma süresi arttıkça uzama yüzdesi de iyileşti. İki aylık, dört aylık ve altı aylık örnekler için modül yüzdesindeki azalma sırasıyla yüzde 5,76, yüzde 9,53 ve yüzde 15,29 olarak görülmektedir. Kopmadaki uzama yüzde artışı iki aylık, dört aylık ve altı aylık numuneler için sırasıyla %11,35, %20,25 ve %41,75 olarak kaydedilmiştir.

4.3.5. Tuzlu su koşullarının GE kompozitlerin çekme özelliklerine etkileri

GE numunelerinin deneysel sonuçları kaydedildi ve Şekil 4.7. 'de gösterildi. Grafikten, GE kompozitlerinin çekme mukavemetinin ve modülünün zamanla azaldığını, kopma noktasındaki uzamanın ise şartlandırılma zaman arttıkça bir iyileşme gösterdiğini görmek kolaydır.

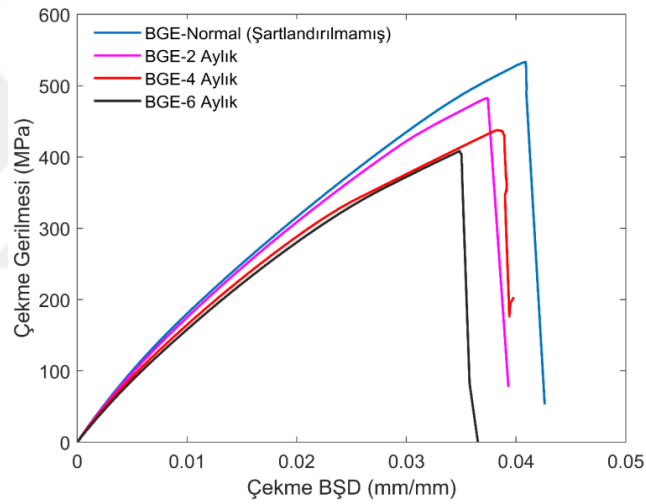


Şekil 4.7. Tuzlu Su Koşullarının GE Kompozitlerinin Çekme Özelliklerine Etkileri

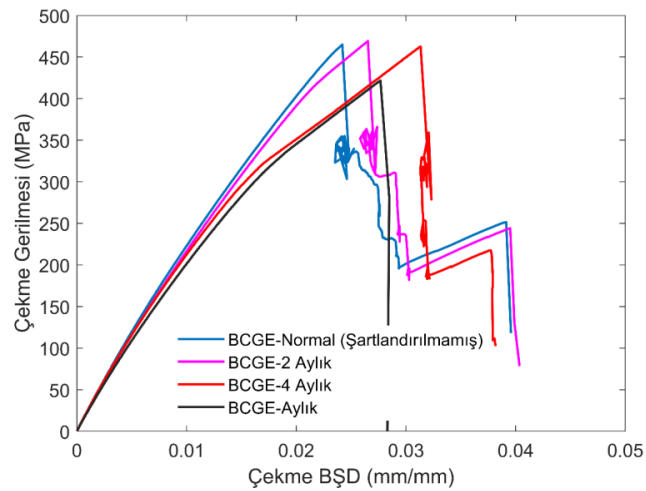
Çekme mukavemetindeki yüzde azalma, iki aylık, dört aylık ve altı aylık numuneler için sayısal olarak sırasıyla %1,85, %6,6 ve %13,63 olarak ifade edilmiştir. Ayrıca, aşındırıcı bir ortama maruz kaldıktan sonra iki aylık, dört aylık ve altı aylık numunelerin modülü sırasıyla yüzde 5,57, yüzde 9,42 ve yüzde 10,84 düştü. Kopmadaki uzama yüzdesi ise şartlandırma süresi uzadıkça bir gelişme göstermektedir. İki aylık örnek, muazzam bir yüzde artışı (yüzde 4,71) gösteriyor ve en düşük yüzde artışı (yüzde 0,03) altı aylık örnek için gözlemlendi. Kopmadaki yüzde uzamanın yüzde artışı, GE ve CE numuneleriyle benzer bir eğilimi takip eder. Tuzlar, tuzlu su pH'nın cam ve karbon fiberlere saldırmasını engelleyebilir, bu da GE ve CE fiber matris ara fazlarının gevrekleşmesine (Sharma ve ark., 2018) neden olarak şartlandırma süresi arttıkça uzamanın artmasına neden olabilir.

4.3.6. Tuzlu su koşullarının BGE ve BCGE hibrit kompozitlerin çekme özelliklerine etkileri

BGE ve BCGE hibrit kompozitlerinin Gerilme-BŞD diyagramı Şekil 4.8. 'de (a-b) gösterilmektedir. Bölüm 4.1. 'de sunulan bilgilere göre, BGE hibrit kompozitlerinin kütle kazancı, diğer tiplerden önemli ölçüde daha düşüktü. Ek olarak, BGE kompozit şartlandırma çözümü, altıncı ayın sonunda daha düşük bir iyon konsantrasyonu gösterir. Öte yandan, daha uzun bir şartlandırma periyodu nedeniyle malzemenin çekme özelliklerinde daha önemli bir azalma meydana gelir. Yazar, gelecekte bu tartışmalı konunun araştırılmasını önermek istiyor. Bununla birlikte, BGE'nin mekanik özellikleri, Şekil 4.8. (a), BE kompozit örneklerine benzer bir bozulma göstermektedir. Çekme mukavemetinin maksimum ve minimum bozulma yüzdesi, iki aylık ve altı aylık şartlandırılmış BGE numuneleri için sırasıyla %9,55 ve %23,5'tir.



(a)



(b)

Şekil 4.8. Tuzlu Su Koşullarının (a) BGE ve (b) BCGE Hibrit Kompozitlerin Çekme Özelliklerine Etkileri

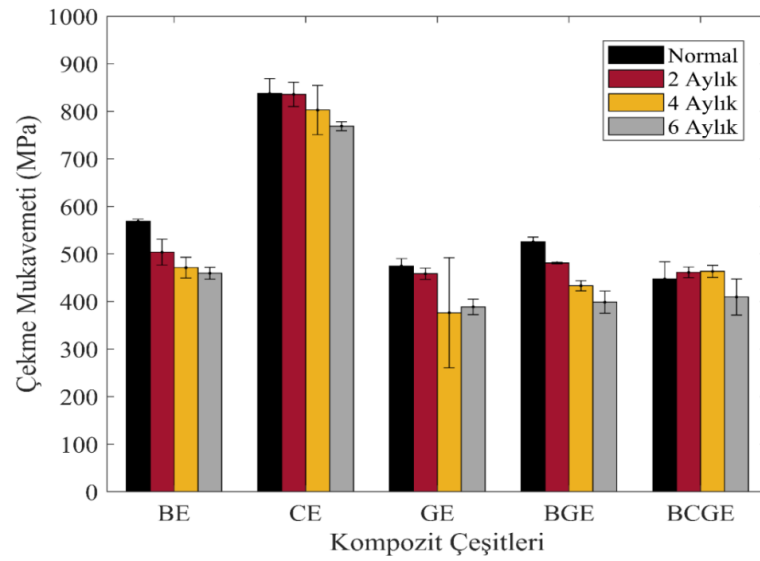
BCGE hibrit kompozitleri, normal/şartlandırılmamış numuneleriyle karşılaştırılabilir olan psödo-süneklik davranışı (pseudo-ductility behavior) sergiler. Bunun nedeni, karbon fiber gibi yüksek modüllü elyafını delaminasyonu ve parçalanması sonucunda maksimum özellikten bir düşüşle çekme özelliği ve bazalt gibi yüksek birim şekil değiştirmeli elyaf nedeniyle çekme özelliği geri kazanma eğilimi gösterir. Sonuç olarak, psödo-sünek davranış elde edilebilir. Ayrıca, CE kompozitlerine benzer şekilde, şartlandırma süresinin artmasıyla potasyum (K) artışı ve kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) iyonlarında azalma olmuştur. Sonuç olarak, BCGE hibrit kompozitinin mekanik özelliklerindeki azalması, Şekil 4.8. (b)'de gösterildiği gibi CE trendini takip eder. Altı aylık numune için çekme mukavemeti (%9.34) ve modülde (%8,68) maksimum bozulma yüzdesi gözlemlenmiştir. BCGE numunelerinin maksimum ve minimum uzama yüzdesi, iki aylık numuneler için %9,63 ve dört aylık numuneler için %29,50 olarak kaydedilmiştir.

İki, dört ve altı aylık koşullandırmadan sonra, BGE modülü başlangıç değerine göre %2.85, %8.40 ve %12.54.4 oranında düşer. Benzer şekilde, uzama yüzdesindeki maksimum ve minimum yüzdesi azalması, dört aylık ve altı aylık şartlandırılmış BGE numuneleri için sırasıyla %6,19 ve %14,68'dir.

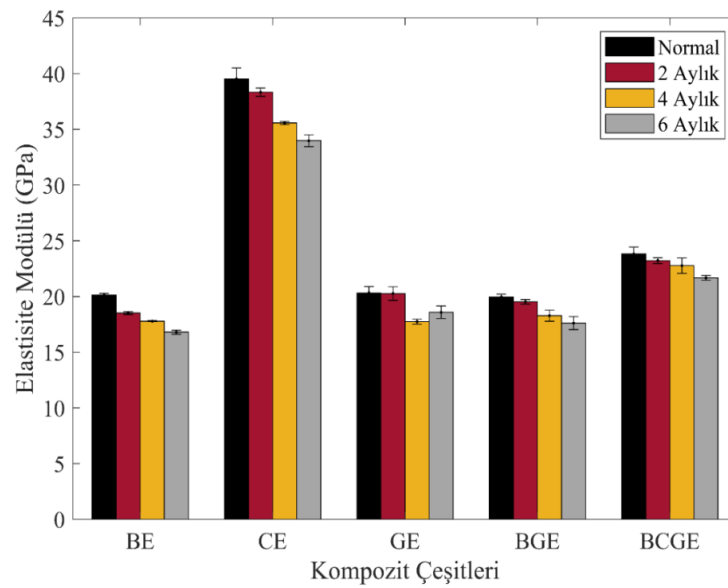
Bazalt/Epoksi kompozit, dört aylık ve altı aylık CE numuneleri dışında tüm durumlarda yüzde uzama konusunda olağanüstü bir sonuç gösterir. Sonuç olarak, BGE numunelerinde daha büyük oranda bazalt elyaf katmanlarının dahil edilmesi, GE ve BCGE numunelerinin uzamasından daha mükemmel olan daha yüksek yüzde uzama özelliğine sahiptir. Ayrıca, BCGE hibrit kompozitlerine karbon fiber ilavesi nedeniyle, şartlandırma süresiyle birlikte kopma uzaması CE kompozitlerine benzer şekilde artar.

Tuzlu su çözeltisinin tüm kompozit numuneler için kopma mukavemeti, modülü ve yüzde uzama üzerindeki etkisi Şekil 4.9. (a-c)'deki çubuk grafik kullanılarak gösterilmiştir. CE'nin çekme mukavemeti daha yüksektir (761 - 837 MPa) ve en küçüğü Şekil 4.9.(a) 'da gösterildiği gibi GE kompozit örneklerinden (409 - 471 MPa) elde edilmiştir. En heyecan verici kısım, bazalt ve Cam elyafların hibrit kompozitlerinin çekme mukavemetinin, çekme yüklemesi altında bazalt elyafın çekici bir özelliğinden dolayı bir gelişme göstermesidir.

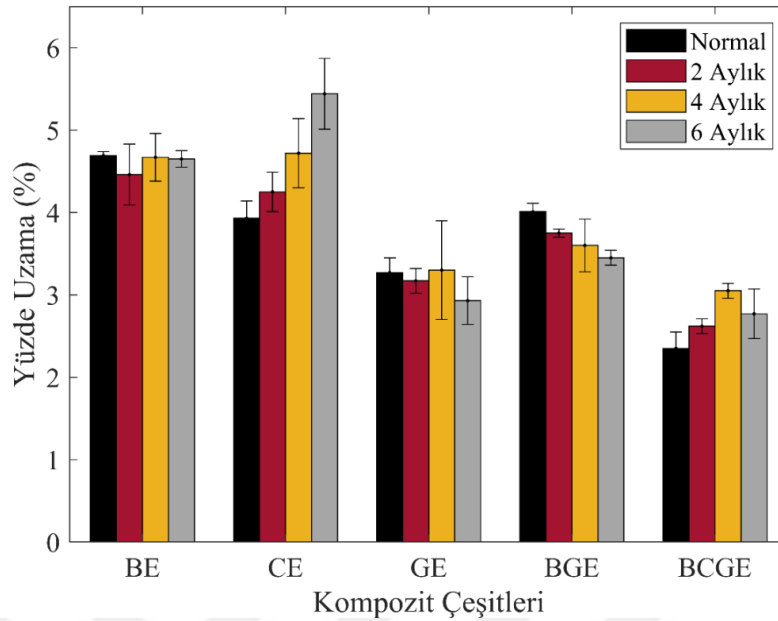
Dikkat çekici bir şekilde, CE örneklerinin modülü, BE, GE ve bunların hibrit örneklerinden daha üstündür. Burada, BCGE hibrit kompoziti, Şekil 4.9.(b) 'de gösterildiği gibi, diğer kompozitlere göre tüm durumlarda bir gelişme göstermektedir. BE, GE ve hibrit (BGE) her koşulda benzer değerlere sahiptir. Ancak, Şekil 4.9.(c) 'de gösterildiği gibi, örnekler arasında yüzde uzama açısından daha yüksek bir fark vardır. Bazalt/Epoksi kompozit, dört aylık ve altı aylık CE numuneleri dışında tüm durumlarda yüzde uzama konusunda olağanüstü bir sonuç gösterir. BGE numunelerinde bazalt lifinin daha fazla katman bulunması nedeniyle, bu numunenin uzama yüzdesi GE ve BCGE numunelerinden daha mükemmeldir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.9. Tüm Kompozitlerin Çekme Bozulmasını Gösteren Bir Çubuk Grafik: a) Çekme Mukavemeti, b) Elastisite Modül ve c) Yüzde Uzama

Çizelge 4.4. 'de bu tezde incelenen tüm kompozitlerin kopmadaki çekme mukavemeti, gerilme modülü ve uzama yüzdesindeki bozulmayı göstermektedir. Çizelge, şartlandırma süresi arttıkça tüm kompozitlerin çekme mukavemetinin ve modülünün bozulduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca Çizelge, BE (%21.11) ve BGE (%23.50) numunelerinde daha yüksek bir çekme mukavemeti bozulmasının gözlemlendiğini göstermektedir. Önceki bölümlerde açıklandığı gibi, bunun nedeni epoksi reçinenin plastikleşmesi ve hibritlerde zayıf ara yüzey bağlanması olabilir. Tersine, en küçük çekme mukavemeti bozulması %9.09 ile CE numunesinde gözlenir.

Benzer şekilde, BE kompozitinin çekme modülü (%17,12) daha yüksek bir azalma gösterir. Modül bozulması söz konusu olduğunda, CE numunesi (%15,29) BE'nin yanında daha yüksek bir bozulma gösterir ve modüldeki en küçük azalma %8,68 ile BCGE hibrit kompozitinde gözlenir. Şartlandırma periyodu arttıkça, CE ve BCGE numunelerinin davranışı kırılığandan sünek hale gelmiştir. Başka bir deyişle, yaşlanma süresi artması ile birlikte kopmadaki uzama yüzdesi artar. Sonuç olarak, elastiklik modülleri bir azalma gösterir. Çizelge 4.4. 'te görüldüğü gibi, altı aylık şartlandırma döneminin sonunda CE numunenin uzama yüzde 41,75 artarken, BCGE numunenin

uzama yüzde 14,38 arttı. Bununla birlikte, BE ve BGE kompozitlerinin uzaması, şartlandırma süresi arttıkça azalır.

Çizelge 4.4. Tuzlu Su Çözeltisi Altında Çekme Özelliklerinin Yüzde Bozulması

Kompozit Çeşitleri	Şartlandırma Süresi	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Fark (%)	Çekme Modülü (GPa)	Fark (%)	Kopma Uzaması (%)	Fark (%)
BE	0	572,07		20,23		4,71	
	2	490,35	14,28	18,66	7,74	4,30	8,81
	4	458,81	19,80	17,81	11,93	4,44	5,75
	6	451,28	21,11	16,76	17,12	4,63	1,72
CE	0	837,69		40,64		3,84	
	2	840,73	-0,36	38,30	5,76	4,28	-11,35
	4	817,41	2,42	36,77	9,53	4,62	-20,25
	6	761,56	9,09	34,43	15,29	5,45	-41,75
GE	0	471,03		20,92		3,18	
	2	462,33	1,85	19,75	5,57	3,33	-4,71
	4	439,93	6,60	18,94	9,42	3,61	-13,54
	6	406,84	13,63	18,64	10,89	3,18	-0,03
BGE	0	533,46		20,25		4,09	
	2	482,53	9,55	19,67	2,85	3,73	8,64
	4	437,63	17,96	18,55	8,40	3,83	6,19
	6	408,10	23,50	17,71	12,54	3,49	14,68
BCGE	0	465,03		23,95		2,42	
	2	469,24	-0,91	23,51	1,82	2,65	-9,63
	4	462,64	0,51	23,44	2,10	3,13	-29,50
	6	421,60	9,34	21,87	8,68	2,77	-14,38

4.3.7. Çekme hasarları

Şartlandırılmış çekme numunelerinin hasarı modları Şekil 4.10.(a-e) 'de gösterilmiştir. Tüm kompozit numuneler ölçüm alanında hasar oluşmuştur. BE, sünek bir kırılma ve iyi bir entegrasyon gösterir (Sun ve ark., 2018). BE kompozitin kırılma modları, yüksek derecede patlayıcı hasarı, fiber kırılması ve tuzlu su çözeltisi etkisinden dolayı katmanlara ayrılma ile karakterize edilir. Tuzlu suda şartlandırma süresi ile hasar bölgeleri (alanları) bir artış gösterir.

Bununla birlikte, CE ve GE kompozit numunelerinin hasar modları, gevrek kırılmanın özellikleri olan iki veya üç parçaya kırılma ile temsil edilmektedir. Ayrıca, hasarları katastrofik bir hasar/kırık ile karakterize edilir. Şartlandırılmamış ve şartlandırılmış CE ve GE numunelerinin hasarlarının benzer davranış gösterdiği fark edilebilir.



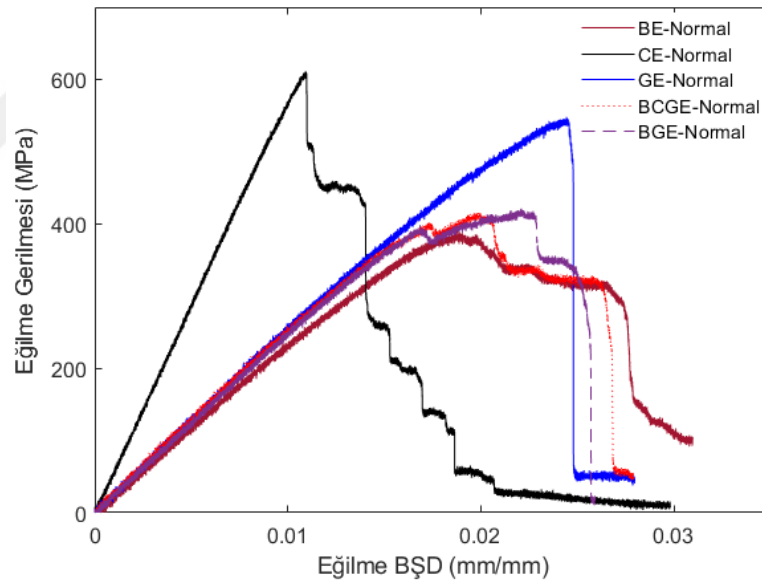
Şekil 4.10. Kompozitlerin Çekme Hasarı Modları: a) BE, b) GE, c) CE, d) BCGE, ve e) BGE

Öte yandan, BGE ve BCGE hibrit kompozit hasar modları BE kompozitine benzer. Hasar modu, ölçüm alanındaki liflerin patlayıcı hasar, delaminasyon ve bağ ayrılması, çatlama ve kırılma ile işaretlenir. BE numunesine benzer şekilde, tuzlu suyu şartlandırma süresinin artmasıyla bu hibrit numunelerin hasar bölgeleri artış gösteriyor. Dikkat çekici bir şekilde, hibrit kompozitlerin hasarı, farklı katmanlar arasındaki zayıf arayüzey arayüzü nedeniyle delaminasyon ve bağların ayrılması ile yüksek oranda karakterize edilir.

4.4. Kompozit numunelerin Üç noktalı Statik Eğilme Testleri

4.4.1. Elyaf tiplerinin eğilme özelliklerine etkisi

Şekil 4.11., üç noktalı eğilmeden sonra tüm şartlandırılmamış numuneler için eğilme gerilme-eğilme BŞD eğrisini göstermektedir. Şekil, maksimum eğilme gerilmene ulaşılan kadar tüm kompozit malzemeler için eğilme gerilme-eğilme birim şekil değiştirme ile doğrusal olarak arttığını göstermiştir. GE numuneleri dışında, numunenin hasarı, hızlı bir katastrofik hasardan ziyade, en yüksek eğilme gerilmesinden sonra bir zikzak zirve ve vadi deseni ortaya koymaktadır. Daha sonra gerilme, literatür benzer bir sonuç olan kademeli bir azalma göstermiştir (Sun ve ark., 2018; Chen ve ark., 2019; Ricciardi ve ark., 2019). Bunun nedeni, tabakaların delaminasyonu, kompozit numunenin basma tarafında eğilme (kinking) (Sun ve ark., 2018), ve elyafların kayma kırılması olabilir.



Şekil 4.11. Üç Noktalı Statik Eğilme Test Sonuçları

Literatürde bildirildiği gibi (Wu ve ark., 2006; Sun ve ark., 2018), bu tür hasarlar psödo-süneklik davranışı (pseudo-ductility) olarak bilinir ve hasar toleransı için çok önemli özelliklerdir. Öte yarıdan, bu tür özellikler, daha kademeli bir hasar geçişi nedeniyle yük taşıma yeteneğinde önemli bir azalmayı önleyecektir.

CE numunesi daha yüksek eğilme gerilme sergilemesine rağmen, eğilme sırasında en ihmal edilebilir % uzama sergiler, bu da kırılğan yapısını gösterir. Bir önceki çalışmaya

(Chen ve ark., 2019) benzer şekilde, BE numunesi en düşük eğilme stresini sergilerken, hibrit kompoziti (BGE) bazalt ve cam elyaf kompozitlerin ortasında bir değer gösterdi. Bunun nedeni, cam elyafın eğilmedeki üstün özelliğinden kaynaklanıyor olabilir. GE kompozitleri, hibritlerine (BGE & BCGE) ve BE numunelerine göre daha yüksek eğilme gerilmesi ve uzama yüzdesi gösterir.

Çizelge 4.5. üç noktalı statik eğilme yüklemesi altında tüm şartlandırılmamış kompozitlerin eğilme mukavemetini, eğilme modülünü ve eğilme uzamasını gösterir. Eğilme testi, GE kompozitlerinin eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve uzama yüzdesinin CE hariç diğer kompozit numunelerden daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.5. Kompozitlerin Üç Noktalı Statik Eğilme Testi Sonuçları

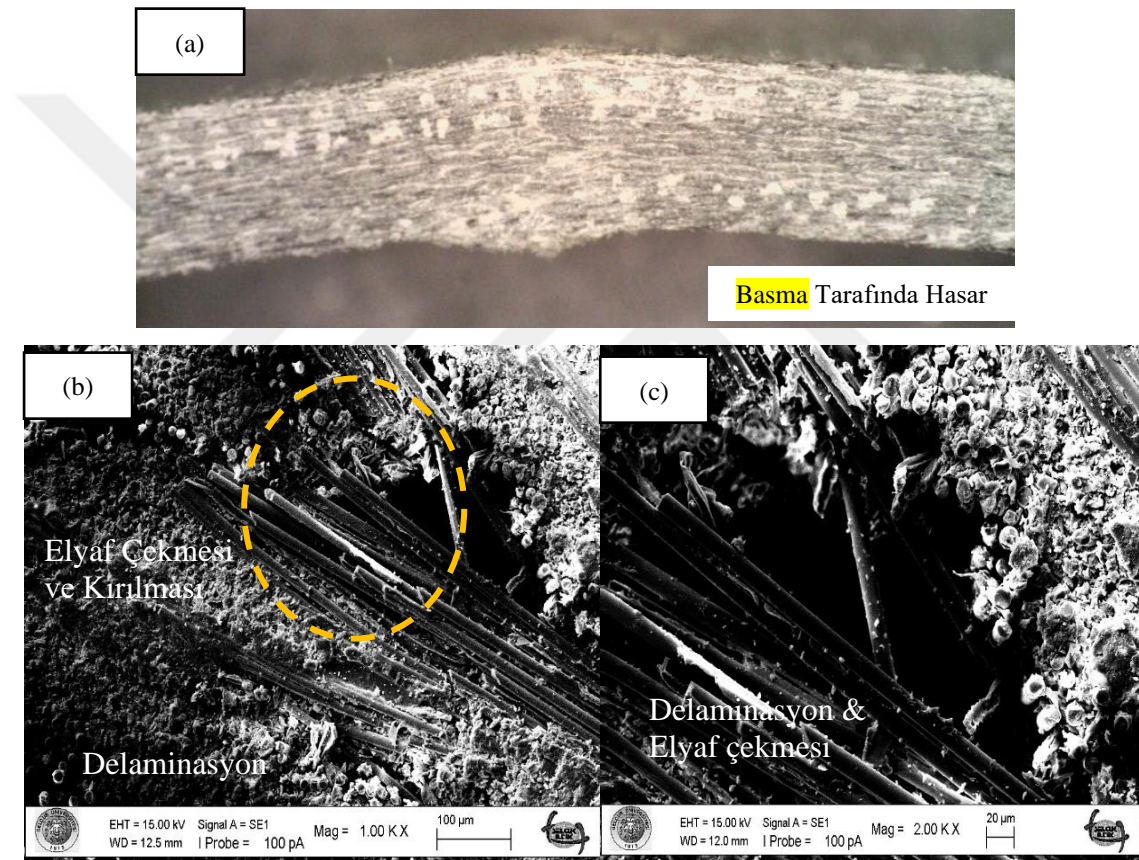
Statik Eğilme Testi Sonuçları			
Kompozit türleri	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Kopmada Eğilme Uzaması (%)
BE	395,60	23,11	2,08
CE	631,88	58,24	1,13
GE	554,29	25,84	2,44
BGE	425,72	24,40	1,93
BCGE	430,48	24,71	1,98

Hibrit kompozit, bazalt/epoksi kompozitlerden daha iyi bir eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve % uzama sergiler. Eğilme gerilme gibi, CE en yüksek eğilme modülünü 58.24 GPa ve BE en düşük değeri 23,11 GPa' dır. Çekme testi sonuçlarının aksine, GE, BE kompozitinden ve hibritlerinden daha iyi eğilme özellikleri (eğilme mukavemeti, modül ve uzama) gösterir. Bu nedenle, GE'nin eğilme yüklemesinde daha iyi olduğu ve çekme yüklemesinde BE'nin daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılabilir. Öte yandan, hibrit kompozit, farklı fiber tabakaları arasındaki zayıf ara yüzey bağından dolayı cam/epoksi kompozitlerden daha zayıf eğilme özellikleri gösterir. GE kompoziti, %2,44 ile eğilmede en yüksek uzama yüzdesini sergilemiştir. CE numunesi, eğilmede minimum % uzama (%1.13) sağlar.

4.4.2. Şartlandırılmamış eğilme numunelerinin hasar modları

Şekil 4.12.-4.15. eğilme yüklemesi altında test edilen tüm şartlandırılmamış kompozitlerin hasar mekanizmalarını göstermektedir. Resimler optik mikroskop ve

SEM'den alınmıştır. Test edilen eğilme numunelerinde, daha önceki araştırma çalışmalarında belirtildiği gibi hibrit kompozitlerdeki başlıca kırılma dağılımları olan basınç, çekme, kırılma, delaminasyon ve fiber çatlaması gözlemlenmiştir (Chen ve ark., 2019). Optik mikroskop altında kalınlık tarafında bakıldığında, tüm kompozitlerin basınç taraflarında nüfuz eden bir çatlak vardır; bununla birlikte, daha önceki araştırmalara benzer şekilde, çekme tarafında bir çatlak yoktur (Chen ve ark., 2019). Bu fenomen, tüm laminatın katastrofik hasarının, eğilme numunelerinin basınç tarafının kırılmasından başlayacağını ortaya koymaktadır.

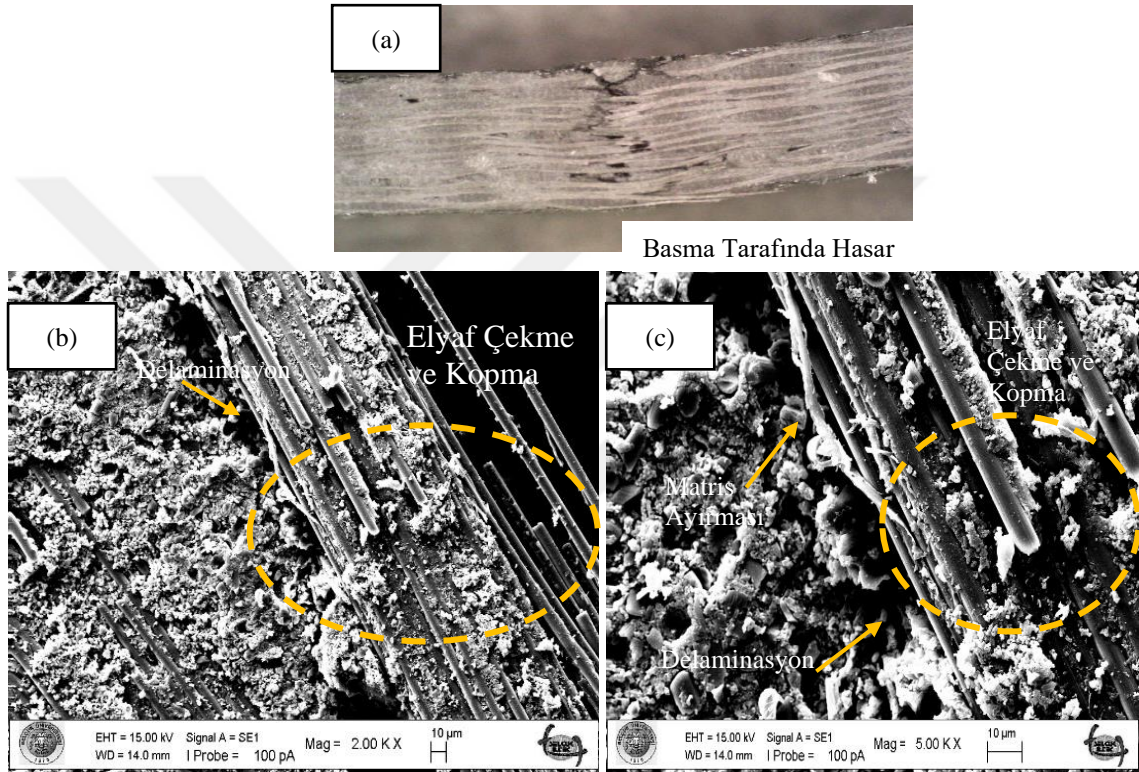


Şekil 4.12. BE numunenin eğilme yüklemesi altında hasar modları (a) optik mikroskop görüntüsü, (b-c) yüksek büyütme SEM görüntüleri

Şekil 4.12.(a) optik mikroskoptan alınmış olup, eğilme altındaki basınç kırılmasını ortaya koymaktadır. Şekil 4.12.(b-c) 'de gösterilen SEM resimleri, testten sonra BE kompozitinin morfolojisinin ayrıntılarını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, delaminasyon, elyaf kopması ve elyaf kırılması BE test numunenin ana hasarlarıdır.

Şekil 4.13. CE kompozitlerinin eğilme yüklemesi altındaki kırılma modlarını göstermektedir. CE kompozitinin optik mikroskop görüntüleri, Şekil 4.13.(a), hasar

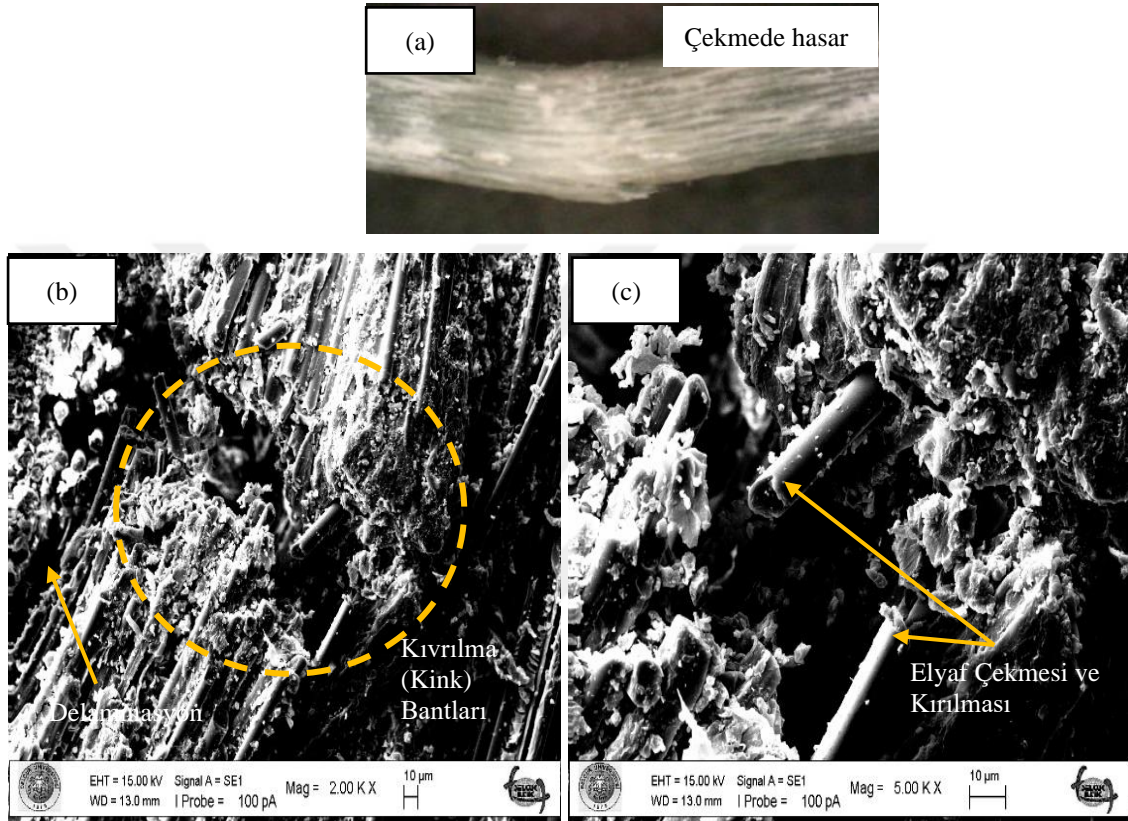
modunun, basma ve çekme taraflarındaki çatlaklar, kesme kırılmaları, delaminasyon ve elyaf kırılmaları ile karakterize olduğunu göstermektedir. Ayrıca detaylı arayüz analizi SEM ile araştırılmış ve Şekil 4.13.(b-c) 'de gösterilmiştir. Sonuç olarak, CE kompozitinin katastrofik hasarını, eğilme yüklemesi altında oluşan iç yüzeyde matris ayrılması, delaminasyon ve fiber kırılmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, CE numunesi eğilme altında kırılma özelliği gösterir ve karbon fiberin bazalt gibi diğer sünek malzemelerle hibridizasyonu ile süneklik özelliği elde edilebilir.



Şekil 4.13. CE numunenin eğilme yüklemesi altında hasar modları (a) optik mikroskop görüntüsü, (b-c) yüksek büyütme SEM görüntüleri

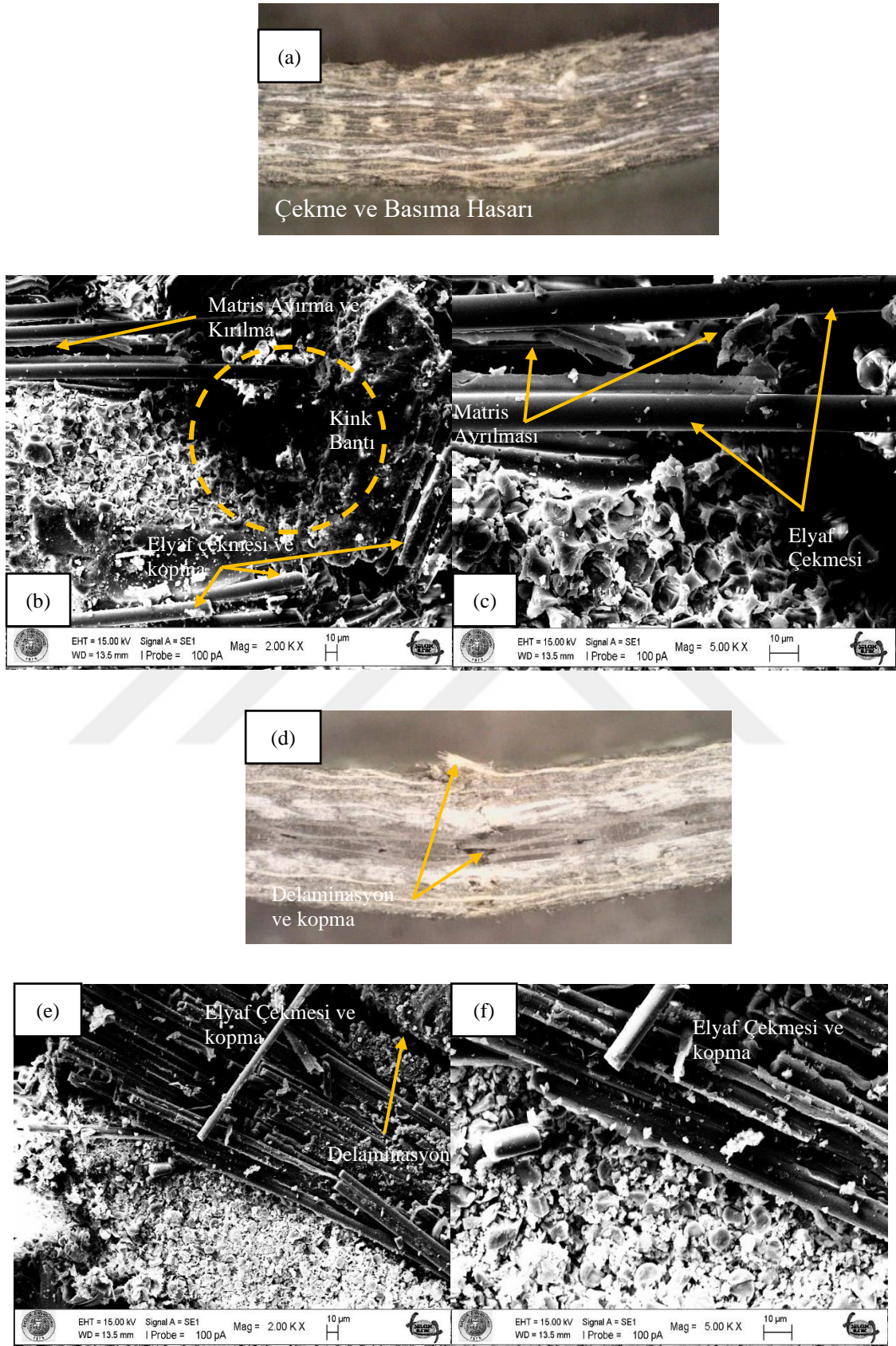
GE kompozitlerinin eğilme kırılma modları söz konusu olduğunda, Şekil 4.14. (a) 'da gösterildiği gibi, çekme tarafında katastrofik hasarı ve elyaf kırılması sergilerler. GE numunenin hasarı daha ayrıntılı bir SEM analizi Şekil 4.14. (b-c) 'de gösterilmektedir. Şartlandırılmamış GE kompozitinin hasarı, yüksek oranda elyaf kırılması, kink bantları, delaminasyon, basma ve çekme hasarları ile karakterize edilir. Daha önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi (Sun ve ark., 2018), delaminasyon hasarı, ara yüzeylerin zayıf bağlanmasından kaynaklanır ve kink bantlarına dönüşen mikro burkulma ile basınç kırılmaları başlatılır.

Şekil 4.15., bu çalışmada test edilen BGE ve BCGE hibrit kompozitlerinin hasar mekanizmalarını göstermektedir. Hibrit kompozitlerin eğilme altındaki hasar modları, önceki araştırma çalışmalarında belirtildiği gibi, hibrit kompozitlerde başlıca hasar dağılımları olan basma, çekme, delaminasyon, elyaf kırılması ve kopması ve matris ayırmadır (Sun ve ark., 2018; Chen ve ark., 2019).



Şekil 4.14. GE numunenin eğilme yüklemesi altında hasar modları (a) optik mikroskop görüntüsü, (b-c) yüksek büyütmeli SEM görüntüleri

Daha spesifik olarak, BGE numunenin optik mikroskopik görünümü Şekil 4.15.(a) 'da gösterilmektedir. Şekil, birleştirilmiş cam ve bazalt özelliği olan çekme ve basma taraflarında elyaf kırılmasını göstermektedir. Şekil 4.15.(b-c) 'de gösterilen BGE'nin yüksek büyütmeli SEM görüntüleri, elyaf kopmasını, kırılmasını, kink bantlarını ve matris bağlarının açılmasını ve kırılmasını göstermektedir.

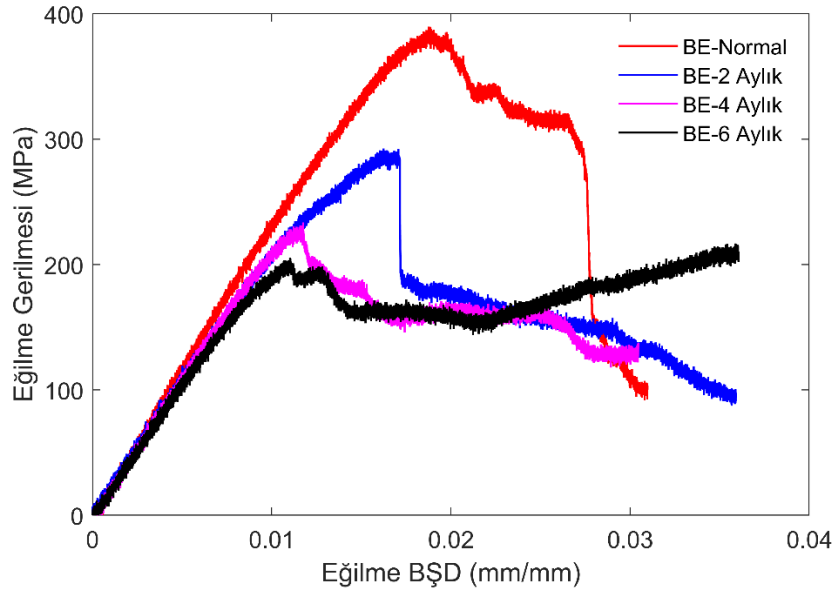


Şekil 4.15. Eğilme yüklemesi altında BGE ve BCGE numunelerinin hasar modları (a) BGE'nin optik mikroskop görüntüsü, (b-c) BGE'nin yüksek büyütmeli SEM görüntüleri, (d) BCGE'nin optik mikroskop görüntüsü ve (e-f) BCGE'nin yüksek büyütmeli SEM görüntüleri

Ek olarak, farklı elyaflar arasındaki zayıf ara yüzey yapıştırma nedeniyle, BCGE'nin hasar modları, Şekil 4.15.(d)'de gösterildiği gibi delaminasyon, elyaf kopması ve elyaf kırılması gösterir. Ayrıca Şekil 4.15.(e-f)'de gösterilen SEM görüntüleri, optik mikroskopta gösterilen hasar modunu desteklemektedir.

4.4.3. BE kompozitlerin eğilme özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri

Şekil 4.16. şartlandırılmamış ve tuzlu su şartlandırılmış BE kompozit numunelerinin eğilme gerilme-eğilme birim şekil değiştirme diyagramını göstermektedir. Çekme sonuçlarına benzer şekilde, şartlandırılmış BE numunelerinin eğilme özellikleri, bu çalışmada gözlemlenen en yüksek bozulma olan şartlandırma süresi arttıkça bozulmuştur.



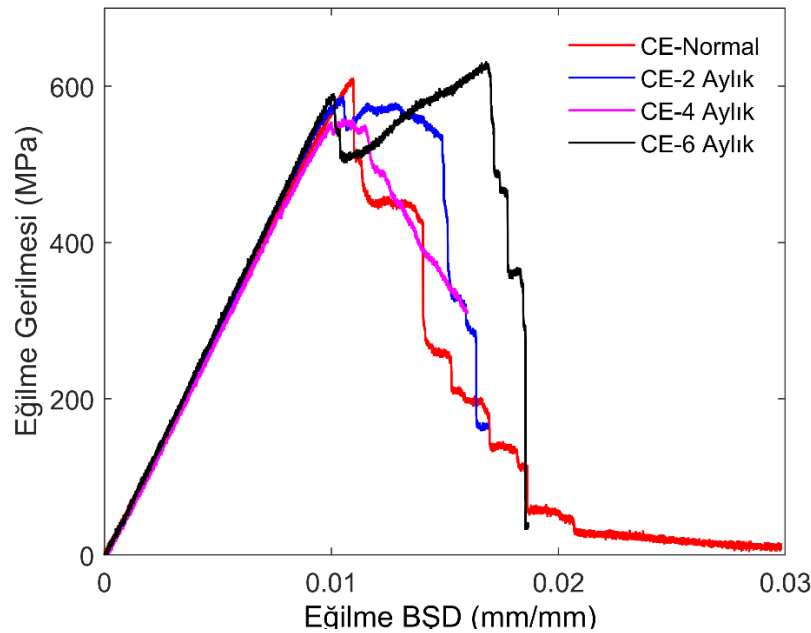
Şekil 4.16. BE Kompozitinin Eğilme Gerilme-Eğilme BŞD Diyagramı

ICP-OES analiz sonuçları, deniz suyu numunesindeki bazalt iyonlarının konsantrasyonunun diğer numunelerden çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu nedenle BE, bazalt elementlerin yer değiştirmesinden sonra oluşan mikro boşluklarda ve deliklerde yüksek su emilimi yaşar. Bunun doğrudan bir sonucu olarak, BE kompozitlerinin eğilme davranışı büyük ölçüde bozulur. Başka bir deyişle, BE kompozitleri, eğilme özelliklerinde GE kompozitlerine ve hibritlerine göre daha büyük bir azalma yaşar. Örneğin, altı aylık şartlandırılmış BE numuneleri için eğilme mukavemeti ve eğilme modülündeki en yüksek bozulma yüzdesi sırasıyla %47,87 ve %5,48'dir. Bunun nedeni, BE kompozitlerinin yüksek su absorpsiyonunun polimer

zincirinin bağlantısını bozarak gözeneklilik oluşturan ve eğilme özelliklerinin daha yüksek bozulmasına yol açmasıdır. Ayrıca, altı aylık şartlandırılmış BE kompozit numuneleri için kopma uzama yüzdesindeki azalma %41,68'dir.

4.4.4. CE kompozitlerin eğilme özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri

Tuzlu suyu şartlandırılmış CE kompozit numunelerinin eğilme özellikleri üzerindeki etkileri Şekil 4.17. 'de gösterilmektedir. Tuzlu suyu şartlandırılmış CE kompozit numunelerin eğilme özellikleri üzerindeki etkisi diğer kompozitlere kıyasla önemsizdir. Ancak, maksimum eğilme gerilme katıldıktan sonra daha yüksek artış görünmektedir. Bunun nedeni, altı ay sonra tuzlu su doygunluğunun ilk karbon tabakasının bozulmasıyla sonuçlanması olabilir (Sun ve ark., 2018). Sonuç olarak, eğilme gerilmesi, CE laminatın toplam hasarına kadar artar. Eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerindeki en yüksek bozulma yüzdesi, sırasıyla %8,44 ve %9,66 ile dört aylık şartlandırılmış CE numunelerinde gözlenmiştir. Dördüncü aydan sonra, CE numunelerinin tuzlu su absorpsiyonu azalır ve doygun hale gelir. Bundan dolayı, eğilme özellikleri ikinci ay değerlerinin konumuna geri dönme eğilimindedir.

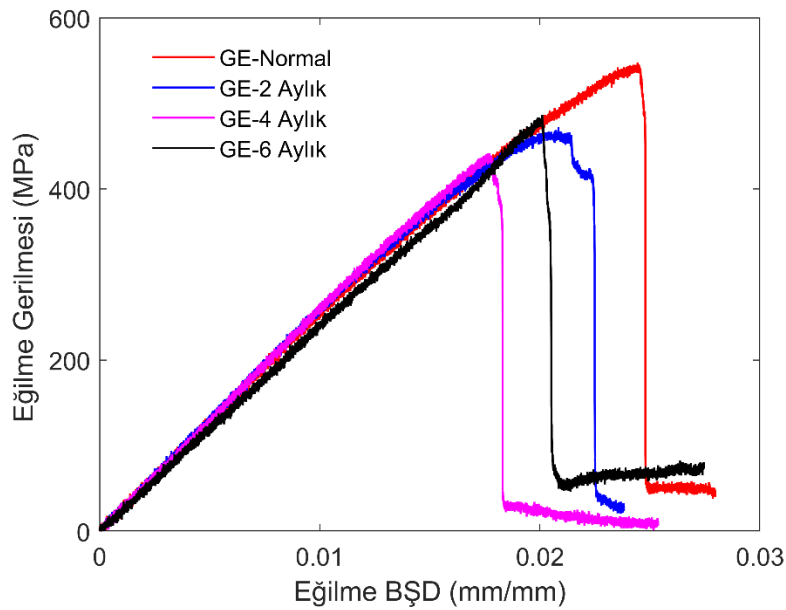


Şekil 4.17. CE Kompozitinin Eğilme Gerilme-Eğilme BŞD Diyagramı

4.4.5. GE kompozitlerin eğilme özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri

Şekil 4.18. 'de görüldüğü gibi, GE kompozit numunelerin eğilme özellikleri, numunelerin dördüncü aya kadar tuzlu su çözeltilerine daldırılmasından oldukça etkilenmektedir. Bölüm 4.2'de belirtildiği gibi, altıncı ay şartlandırmanın sonunda GE iyonlarının konsantrasyonu dördüncü ayın sonundan daha düşüktür. Ek olarak, bölüm 4.1'de belirtildiği gibi, dört aylık şartlandırmadan sonra GE numunelerinin kütle kazancı azalır. Sonuç olarak, malzemenin eğilme özellikleri dördüncü aydan sonra bozulma eğilimindedir.

GE numunelerinin en yüksek eğilme mukavemeti ve eğilme modülü yüzdesi bozulması sırasıyla %19,40 ve %12,66'dır. Ayrıca, eğilmedeki uzama yüzdesi, şartlandırma periyodu boyunca bir azalma gösterir, en yüksek uzama yüzdesi %27,54'tür. Dolayısıyla, sonuçtan, tuzlu suyun eğilme modülünü önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılabilir.

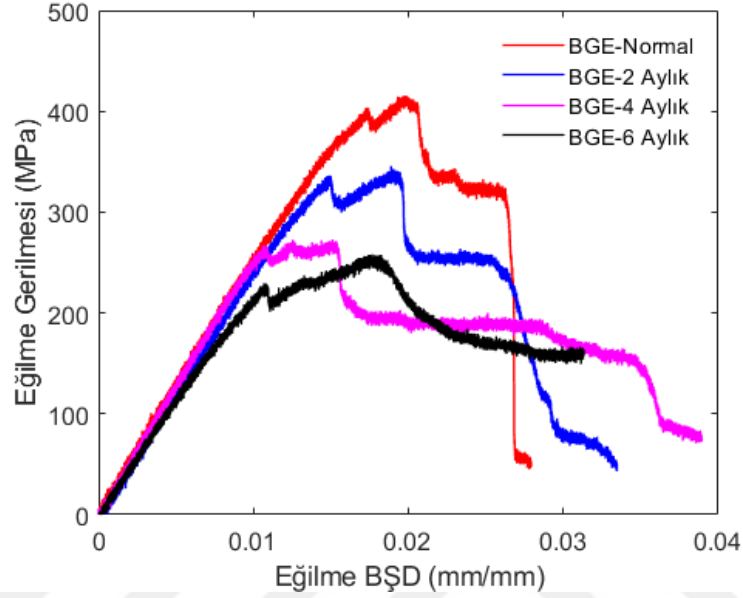


Şekil 4.18. GE Kompozitinin Eğilme Gerilme-Eğilme BŞD Diyagramı

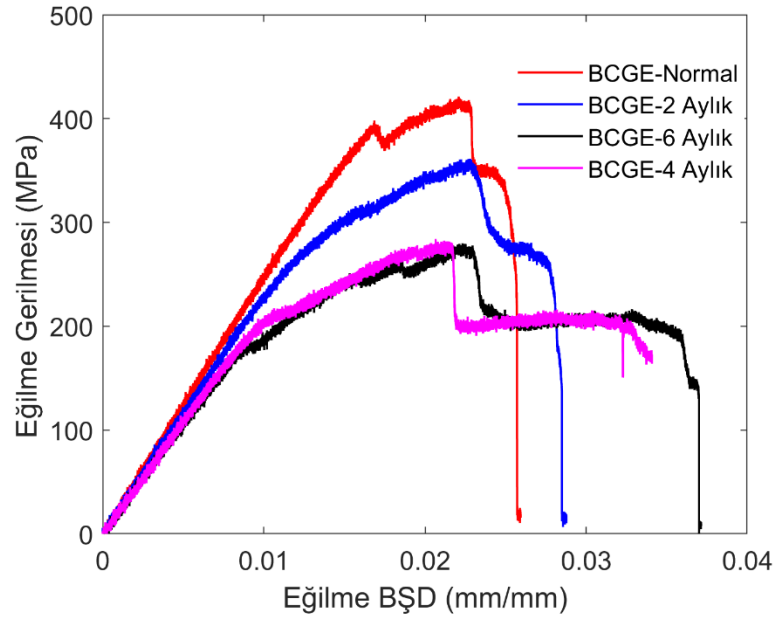
4.4.6. BGE ve BCGE hibrit kompozitlerin eğilme özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri

Bu çalışmanın bir özelliği, Şekil 4.19. (a-b)'de gösterilen hibrit kompozitlerin (BGE & BCGE) eğilme özelliklerindeki bozulmaların BE ve GE kompozitleri arasında olmasıdır. Cam elyafı mükemmel ve muazzam bir eğilme özelliğine sahip olduğundan,

onu içeren hibritler BE kompozitlerinden daha üstün bir eğilme davranışı sergiler. BGE ve BCGE hibrit kompozitlerinin maksimum eğilme mukavemeti yüzdesi bozulması sırasıyla %37,98 ve %29,02'dir. Şekil 4.19. 'de gösterildiği gibi, eğilme modülünün yüzde bozulması BGE'de (%30,38), BCGE'de (%17,9) hibrit kompozitlerden daha yüksektir.



(a)



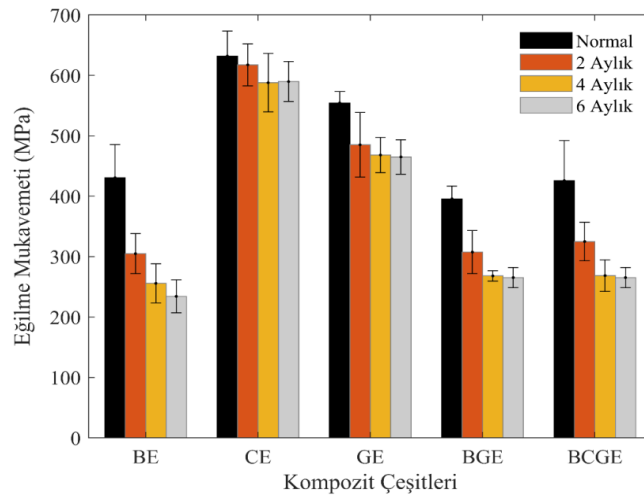
(b)

Şekil 4.19. Eğilme Gerilme-Eğilme BŞD Diyagramı (a) BGE and (b) BCGE Kompoziti

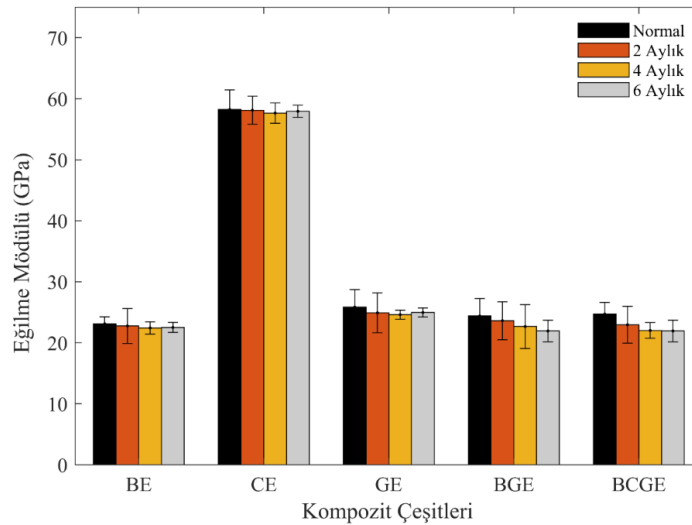
Şekil 4.20.(a-c), eğilme mukavemeti, eğilme modülünü ve eğilmede kopmadaki uzaması bozulmayı gösterir. Çubuk grafik, eğilme özelliklerinin ortalaması kullanılarak

oluşturulmuştur. Hata çubukları, testlerin her birinin standart sapması kullanılarak çizilmiştir. BE, BGE ve BCGE kompozitlerinin eğilme mukavemeti, Şekil 4.20.(a) 'da gösterildiği gibi, en büyük bozulmayı gösterirken, CE ve GE numunesi şartlandırma periyodu ile çok az azalma göstermektedir. CE'nin eğilme mukavemeti, en büyüğü (590-632 MPa) ve en küçüğü BE kompozit numunelerinden (234- 425 MPa) elde edilir.

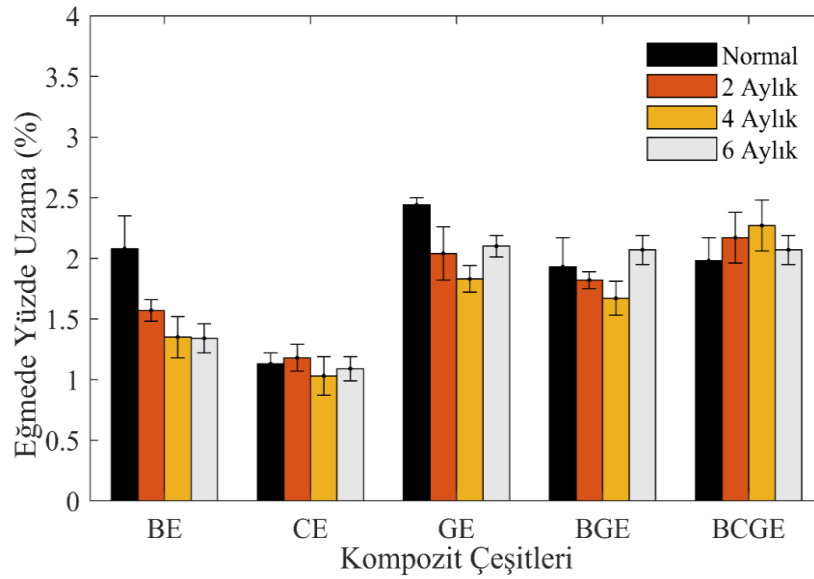
Hibrit kompozitlerin eğilme mukavemetinin bazalt ve cam elyaf kompozitleri arasında olması hibridizasyonun avantajlarını göstermektedir. CE numunelerinin eğilme modülü, Şekil 4.20.(b) 'de gösterildiği gibi BE, GE ve bunların hibrit örneklerinden daha üstündür. Eğilme modülünün azalmasını gördüğümüzde BE, CE ve GE kompozitlerinde önemsiz bir azalma gözlemlenmektedir. Ancak BGE ve BCGE hibrit kompozitlerde küçük bir azalma (%10 – 11) gözlemlendi. Bunun nedeni, farklı elyaflar arasındaki zayıf arayüzey arayüzü ve polimerizasyon etkileri olabilir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.20. Çubuk Grafik (a) Eğilme Mukavemeti, (b) Eğilme Modülü ve (c) Eğmede Yüzde Uzama

Şekil 4.20.(c) 'de gösterildiği gibi, kopmadaki uzama yüzdesi BE, GE ve BGE kompozitleri için daha yüksek bir bozulma göstermektedir; bununla birlikte, BCGE numunesi, şartlandırma periyodundaki artışla birlikte bir gelişme göstermektedir. BCGE'nin uzamasındaki artış, bazalt elyafın hibridizasyon etkilerinden kaynaklanıyor olabilir.

Çizelge 4.6. tuzlu suyu ortamında tüm kompozitlerin eğilme özelliklerinin bozulmasını göstermektedir. Çizelge, şartlandırma zaman arttıkça tüm kompozitlerin eğilme mukavemetinin ve uzamanın azaldığını kanıtlamaktadır; ancak, azalma derecesinde bir değişiklik vardır. Ayrıca Çizelgede, BE (%45,59) ve BGE (%37,68) numunelerinde daha yüksek bir eğilme mukavemeti bozulmasının gözlemlendiğini göstermektedir. Önceki bölümlerde açıklandığı gibi, bunun nedeni epoksi reçinenin plastikleşmesi ve hibritlerde zayıf ara yüzey bağlanması olabilir. Tersine, en küçük eğilme mukavemeti bozulması, %6,66 ile CE numunesinde gözlenmektedir.

BGE (%10,08) ve BCGE (%11,18) hibrit kompozitlerde daha yüksek eğilme modülü bozulması gözlemlenmiştir. Eğilme modülü bozulması söz konusu olduğunda, BE numunesi %1,75 gibi daha küçük bir bozulma gösterir. BE ve GE kompozitleri, şartlandırma süresi ile artan eğilmede uzamada daha yüksek bozulma gösterilmiştir. Çizelge 4.6. da görüldüğü gibi, dördüncü ay şartlandırma sonunda CE örneğinin uzaması yüzde 9,49 azalırken, BCGE numunenin uzaması yüzde 14,14 artmıştır.

Çizelge 4.6. Tüm kompozitlerin Eğilme Özelliklerinin Azalması sonuçları

Kompozit türleri	Şartlandırma Süresi	Maksimum Eğilme Mukavemeti (MPa)	Farkı (%)	Eğilme Modülü (GPa)	Farkı (%)	Eğilmede kopma yuzde uzaması (%)	Farkı (%)
BE	0	395,61		23,11		2,08	
	2	304,89	29,18	26,57	-14,95	1,57	24,41
	4	255,78	40,58	24,44	-5,75	1,35	35,04
	6	234,24	45,59	23,52	-1,75	2,22	-6,86
CE	0	631,89		58,24		1,13	
	2	617,40	2,29	58,32	-0,14	1,18	-3,88
	4	587,85	6,97	63,64	-9,28	1,03	9,49
	6	589,79	6,66	57,04	2,06	1,33	-16,87
GE	0	554,30		25,84		2,44	
	2	485,08	12,49	26,91	-4,12	2,04	16,27
	4	448,17	19,15	26,21	-1,43	1,83	24,90
	6	486,95	12,15	24,47	5,32	2,10	14,07
BGE	0	425,72		24,40		1,93	
	2	307,51	22,27	23,63	3,18	1,82	5,34
	4	268,06	32,24	22,67	7,11	1,67	13,39
	6	265,33	32,93	21,94	10,08	2,07	-7,63
BCGE	0	430,48		24,71		1,98	
	2	324,91	23,68	22,95	7,10	2,17	-9,42
	4	268,54	36,92	22,02	10,89	2,27	-14,14
	6	265,33	37,68	21,94	11,18	2,07	-4,52

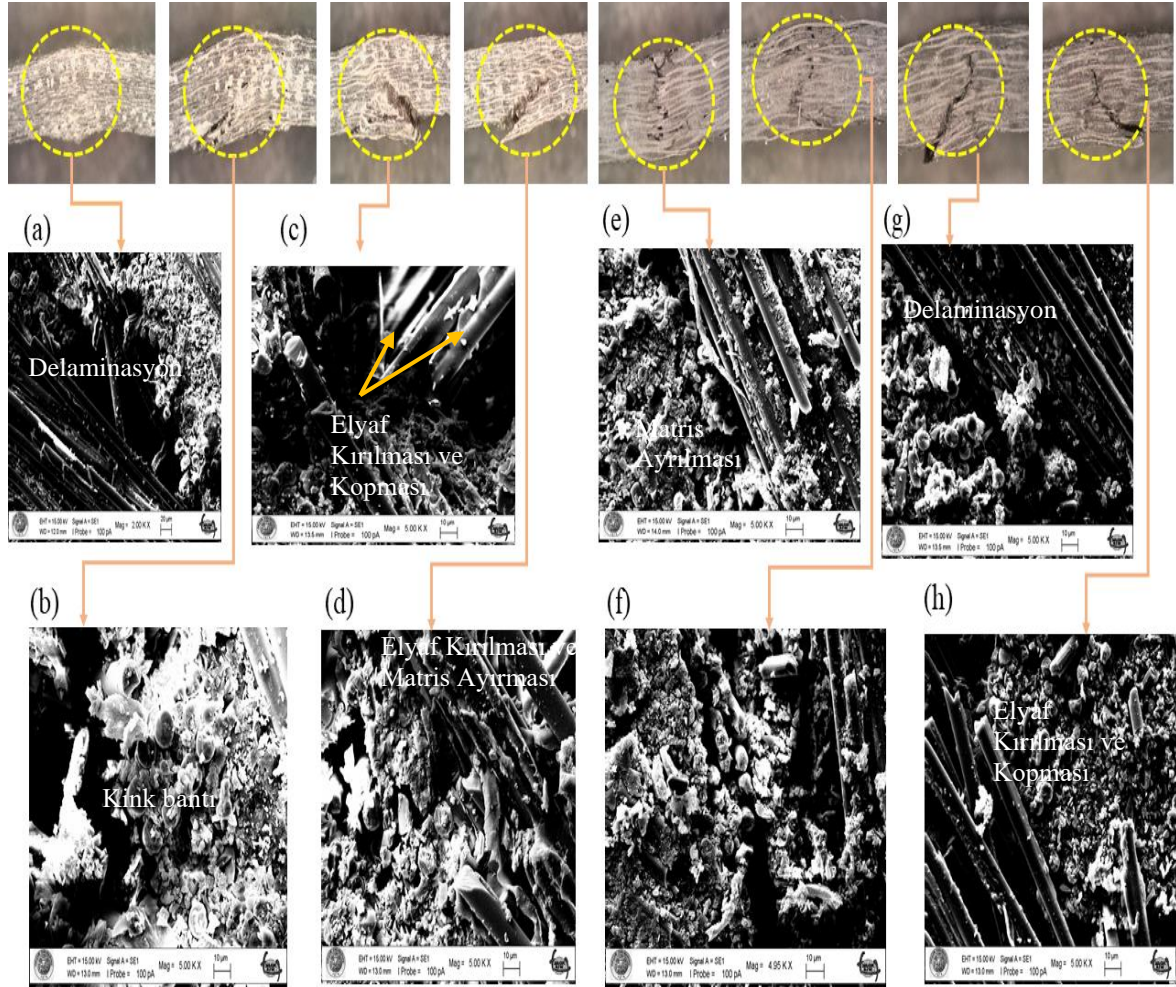
4.4.7. Eğilme numunelerinin hasarlı yüzeylerinin hasar modları ve morfolojik analizi

Eğilme numunelerinde kırılma analizi, numunelerin kalınlık tarafında optik mikroskop ve SEM ile yapılmıştır. Şekil 4.21.(a-h), BE ve CE kompozitlerinin tuzlu su şartlandırılmış eğilme yüklemesi altındaki kırılma mekanizmalarını göstermektedir.

Test edilen eğilme numunelerinde, daha önceki araştırma çalışmalarında belirtildiği gibi hibrit kompozitlerdeki başlıca hasar dağılımları olan basma , çekme, kesme, delaminasyon, kink bantları, matris ayrışması ve elyaf kırılması gözlemlenmiştir (Sun ve ark., 2018). Ayrıca, tuzlu su çözeltisinde şartlandırma süresinin artmasıyla, tüm kompozit numunelerin hasarındada bir artış vardır.

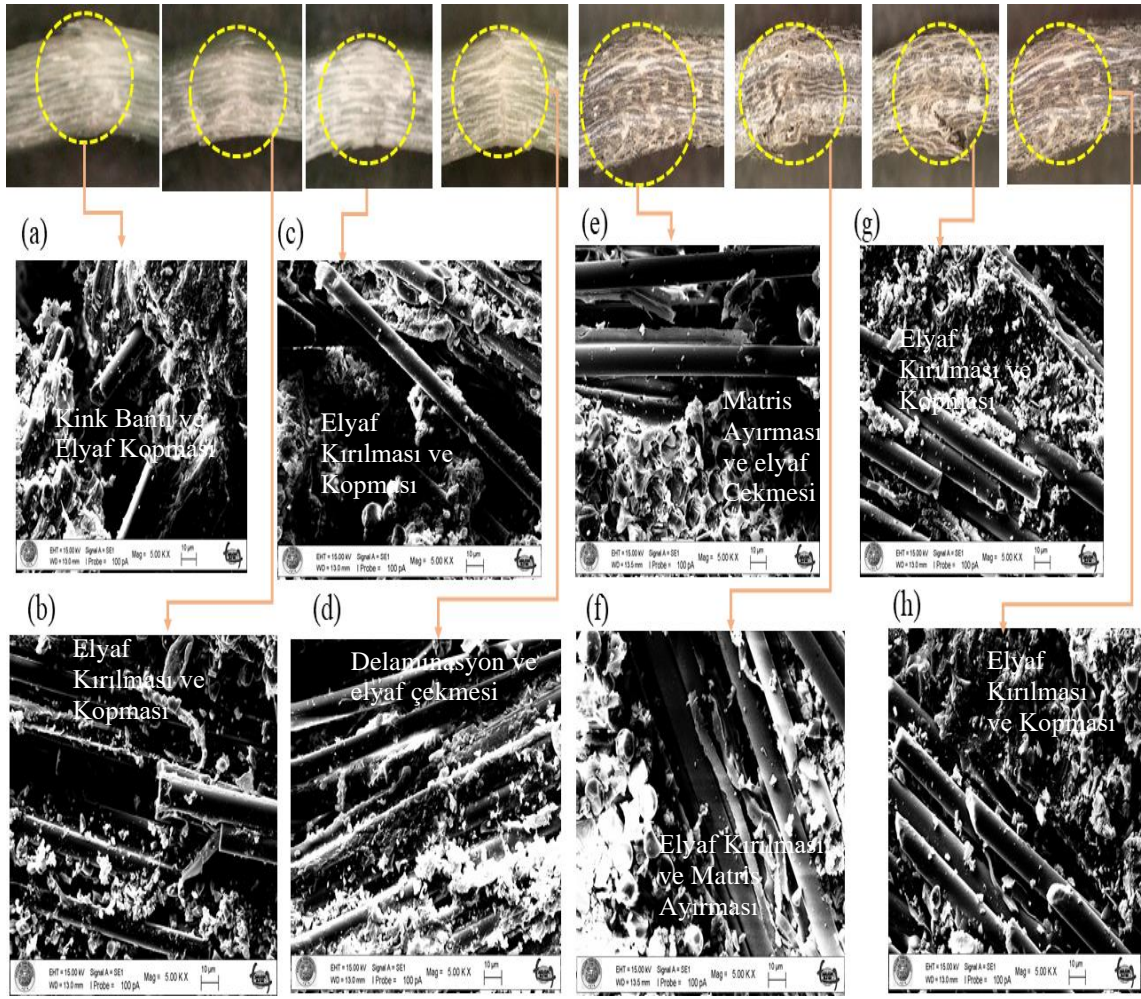
SEM, uzun süreli şartlandırma sırasında kompozit numunenin iç hasarlarının daha ayrıntılı bir gözlemini araştırmak için kullanılır. Şekil 4.21.(a), şartlandırılmamış BE numunenin delaminasyon, kink bantları ve elyaf kırılması gösteren SEM görüntülerini göstermektedir. BE kompozitinin hasar modları, Şekil 4.21.(b) 'de gösterildiği gibi, iki aylık şartlandırılmış numunelerinde bir artış göstermektedir. Ayrıca, dört ve altı aylık

şartlandırılmış BE numunelerindeki hasar, elyaf kırılması, kopma, kink bantları ve matris ayrılması ile karakterize edilir. Tuzlu su etkisinden dolayı şartlandırma süresi arttıkça fiber-matris arayüzü zayıflar.



Şekil 4.21. Eğilme Kırılma Modları ve Morfolojik Görüntüler (a) şartlandırılmamış BE, (b) iki aylık şartlandırılmış BE, (c) dört aylık şartlandırılmış BE, (d) altı aylık şartlandırılmış BE, (e) şartlandırılmamış CE, (f) iki- aylık şartlandırılmış CE, (g) dört aylık şartlandırılmış CE, (d) altı aylık şartlandırılmış CE numune

Şekil 4.21.(e-h) yüksek büyütme SEM altında hasarlı CE numunelerinin görüntülerini göstermektedir. Şartlandırılmamış CE numunelerin görüntüsü Şekil 4.21. (e) 'de gösterilmektedir ve elyaf çatlaması, kopma, ayrılma, delaminasyon, matris çatlaması ve ayrılma ile ilişkilidir. Ayrıca Şekil 4.21.(f), iki aylık şartlandırılmış CE numunelerinin SEM görüntülerini temsil etmektedir. Resimde daha fazla elyaf çekilmesi, elyaf çatlaması ve matris ayrılması gösterilmektedir. Şekil 4.21.(f-h)'den görüldüğü gibi, şartlandırma süresinde hasar en kötüsüdür. Bu, esas olarak, şartlandırma süresi boyunca CE numunelerinin su emmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.22. Eğilme Kırılma Modları ve Morfolojik Görüntüler (a) şartlandırılmamış GE, (b) iki aylık şartlandırılmış GE, (c) dört aylık şartlandırılmış GE, (d) altı aylık şartlandırılmış GE, (e) şartlandırılmamış BGE, (f) iki- aylık şartlandırılmış BGE, (g) dört aylık şartlandırılmış BGE, (d) altı aylık şartlandırılmış BGE numune

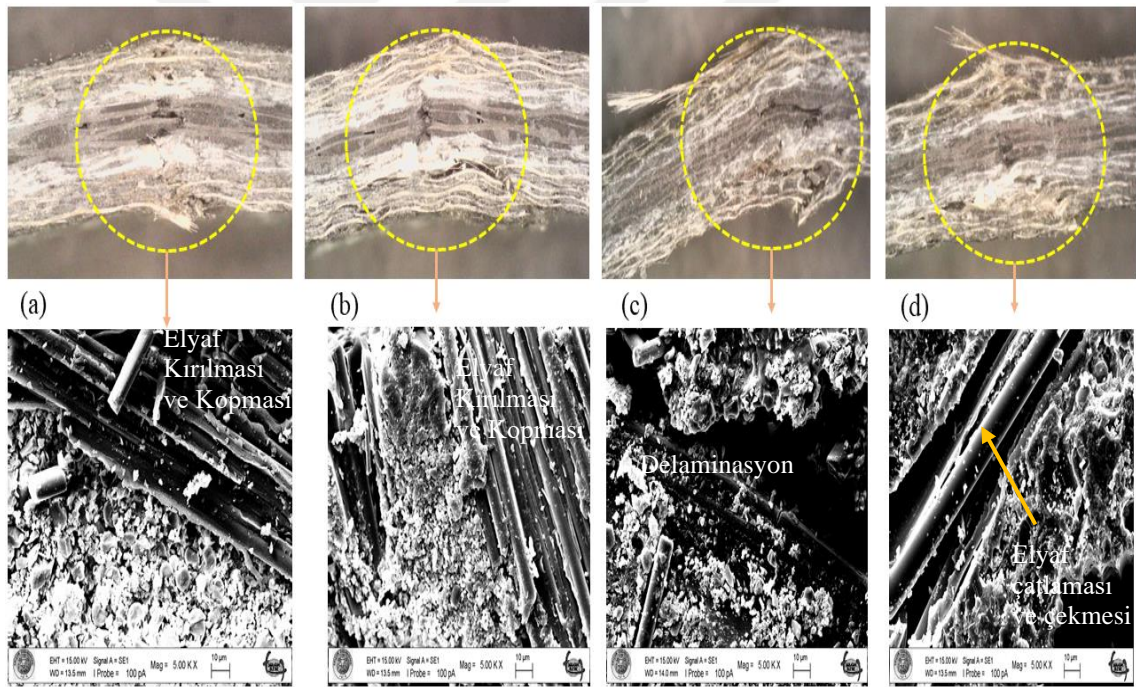
Şekil 4.22.(a), (b-d), yüksek büyütme altında şartlandırılmamış ve şartlandırılmış GE numunelerinin morfolojisini göstermektedir. Şartlandırılmamış GE kompozit hasarlarının ana özellikleri delaminasyon, fiber kırılması, kopma, çekme hasarı ve kink bantlarıdır. Ancak Şekil 4.22.(b-d) 'de görüldüğü gibi, GE numunenin daha yüksek su absorpsiyonu nedeniyle şartlandırılmış numunelerde delaminasyon, elyaf kopması, matris ve elyaf kırılmaları daha yüksektir.

Benzer şekilde, şartlandırılmamış ve şartlandırılmış BGE hibrit kompozitinin SEM görüntüleri Şekil 4.22.(e-h) 'de gösterilmektedir. Şekil 4.22.(e) 'de gösterildiği gibi, matris ayrılması, kink bantları, elyaf kopması ve kırılma, şartlandırılmamış BGE numunelerinin hasar modlarının özellikleridir. Tuzlu suyu şartlandırmanın bir sonucu olarak, hibrit numune mikro çatlaklar, gözeneklilik ve polimer zincir dislokasyonu

oluşturur. Bu hasar Şekil 4.22.(f-h) 'de gösterilmektedir ve suda tutma zaman ile hasar artmıştır.

Şekil 4.23.(a-d), BCGE hibrit kompozitlerinin morfolojisini göstermektedir. Temel malzemelerle karşılaştırıldığında, hibrit kompozit, daha yüksek bir elyaf çekme, matris ayrılması ve elyaf kırılması gösterir. Ayrıca, altı aylık şartlandırılmış BCGE numunesi, elyaf bölünmesini ve katmanlara ayrılmasını gösterir.

Genel olarak, morfoloji analizi, şartlandırılmış kompozit numunelerde daha yüksek bir matris ayrılması, elyaf kopması ve matris çatlaması oranı gösterir. Bunun nedeni, tuzlu suyun, matris ve elyaf arasındaki ara yüzün matris bağlarının ayrılmasına yol açan mikro çatlakların oluşumunu hızlandırmasıdır (Ma ve ark., 2018; Sükür ve Önal, 2021).



Şekil 4.23. Eğilme Kırılma Modları ve Morfolojik Görüntüler (a) şartlandırılmamış BCGE, (b) iki aylık şartlandırılmış BCGE, (c) dört aylık şartlandırılmış BCGE, (d) altı aylık şartlandırılmış BCGE

4.5. Hibrit ve Hibrit Olmayan Kompozitlerin Eğilme Yorulma Davranışı

4.5.1. Hibritleme, eğilme yorulma davranışına etkisi

BE, CE, GE, BGE ve BCGE hibrit kompozitleri, statik eğilme mukavemeti sonuçlarını kullanılarak üç noktalı eğilme yorulması için test edildi. Wohler eğrileri, test

edilen kompozitlerin S-N cinsinden ifade edilen ömrünü gösterir (Ben Ameer ve ark., 2021). Kompozitlerin S-N eğrisi, uygulanan eğilme gerilmesi ve buna karşılık gelen hasar çevrim sayısının ortalama değeri kullanılarak çizildi. Eğri, Denklem 2.1'de verilen Wohler logaritmik ilişkisinin doğrusal olmayan regresyonu kullanılarak çizilir.

$$\sigma_a = A - B * \log(N)$$

Burada, σ_a - uygulanan eğilme gerilmesi, MPa,

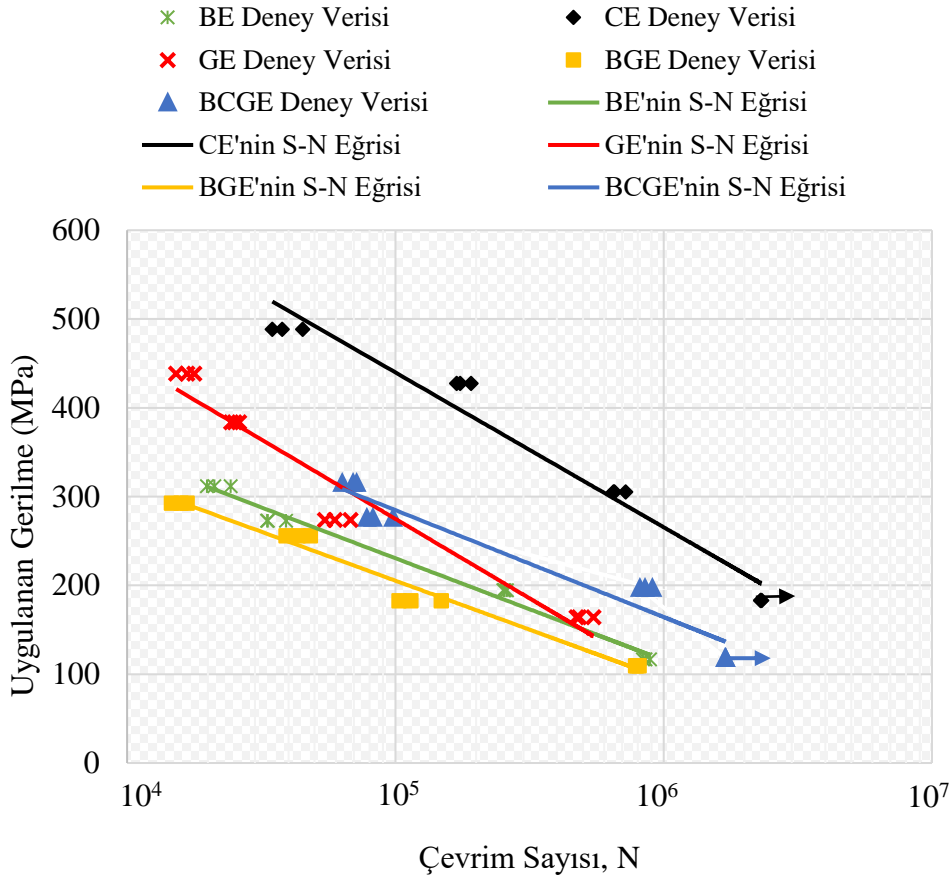
A- ve B- malzemelerin doğal katsayılarıdır: A- bir malzemenin tek bir çevrim için statik eğilme mukavemeti, B- yorulma mukavemeti sabitidir, ve

N- uygulanan eğilme gerilmesi karşılık gelen hasar çevrim sayısının ortalama değeri (Ben Ameer ve ark., 2021).

Şartlandırılmamış BE, GE, CE, BGE ve BCGE kompozitlerinin S-N diyagramı Şekil 4.24'te gösterilmektedir. 2.3×10^6 çevrim sayısı sonra hasar olmayan numuneler bir okla gösterilmiştir. Ayrıca, hibridizasyonun yorulma davranışı üzerindeki etkisinin Şekil'de bakmak mümkündür. Daha önceki çalışmalara benzer şekilde (Ben Ameer ve ark., 2021), kompozit yüksek gerilim seviyeleri altında test edildiğinde yorulma ömrü azalır..

Ayrıca, statik sonuçlar doğrultusunda, CE kompozit numunenin yorulma ömrünün, incelenen diğer numunelerden önemli ölçüde daha uzun olması, CE kompozitinin daha mükemmel yorulma direnci gösterdiğini göstermektedir.

Öte yandan şekil, GE kompozitlerinden daha kısa bir ömür elde edildiğini göstermektedir. Statik sonuçlarda belirtildiği gibi, GE kompozitleri gevrek bir kırılma göstermektedir. Sonuç olarak, GE, kırılma yapısı nedeniyle statik eğilme sonuçlarından daha küçük bir eğilme yorulma direnci gösterir. Ancak S-N diyagramının eğimi BE ve BGE hibrit kompozitlerinden daha yüksektir. Öte yandan, bazalt ve camın (BGE) hibrit kompoziti, GE'den daha iyi bir yorulma özelliği gösterir. Bunun nedeni, bazalt elyafın mevcudiyetinin, daha iyi yorulma direnci sağlayan hibrit sünek hale getirmesi olabilir.



Şekil 4.24. Normal/Şartlandırılmamış kompozitlerinin S-N diyagramı

BE ve BGE'nin yorulma ömrü, eğimde küçük bir farklılık olsa bile karşılaştırılabilir. Ayrıca, BE kompoziti, GE kompozitlerine göre oldukça sünek davranış gösterir. Süneklik özelliği, tekrarlanan yüklere karşı direnç sağlar. Ayrıca, kompozitlerin yorulma direncinde hibridizasyonun büyük önemi olduğu anlaşılmaktadır. Hibridizasyonun yorulma özellikleri üzerindeki etkisi, BCGE hibrit kompozitlerinde oldukça uygulanabilir. S-N diyagramının hem yorulma ömrü hem de dikliği, dört kat karbon fiber eklenerek geliştirilmiştir.

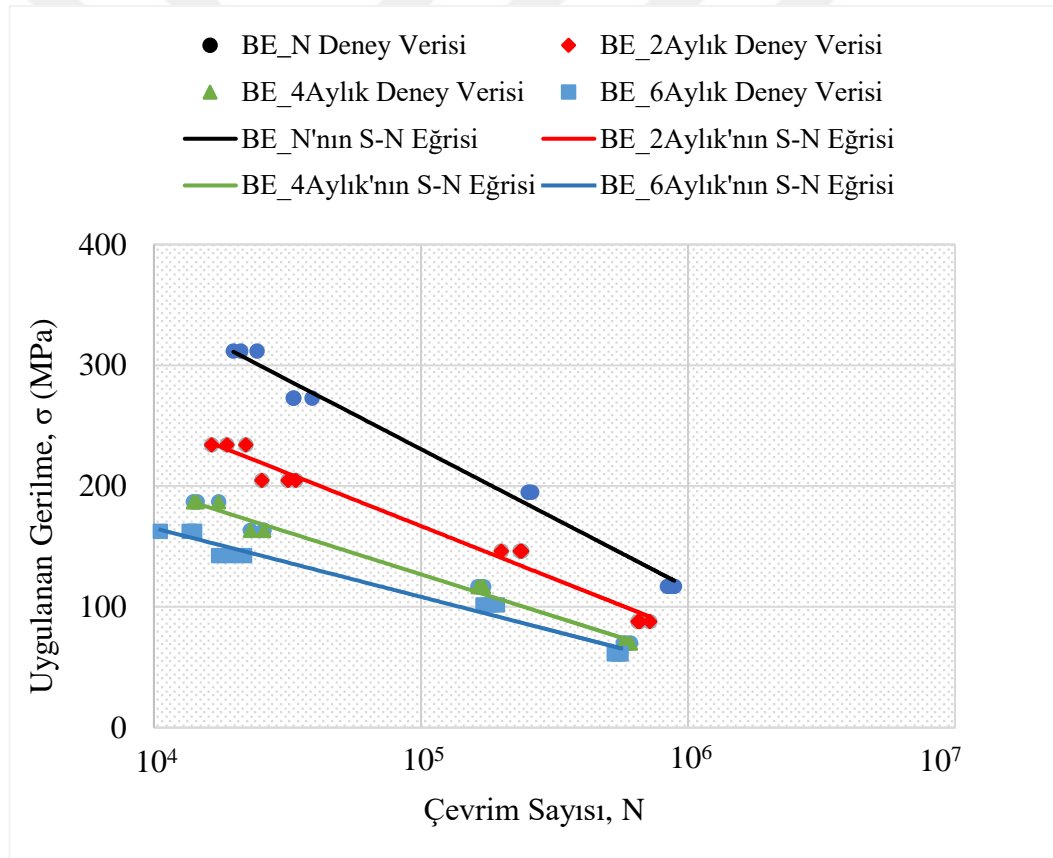
Çizelge 4.7. ve Şekil 4.24. 'te çizilen kompozit numunelerin yorulma parametrelerini göstermektedir. Hem Çizelge hem de Şekil, hibridizasyonun kompozitlerin yorulma davranışı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Yine, regresyon katsayısı, S-N diyagramının deneysel verilerle iyi bir şekilde uyduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca yorulma direnci, GE kompozit numunesi dışında statik eğilme mukavemeti ile yüksek uyum içindedir.

Çizelge 4.7. Kompozit numunelerin yorulma parametreleri

Yorulma parametreleri	BE	CE	GE	BGE	BCGE
Katsayısı, A	402,17	655,55	584,8	378,4	443,16
Katsayısı, B	49,84	75,68	77,7	47,9	52,2
Regresyon Katsayısı, R ²	0,986	0,963	0,944	0,98	0,94

4.5.2. BE kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri

Şekil 4.25., tuzlu suyun BE kompozitlerinin yorulma davranışı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, BE kompozitlerinin yorulma ömrü, statik verilerle tutarlı olarak korozyif bir ortamda azalır.



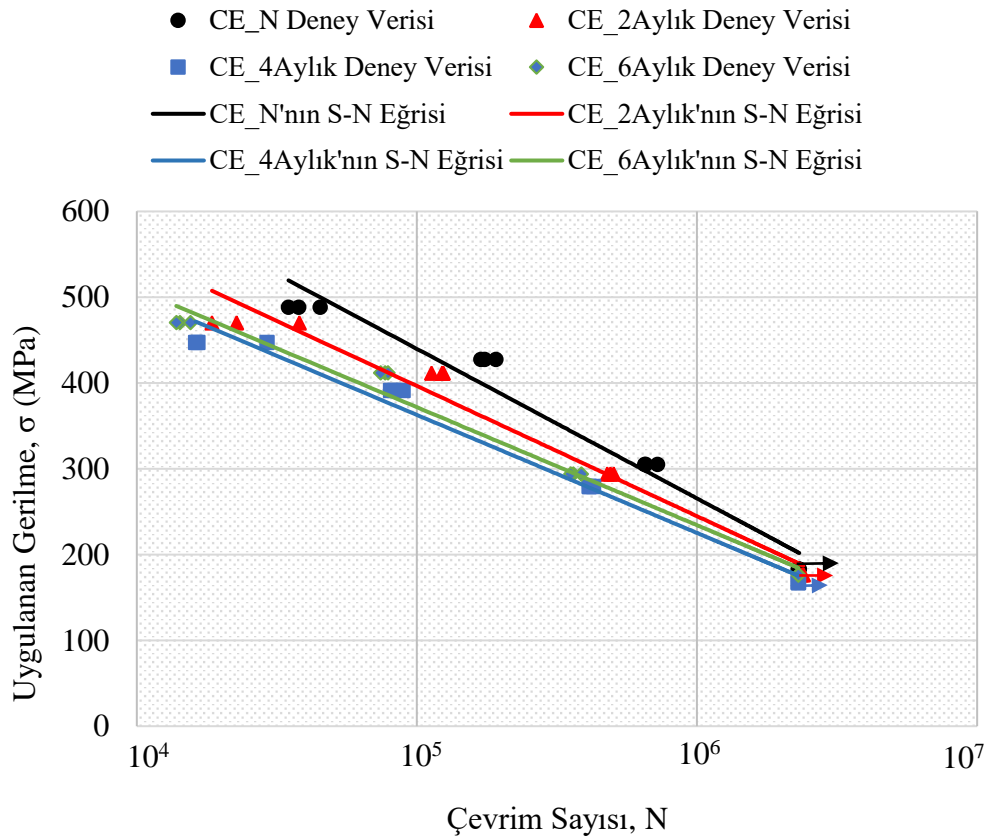
Şekil 4.25. Tuzlu Su Ortamında BE Kompozitlerin S-N Eğrisi

Ancak BE'nin yorulma ömrü azaltma derecesi diğer kompozitlere göre daha yüksektir. Bunun nedeni, mikro boşluklardaki su emilimi ve eleman hareketi nedeniyle oluşan gözenekliliğin, yorulma yüklemesine karşı daha az dirence yol açması olabilir. Diğer neden, matrisin polimerizasyon etkisinin iç boşluklara ve çatlaklara yol açması ve bunun da BE kompozitinin yorulma direncinin zayıflamasına yol açması olabilir.

BE kompozitleri sadece yorulma ömründe değil, aynı zamanda S-N eğrisinin eğiminde de daha yüksek bozulma gösterir. Statik sonuca benzer şekilde, BE kompozitinin daha yüksek su emmesi, daha yüksek gözeneklilik ve iç mikro boşluklara yol açar, bu da yorulma özelliklerinin bozulmasının nedeni olacaktır. Ek olarak, tuzlu su şartlandırması nedeniyle epoksi reçinenin plastikleşmesi, yüksek su alımına yol açar (Wei ve ark., 2011).

4.5.3. CE kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri

Şekil 4.26., tuzlu su şartlandırmasının CE kompozitlerinin yorulma özellikleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. 2,3 milyon çevrim sayısı sonunda kırılmayan numuneler ok ile gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Tuzlu Su Ortamında CE Kompozitlerinin S-N Eğrisi

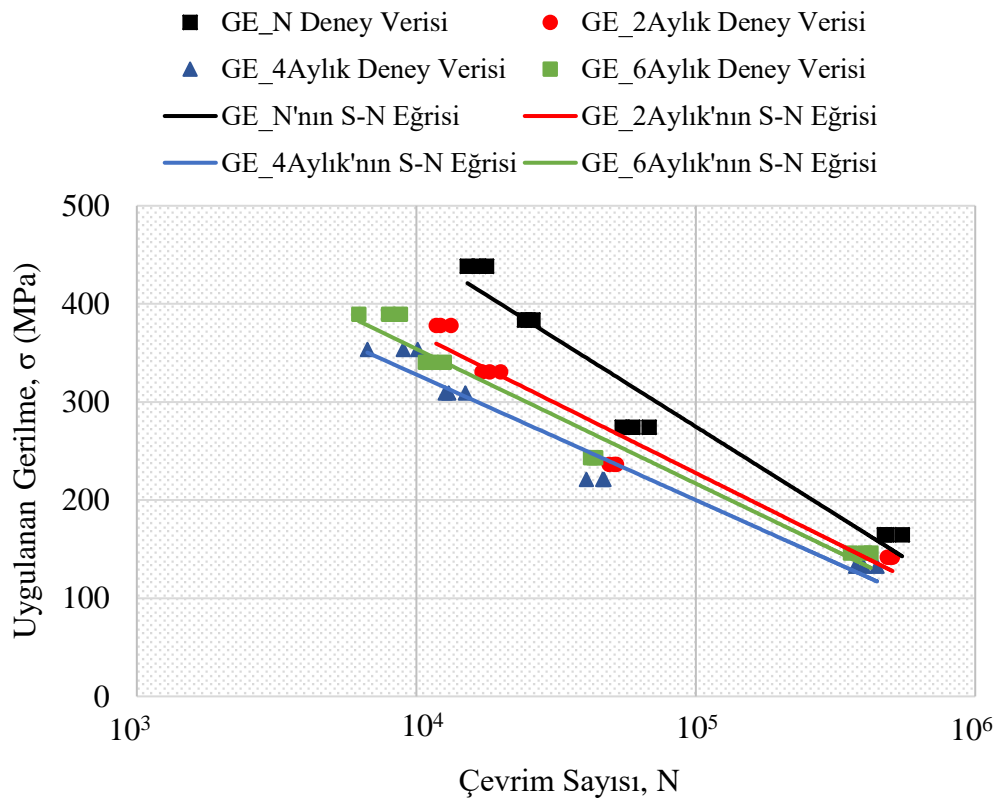
Bu çalışmada test edilen diğer kompozitlerle karşılaştırıldığında, CE numuneleri tuzlu suyu ortamında daha iyi yorulma direnci göstermektedir. Başka bir deyişle, yorulma ömrünün bozulması ve S-N eğrisinin eğimi önemsizdir. Bunun nedeni, karbon fiber

moleküllerinin tuzlu su ortamında daha hızlı göç etmemesi ve daha az gözenekliliğe ve mikro çatlaklara yol açması olabilir.

Bu çalışmada, tuzlu su şartlandırmasının CE numuneleri üzerindeki etkisinin, daha yüksek statik mukavemeti ve matris ile elyaf arasındaki iyi uyum nedeniyle önemsiz olduğunu göstermektedir.

4.5.4. GE kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri

GE kompozit numunesinin tuzlu su koşullarındaki yorulma davranışı Şekil 4.27.'de gösterilmektedir. GE numunelerinin yorulma ömrü, test edilen diğer kompozitlere kıyasla daha kısa bir ömür gösterir; bu, statik eğilme özelliklerinin tersi eğilimdir. Bununla birlikte, azalan yorulma ömrü oranı ve S-N eğrisinin eğimi, GE'nin statik eğilme özelliği bozulmasına benzer.



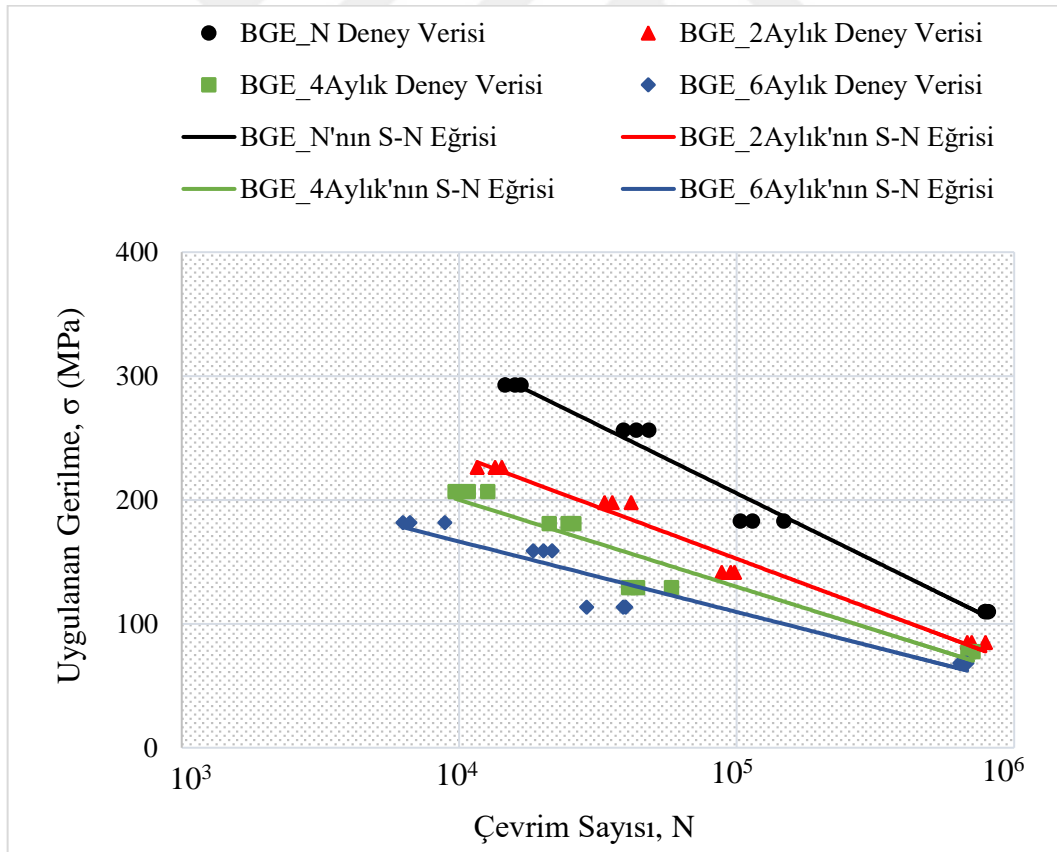
Şekil 4.27. Tuzlu Su Ortamında GE Kompozitlerinin S-N Eğrisi

Bu nedenle gevrek malzemelerin en kısa yorulma ömrüne yol açacağı ve tuzlu su şartlandırmada duyarlı olduğu ifade edilebilir. Gevrek malzemelerin katastrofik hasarı, daha kısa yorulma ömrüne yol açar ve yorulma direncini azaltır. GE kompozitinin tuzlu

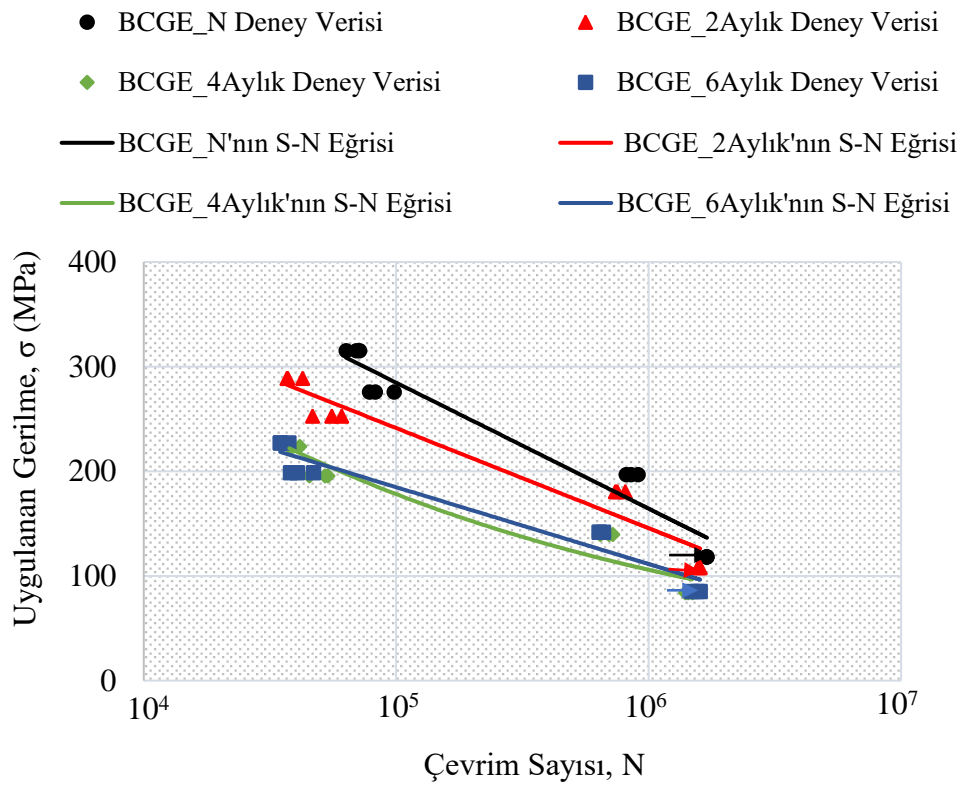
su şartlandırması, yorulma ömründeki bozulmayı arttırır; bunun başlıca nedeni, tuzlu su şartlandırması sırasında delikler ve gözenek oluşumunun yorulma ömründeki azalmayı hızlandırmasıdır.

4.5.5. BGE ve BCGE hibrit kompozitlerin yorulma özellikleri üzerine tuzlu suyun etkileri

Hibrit kompozitler tuzlu su şartlandırmaya da duyarlı olsalar da yorulma özellikleri Şekil 4.28.(a-b) 'de gösterildiği gibi baz malzemelerden daha iyidir. Bu özelliği iyileştirmenin acil çözümü, Şekil 4.28.(a-b) 'de gösterilen BGE ve BCGE'nin hibrit kompozitlerinde görüldüğü gibi sünek malzemelerle hibritleme yapmaktır. Burada BCGE kompozitinin S-N diyagramından bahsedilen bir diğer önemli nokta, yorulma ömrünün düşük gerinim aralıklarında karşılaştırılabilir olmasıdır; aksine, yorulma ömrü, önceki çalışmalara benzer şekilde, daha yüksek gerinim seviyelerinde tuzlu su durumundan oldukça etkilenir (Wang ve ark., 2019).



(a)



(b)

Şekil 4.28. Tuzlu Su Ortamında Hibrit Kompozitlerin S-N Eğrisi: a) BGE, and b) BCGE

Bir önceki bölümde açıklandığı gibi, hibritlerin tuzlu su ortamındaki yorulma davranışı temel malzemeler arasındadır. Örneğin, BGE kompozitinin yorulma ömrünün bozulması BE ve GE arasındadır. Benzer şekilde, BCGE tuzlu su koşullarında CE kompozitinin yanında diğerlerinden daha iyi bir yorulma ömrü gösterir. Hibrit kompozitlerin yorulma özelliğindeki bozulma, matris bağlarının ayrılmasına yol açan ve arayüzey yüzeyini zayıflatan fiber durumunun aglomerasyonundan kaynaklanıyor olabilir (Yan ve ark., 2017). Ayrıca, tuzlu su şartlandırma, hibritin yorulma ömrünü azaltan farklı elyaf ara yüzleri arasındaki arayüz bağlarını zayıflatır.

Çizelge 4.8., Şekiller 4.23.-4.28 'de çizilen S-N diyagramının statik (A), yorulma (B) ve regresyon (R^2) katsayılarını ortaya koymaktadır. Regresyon katsayısı R^2 , deneysel verilerin S-N diyagramına iyi uyduğunu gösterir. Ayrıca Çizelge, yorulma katsayısı B'nin tüm kompozitler için şartlandırma süresinin artmasıyla azaldığını göstermektedir. Yani, tuzlu suyun S-N diyagramının eğiminin eğimi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Benzer şekilde, statik katsayı A da tuzlu suyu şartlandırma süresinin artmasıyla bozulur. Yorulma parametrelerinin bozulması, statik mukavemet ile iyi bir uyum içindedir.

Çizelge 4.8. Tüm Kompozitlerin Yorulma Parametreleri

Kompozit Türleri	Şartlandırma Süresi	Yorulma Parametreleri		
		Katsayı, A	Katsayı, B	Regresyon Katsayısı, R2
BE	Normal	402,17	49,84	0,986
	2M	302,42	38,04	0,978
	4M	237,97	30,32	0,988
	6M	196,46	24,72	0,973
CE	Normal	655,55	75,68	0,963
	2M	577,55	65,89	0,969
	4M	529,55	59,7	0,982
	6M	525,5	59,77	0,982
GE	Normal	584,8	77,71	0,944
	2M	468,74	61,65	0,946
	4M	451,53	59,6	0,967
	6M	419,71	55,53	0,962
BGE	Normal	378,4	47,9	0,98
	2M	284,77	36,22	0,974
	4M	240,27	30,22	0,92
	6M	197,14	24,73	0,912
BCGE	Normal	443,16	52,26	0,939
	2M	359,75	41,54	0,938
	4M	282,23	32,93	0,937
	6M	275,94	31,88	0,939

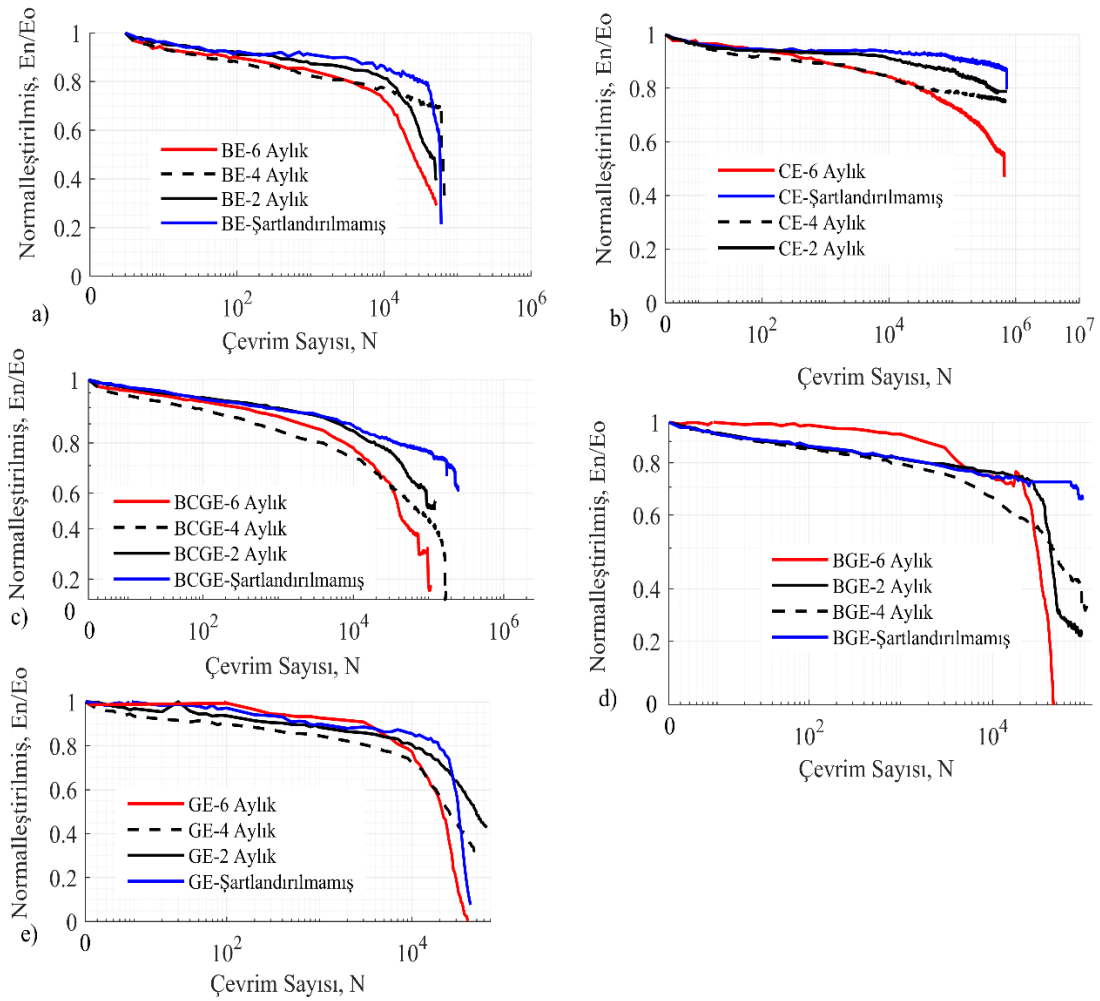
4.5.6. Rijitlik (Stiffness) Kaybı

Rijitlik bozulması, N'inci çevrimdeki yorulma rijitliğinin (E_n) birinci çevrimdeki rijitliğe (E_0) oranıdır. Yorulma rijitliği, kiriş modülü yöntemi (Denklem 4.2.) kullanılarak belirlenir. Ancak, bu çalışmada yürütülen yorulma testi, yer değiştirme kontrol yüklemesini kullanır. Yani yorulma bşd her çevrim sayısında sabittir. Bu nedenle rijitlik kaybı, uygulanan yorulma gerilmesi ile doğru orantılıdır.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.2)$$

Şekil 4.28. 'de, %50'lik bir birim şekil değiştirme düzeyinde şartlandırılmamış ve şartlandırılmış kompozitlerin tipik bir temsili normalleştirilmiş rijitlik bozulması log-log şekil olarak gösterilmektedir. Rijitlik eğrisinin çoğu, yorulma hasarının üç aşamasını gösterir. Literatürde olduğu gibi (Liu ve ark., 2016; Suwarta ve ark., 2019; Chhorn ve

Jung, 2021; Gonabadi ve ark., 2021), ilk aşama, numunenin çatlak başlangıcını gösteren hızlı bir rijitlik azalması ile karakterize edilir. Daha sonra rijitlik kaybı, çatlak ilerlemesi, delaminasyon, fiber kırılması ve matris ayrılmasına karşılık gelen çevrim sayısı ile doğrusal bir ilişki izler. Yayılma (ilerlemesi), numunenin ömrünün yaklaşık %80'ini oluşturan ve %10 ile %35 arasında bir kayıpla sonuçlanan, yorulma hasarının ikinci aşamasıdır. Son olarak, rijitlik bozulma eğrisinin üçüncü aşaması, ani kopma ile sonuçlanan daha kısa bir numune ömrü ile karakterize edilmektedir.



Şekil 4.29. %50 BŞD Seviyesinde Tüm Kompozitlerin Rijitlik Kaybı: a) BE, b) CE, c) BCGE, d) BGE, e) GE

Bir önceki bölümde açıklandığı gibi, Şekil 4.29.(a-e), söz konusu kompozitlerin rijitlik kaybı üzerindeki tuzlu suyu koşullarının etkilerini ortaya koydu. Tüm kompozitler için şartlandırma periyodu ile rijitlik kaybının arttığını göstermektedir; ancak, bozulma derecesi benzer değildir. Epoksi reçinenin plastikleşmesine bağlı olarak oluşan mikro boşluklar ve gözenekler üzerindeki su emilimi, rijitlik kaybı artışının nedeni olabilir (Wu

ve ark., 2015). Örneğin, koşulsuz ve koşullu BE kompozitinin rijitlik bozulması Şekil 4.29.(a) 'da gösterilmektedir. Rijitlik kaybı grafiği, dördüncü ve altıncı ayda şartlandırılmış numunelerin sertlik kaybının, daha yüksek su emme nedeniyle ikinci aşamada sabit bir orandan ziyade doğrusal olarak azaldığını göstermektedir.

Ayrıca, son kırılma aşaması, bileşenlerin hasarını uyararak için önemli bir parametre olan kademeli bir hasar yı gösterir. SEM görüntülerinde görüldüğü gibi (Şekil 4.30.(b-d)), su alımı nedeniyle, bazalt elyafının delaminasyonu ve matrisinin ayrılması, elyaf kırılmasından ziyade kademeli bir bozulmaya yol açar.

Öte yandan, CE, rijitlik bozulma eğrisinin ikinci aşamasında kabaca yatay bir çizgi ve ardından ani bir kopma gösterir. Bu, gevrek kırılmayı gösterir ve şartlandırılmış numunelerin rijitlik azalması diğer kompozitlerden daha azdır. Bu nedenle, tuzlu su şartlandırması, Şekil 4.29.(b) 'de gösterildiği gibi CE kompozitini biraz etkiler.

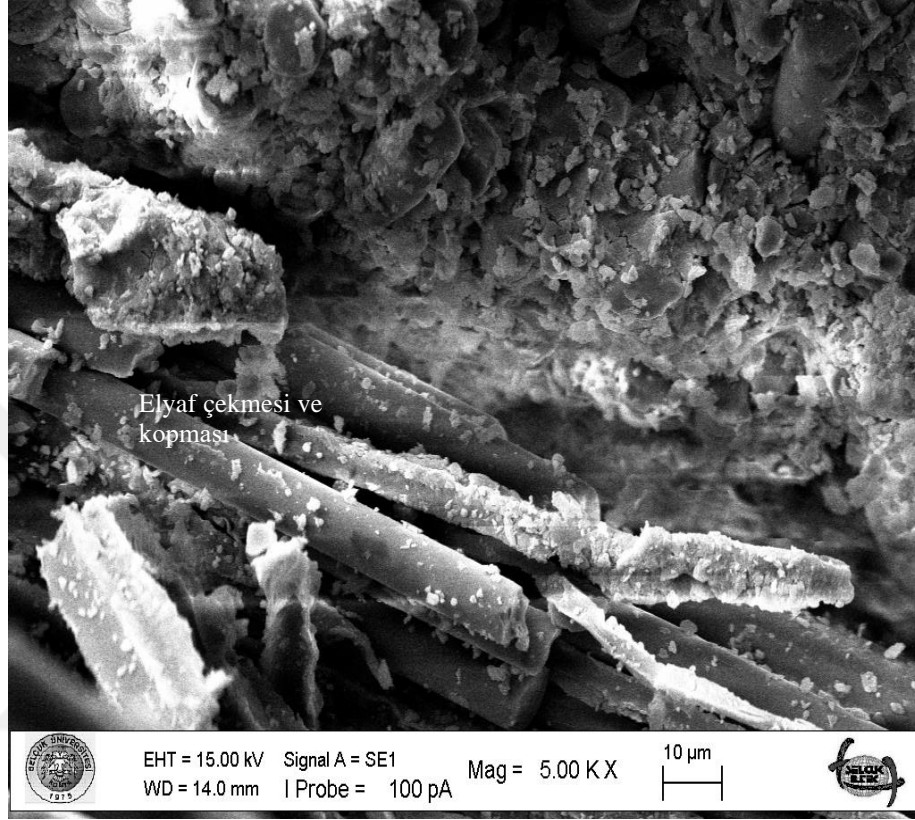
GE, BGE ve BCGE ile şartlandırılmış hibrit kompozitlerin rijitlik bozulma eğilimi BE kompozitlerine benzer. Ayrıca Şekil 4.29.(c-e) 'de görüldüğü gibi, şartlandırılmış numunenin rijitlik kaybı grafiği, elyafların delaminasyonu ve matris ayrılması nedeniyle lineer olarak azalmaktadır. Bu kırılma modları, elyafların yakınında epoksiyi azaltan elyaf aglomerasyonu nedeniyle hibrit kompozitlerde tanımlanmıştır (Yan ve ark., 2017).

4.5.7. Eğme yorulma testi sonrası kompozit numunelerin kırılması

Bu alt bölüm, eğilme yorulma testinden sonra tüm kompozit numunelerin kırılma davranışlarını tartışır. Statik testlere benzer şekilde, şartlandırılmış numunelerin kırılması, şartlandırılmamış numunelere göre daha fazla hasar gösterir. Bunun temel nedeni, epoksinin plastikleşmesiyle oluşan boşluklar, delikler ve çatlaklardan suyun nüfuz etmesi olabilir. Sonuç olarak, şartlandırılmış kompozit numunelerin hasarlı bölgeleri en kötü hale gelir.

Şekil 4.30. şartlandırılmamış BE kompozitinin eğilme yorulmasından sonra SEM'den alınan yüksek çözünürlüklü bir resmi göstermektedir. Bu şartlandırılmamış numunenin hasarı katmanlara ayrılma, elyaf kopması, elyaf kırılması ve matris ayrılmasını gösterir. Ayrıca, hasar görmüş elyafların yüzey pürüzlülüğüne ve elyaflar üzerinde kalan matris miktarına bağlı olarak, görüntülerde görülen başlıca hasar türleri

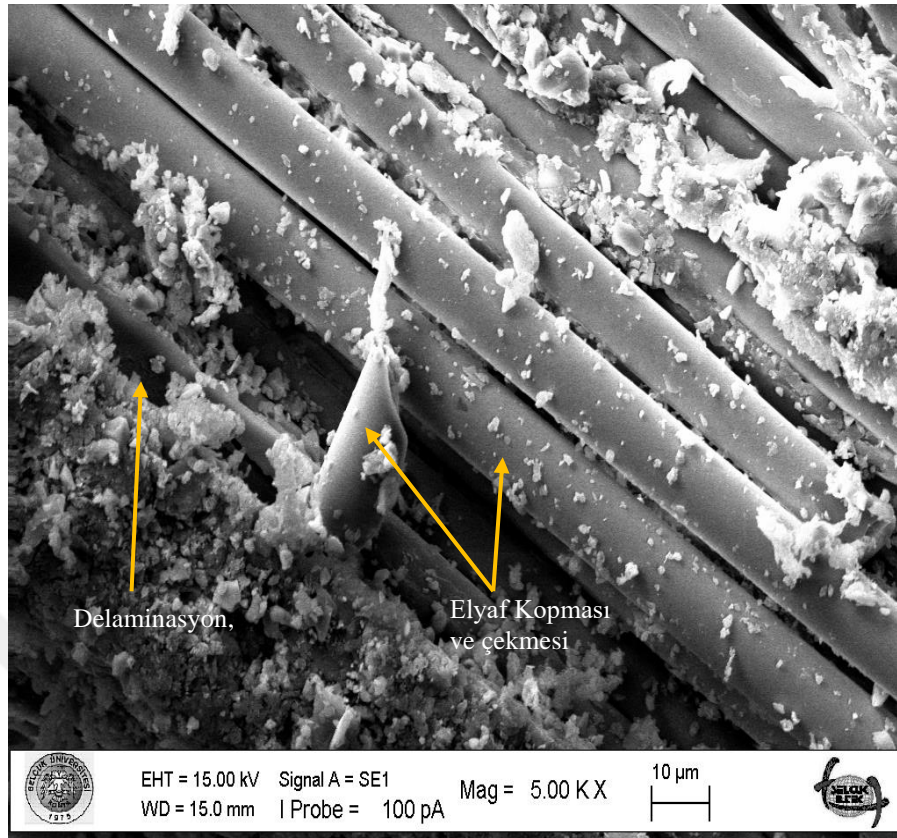
iki kategoride sınıflandırılabilir. Birinci grup, pürüzsüz, hasarlı bir yüzey gösteren tekrarlanan yüklemenin neden olduğu elyaf kırılmasıyla ilişkilidir. İkinci kategori, periyodik yükleme sırasında matris bağının ayrılması, çatlama ve elyaf kopmasıdır.



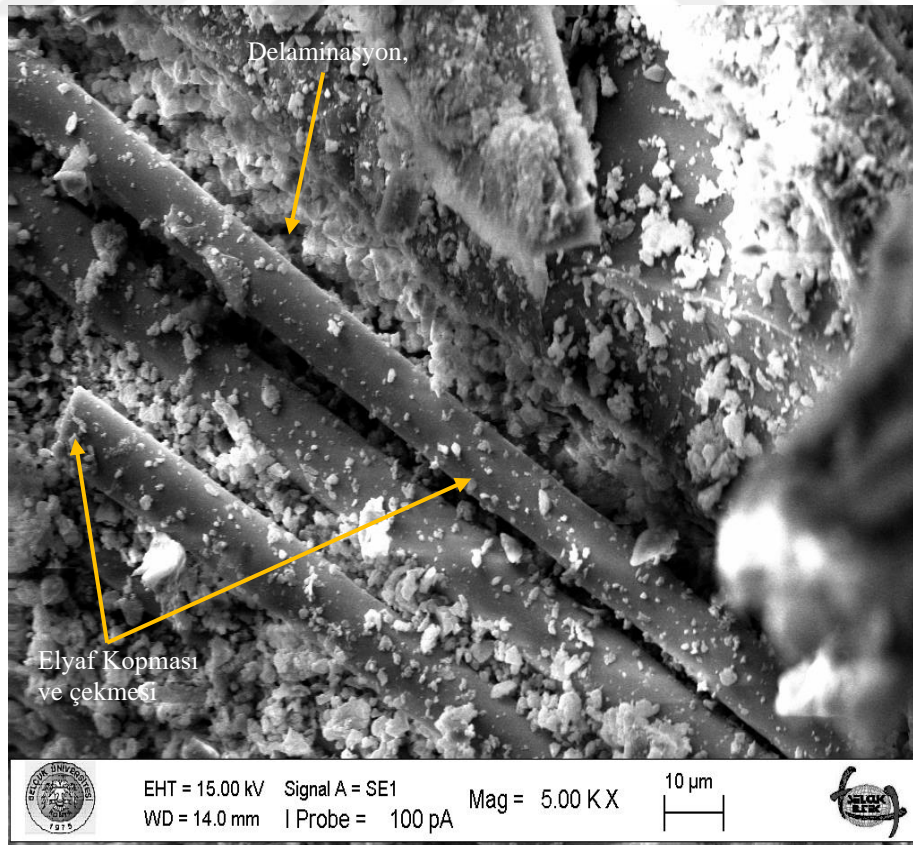
Şekil 4.30. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış BE Kompozitin SEM görüntüleri

İki, dört ve altı aylık şartlandırılmış BE kompozitlerinin hasar modları Şekil 4.31.(a-c) 'de gösterilmektedir. Şartlandırılmış BE numunelerinin hasar mekanizmaları, elyaf üzerinde delaminasyon, elyaf kopması ve kırılması, matris çatlama, matris ayrılması ve matris parçaları gösterir. Su alımının bir sonucu olarak, matris ayrılması ve elyaf kopmaları bu kompozitlerin baskın hasar modlarıdır.

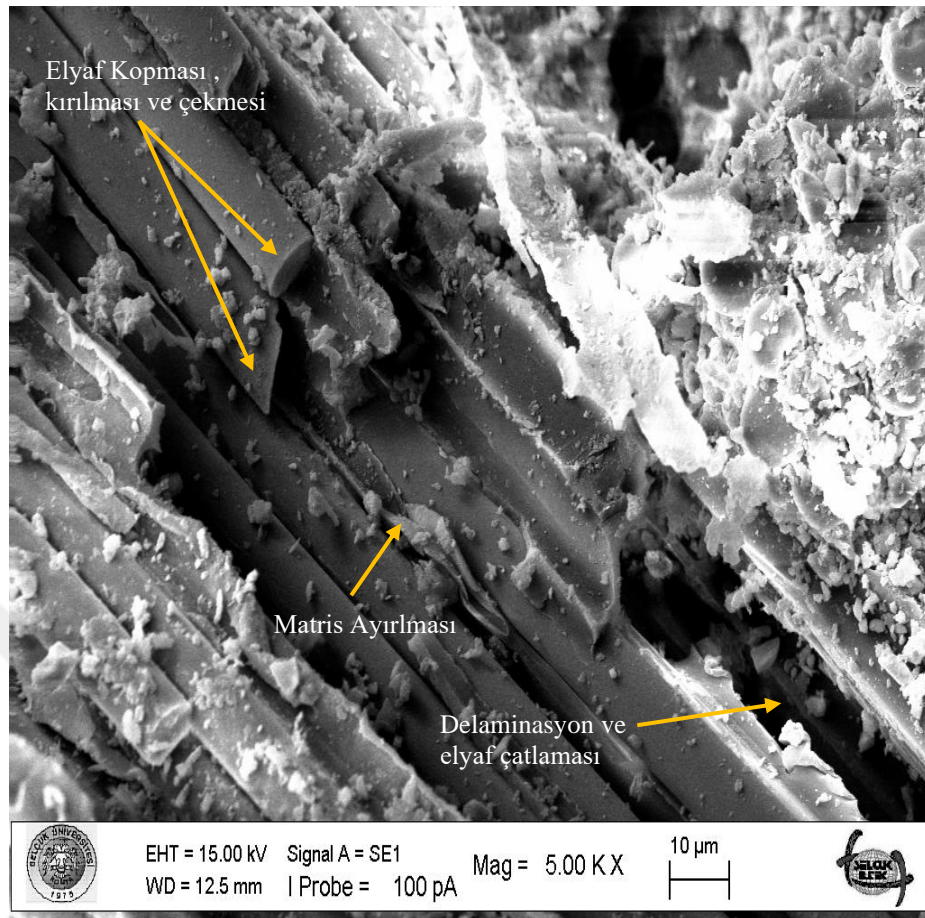
Ayrıca, numunelerin çevrimsel olarak yüklenmesi ve tuzlu suya şartlandırılması nedeniyle, epoksi matrisi fiberde kırık parçalar gösterir. Bu tür hasarlar, şartlandırma süresi ile birlikte artmaktadır. Öte yandan, tuzlu suyu şartlandırma süresi arttıkça elyaflar matristen ayrılır. Örneğin, Şekil 4.31.(c) 'de gösterilen altı aylık görüntü, elyaf bölünmesini ve matris çatlama ortaya koymaktadır.



(a)



(b)

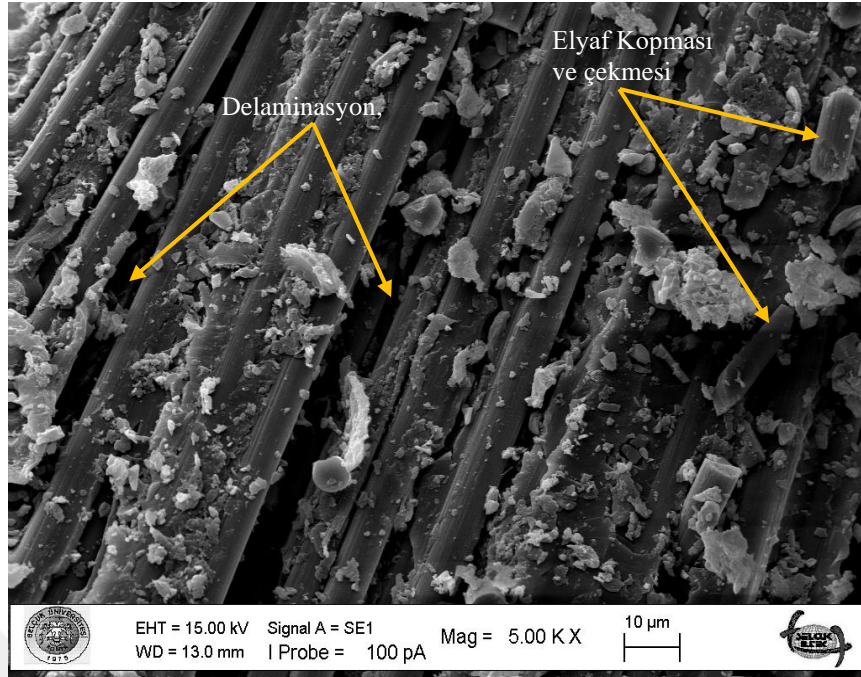


(c)

Şekil 4.31. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış BE Kompozitin SEM görüntüleri
(a) İki aylık (b) Dört aylık (c) Altı aylık

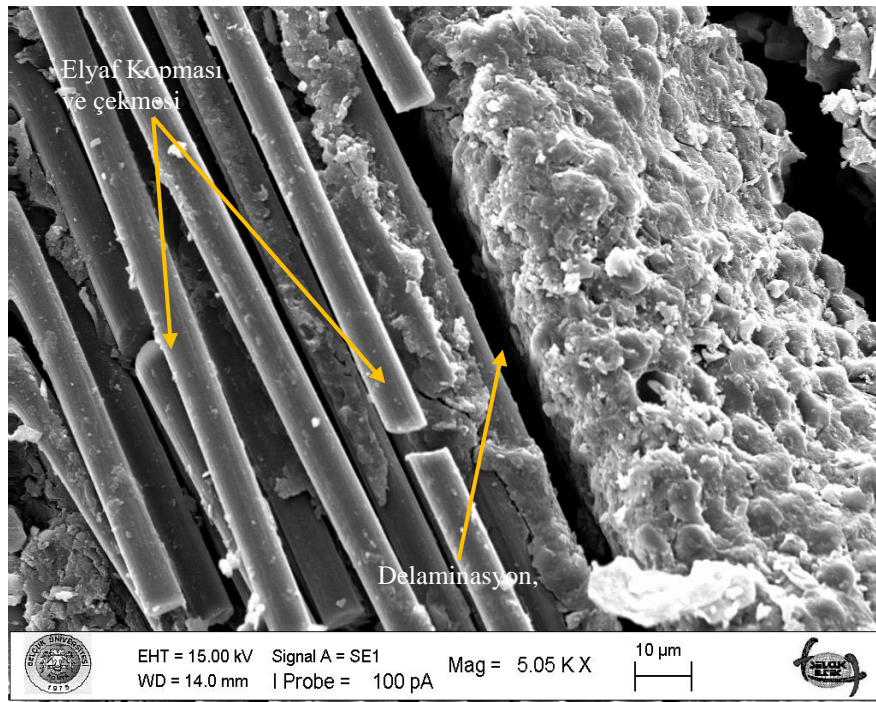
Uzun süreli tuzlu suyu ile şartlandırılmış BE numuneleri, şartlandırılmamış numunelere göre daha fazla hasar gösterir. Epoksi reçinenin bağının ayrılması, su alımı nedeniyle eğilme numunelerinde var olan bir olaydır. Bu hasar, periyodik yükleme sırasında matrisin birleştirilmesine yol açar. BE kompozitinin daha yüksek su emmesi, hasarların şartlandırılmamış numunelerden daha yüksek olmasına yol açar, bu da yorulma özelliklerinin azalmasına bir nedeni olacaktır.

Şartlandırılmamış CE numunelerinin kırılma yüzeyleri Şekil 4.32. 'de gösterilmektedir. Hasarı, gevrek malzemelerdeki ana hasarı olan epoksi reçinelerin delaminasyonu ve birleşmesi (defragmentation) ile karakterize edilir. Ayrıca, SEM görüntüsü, elyaf kopması ve elyaf çekmesi olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.32. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış CE Kompozitin SEM görüntüleri

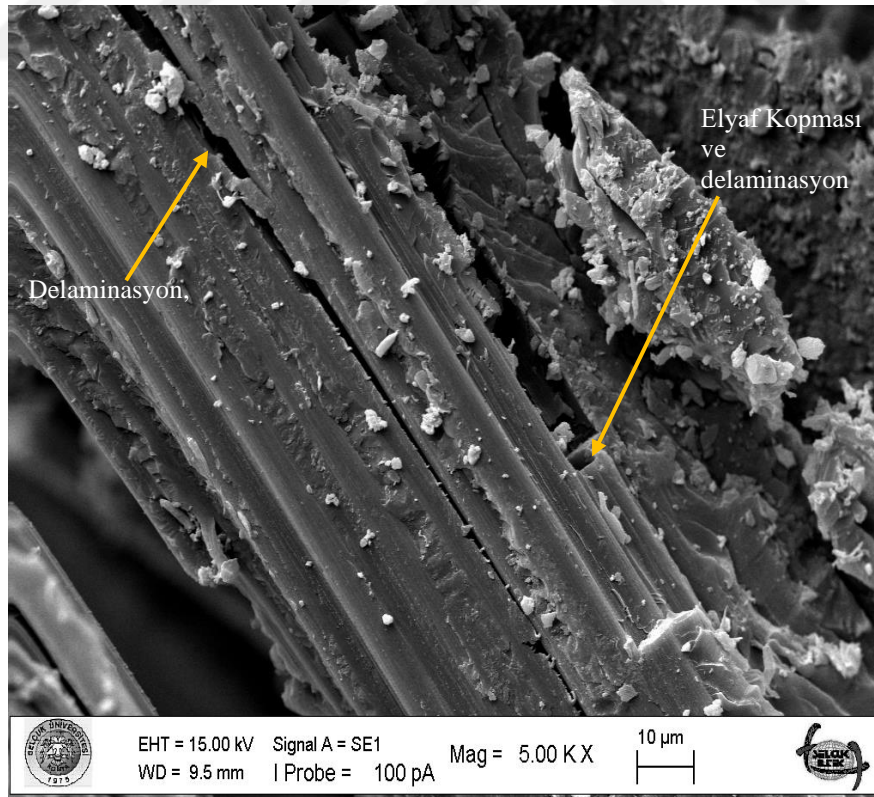
Şartlandırılmış CE kompozitin iki, dört ve altı aylık hasar modları Şekil 4.33.(a-c) 'de gösterilmektedir. Şartlandırılmış CE numunelerinin hasar mekanizmaları, delaminasyon, elyaf kopması, elyaf kırılması, matris çatlaması ve bağ kopması gösterir. Su alımının bir sonucu olarak, ayrılma, delaminasyon ve elyaf kopmaları, şartlandırılmış CE numunelerinin baskın hasar modlarıdır.



(a)



(b)

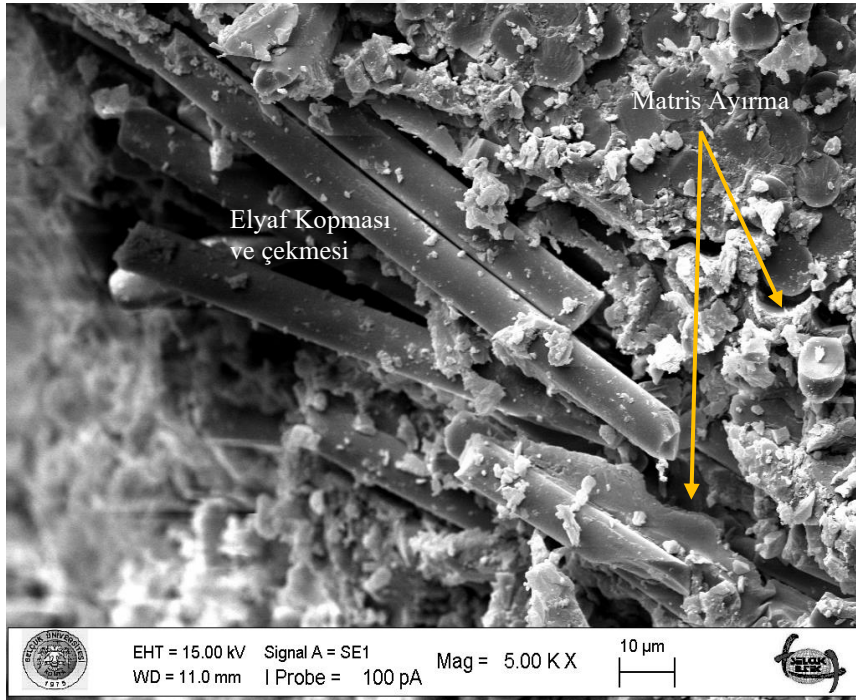


(c)

Şekil 4.33. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış CE Kompozitin SEM görüntüleri
(a) İki aylık (b) Dört aylık (c) Altı aylık

Öte yandan, Şekil 4.33.(b) 'de gösterildiği gibi, dört aylık şartlandırılmış numunelerde elyaf kopması ve kırılmaları en önemli hasarlardır. Karbon kompozitler, statik test hasar modlarında tartışıldığı gibi katastrofik ve gevrek bir kırılma gösterir. Şekil 4.33(c). 'de gösterilen altı aylık şartlandırılmış CE numuneleri, yorulma özelliklerinin azalması nın ana nedeni olan matris hasarı ve delaminasyon göstermektedir. Ancak karbon kompozitlerin matris hasarları bazalt kompozitlere göre daha azdır.

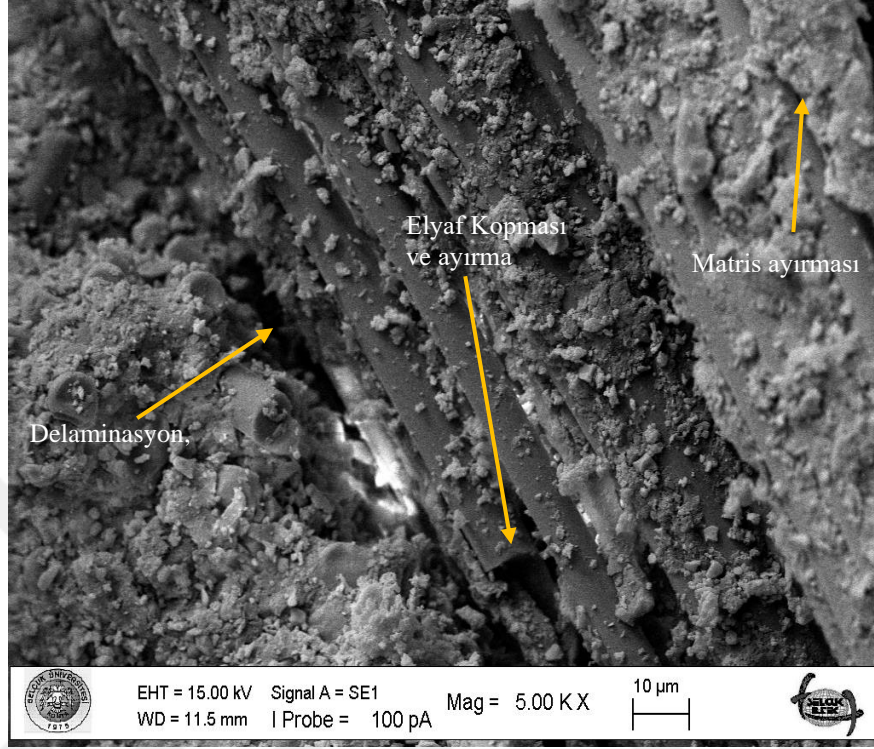
Şekil 4.34. şartlandırılmamış GE numunelerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Elyaf ayrılması, elyaf kırılması, elyaf çekme ve matris kırılması, şartlandırılmamış GE numunesinin hasar modlarının ana özellikleridir. GE numunelerinde gözlemlenen daha yüksek elyaf kırılması, yorulma ömrünü kısaltan gevrek davranışının kanıtıdır. Öte yandan, SEM analizi, bazalt ve karbon kompozitlerinden daha yüksek elyaf ayırma ve matris çatlaması olduğunu açıkça göstermektedir. Bu davranış, GE kompozitlerinde katastrofik bir hasara yol açar ve nihayetinde kompozitin daha kısa yorulma ömrüne yol açar.



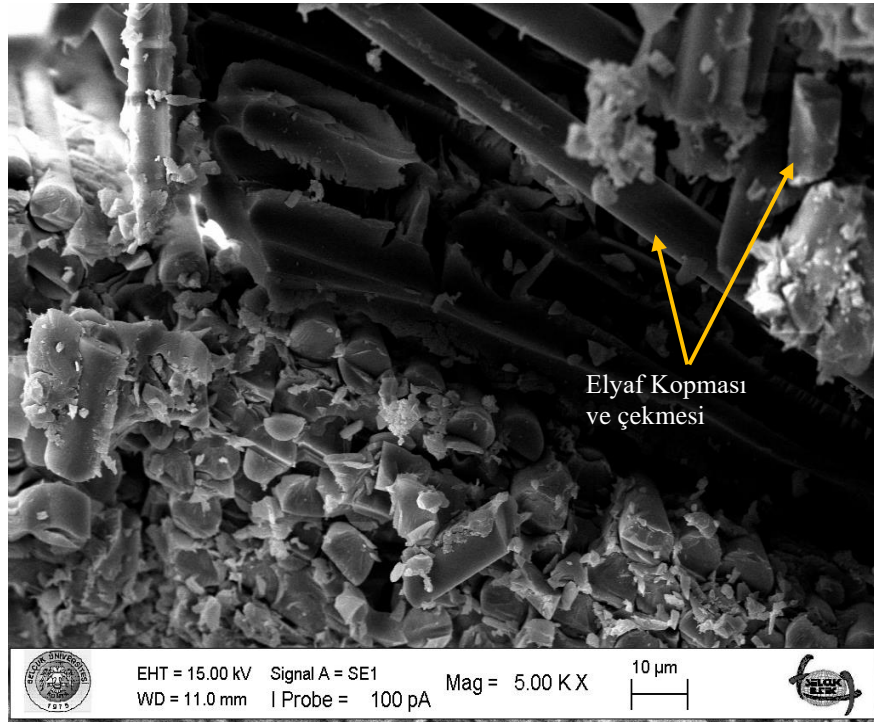
Şekil 4.34. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış GE Kompozitin SEM görüntüleri

Şartlandırılmış GE kompozitlerinin iki, dört ve altı aylık hasar modları Şekil 4.34.(a-c). 'de gösterilmektedir. Şartlandırılmış GE numunelerinin hasar mekanizmaları, delaminasyon, elyaf kopması, elyaf kırılması, matris çatlaması ve bağ kopması gösterir.

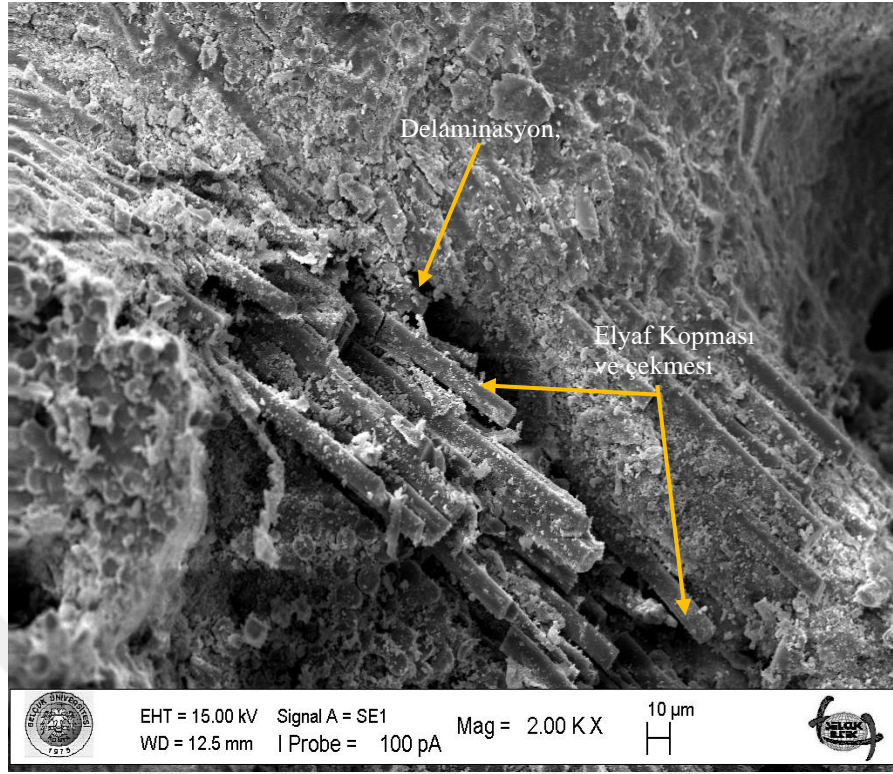
Su alımının bir sonucu olarak, elyaf ayrılma, delaminasyon ve elyaf kopmaları, şartlandırılmış GE numunelerinin baskın hasar modlarıdır.



(a)



(b)

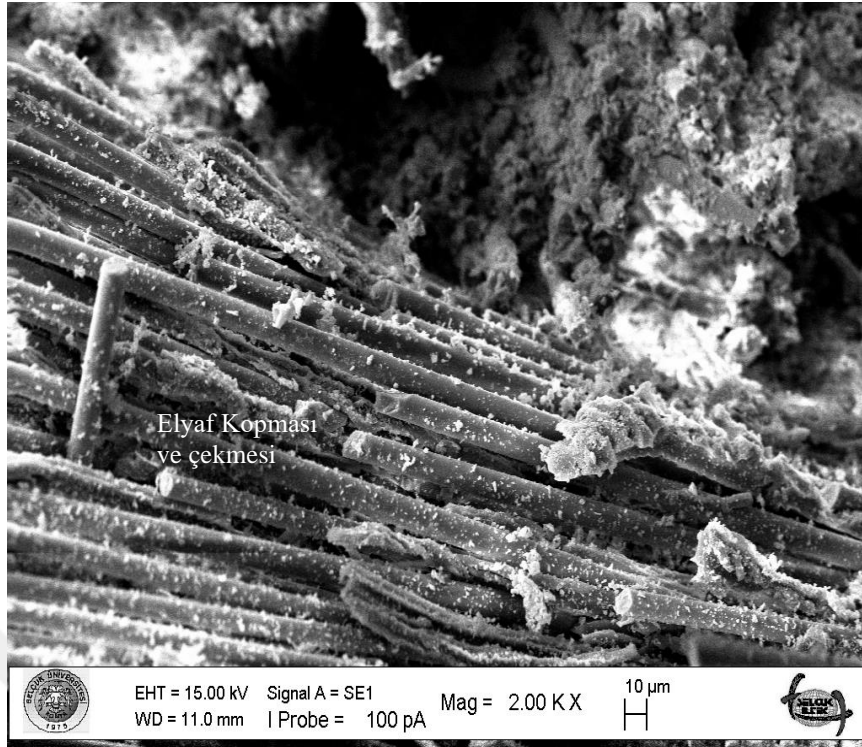


(c)

Şekil 4.35. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış GE Kompozitlerin SEM görüntüleri (a) İki aylık (b) Dört aylık (c) Altı aylık

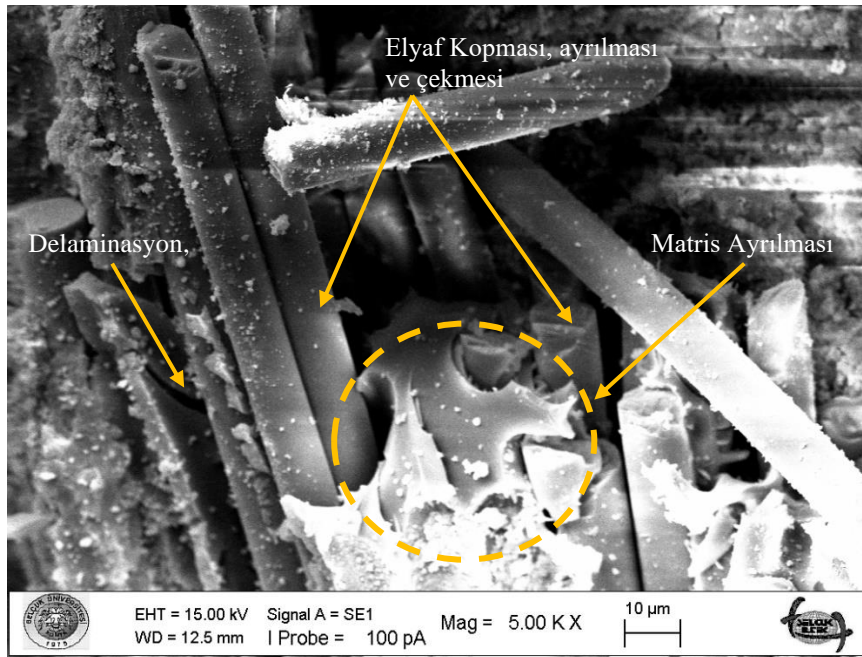
Alternatif olarak, Şekil 4.35.(b). 'de gösterildiği gibi, elyaf kopması ve kırılmaları, dört aylık şartlandırılmış numunelerdeki başlıca hasarlardır. Cam kompozitler, statik test hasar modlarında tartışıldığı gibi katastrofik ve gevrek bir kırılma gösterir. Ayrıca, Şekil 4.35.(c). 'de gösterilen altı aylık GE numuneleri, yorulma özelliklerinin azalması nın ana nedeni olan matris hasarı ve delaminasyon göstermektedir. Ancak cam kompozitlerin matris hasarları bazalt kompozitlere göre daha azdır.

Şekil 4.36. şartlandırılmamış BGE hibrit kompozitlerinin SEM resimlerini göstermektedir. Delaminasyon, elyaf kırılması, çekme ve bağ açma, şartlandırılmamış BGE numunesinin hasar modlarıdır. Bu kompozitin hasarı, BE ve GE kompozitlerinden daha yüksek elyaf ayrılması ve elyaf çekmesi gösterir. Bu, temel malzemelerin gevrek ve sünek davranışlarının karışık etkilerinden kaynaklanıyor olabilir. Bu nedenle, cam ve bazalt elyafın hibridizasyonu, daha yüksek yorulma ömrüne yol açar ve temel malzemelere göre eğilme yorulma yüklemesine maruz kaldığında hasarı azaltır. Örneğin, BGE'nin yorulma ömrü, GE örneğinden daha uzun ve BE kompozitinden daha düşüktür.

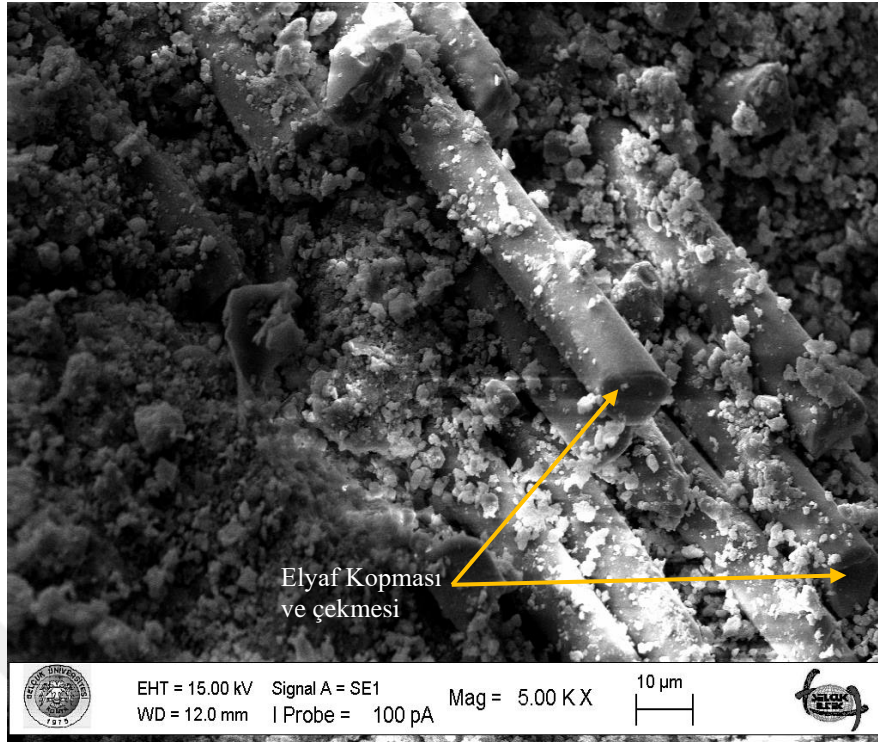


Şekil 4.36. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış BGE Kompozitin SEM görüntüleri

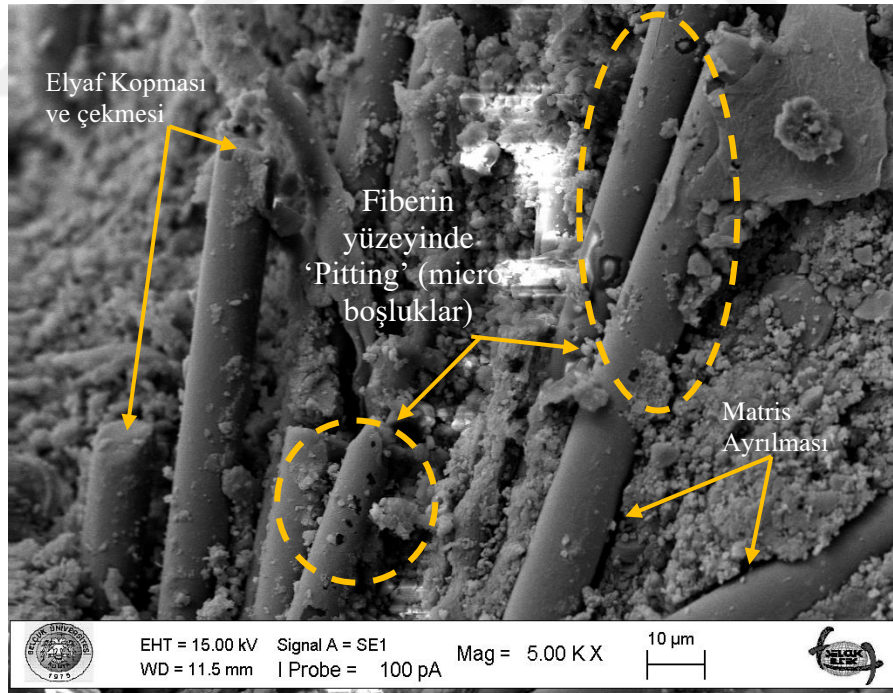
Şekil 4.36. 'da gösterilen SEM görüntüleri, hibrit kompozitlerin hasar modlarındaki iyileşmenin kanıtıdır. Örneğin, BE'nin hasar modları yüksek oranda delaminasyon ve elyaf kırılması ile karakterize edilirken, GE elyaf kırılması gösterir ve bunların hibrit kompoziti elyaf çekme ve ayrılma gösterir.



(a)



(b)



(c)

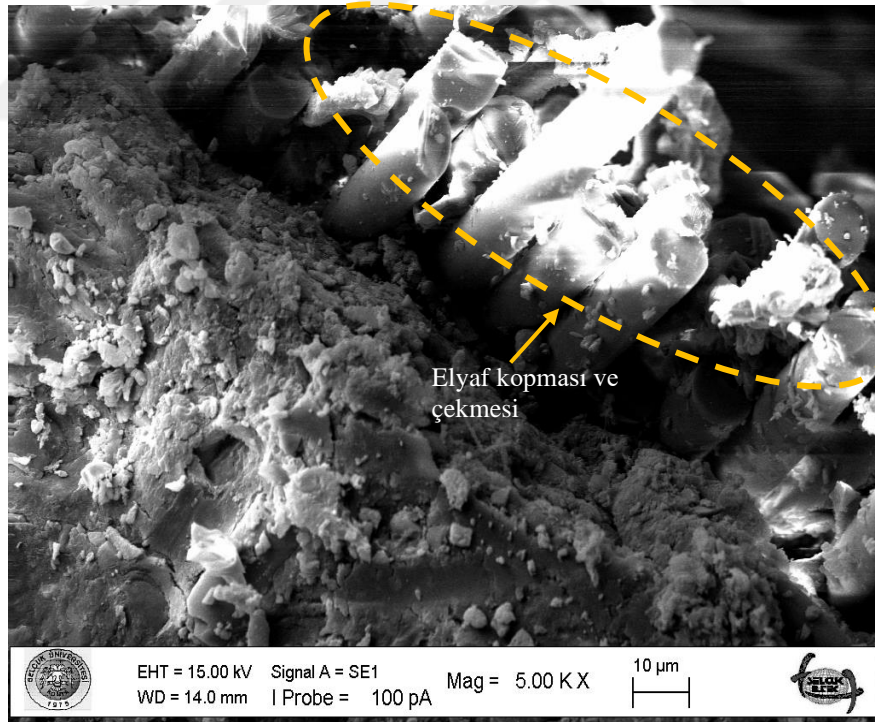
Şekil 4.37. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış BGE Kompozitin SEM görüntüleri
(a) İki aylık (b) Dört aylık (c) Altı aylık

Şartlandırılmış BGE hibrit kompozitlerin hasar davranışı Şekil 4.37.(a-c) 'de gösterilmektedir. Şekil 4.37.(a), iki aylık şartlandırılmış BGE hibrit kompozitlerin SEM

görüntülerini göstermektedir. Şekil, eğilme yorulma yükünün iki aylık şartlandırılmış BGE numunelerini etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle, hasar modları arasında elyaf ayrılma, fiber çekme, delaminasyon, fiber ve matris kırılması yer alır.

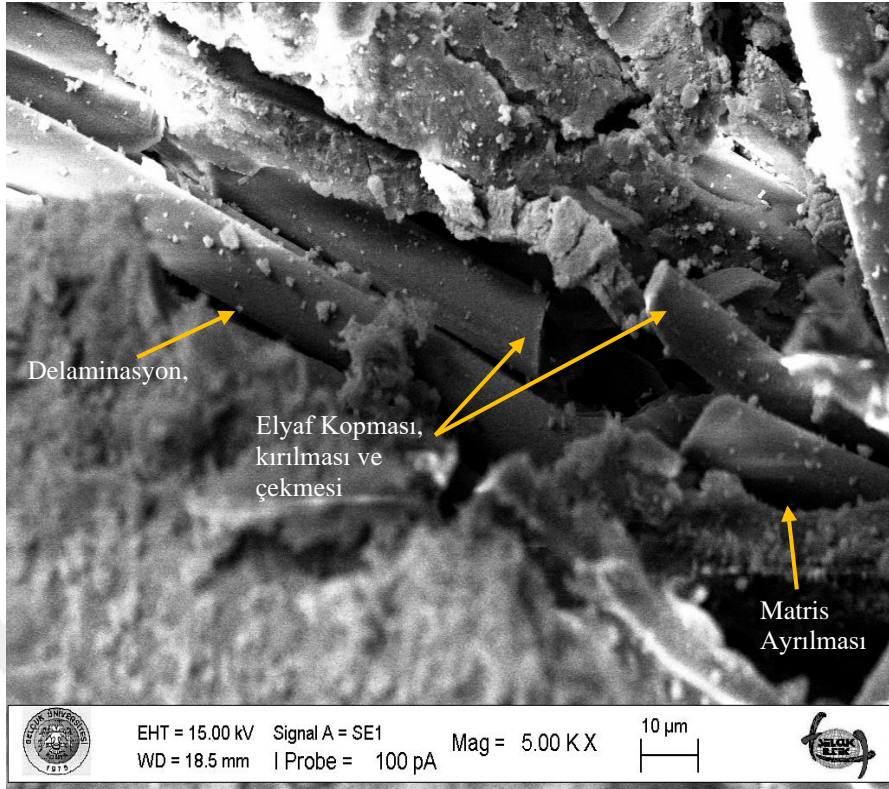
Şekil 4.37.(b-c) 'de gösterilen dört ve altı aylık şartlandırılmış BGE numuneleri, eğilme yorulma testlerinden sonra incelendiğinde daha yüksek elyaf ayrılması, elyaf kırılması ve kopması göstermektedir. Ayrıca, altı aylık numunelerde elyaf çukurlaşması (pitting) görülüyor.

Genel olarak, BGE 'nin su absorpsiyonu, önceki bölümde bildirildiği gibi önemsizdir. Bununla birlikte, BGE hibrit kompozitlerin hasar modları, şartlandırma zaman ile birlikte artar. Bunun nedeni, epoksi reçinenin polimerizasyonunun, daha yüksek elyaf ayrılması ve matris çatlamasına yol açmasından kaynaklanıyor olabilir. Diğer sebep ise su moleküllerinin deliklere, çatlaklara ve uzun süreli şartlandırma sonucu oluşan gözeneklere nüfuz etmesi olabilir.

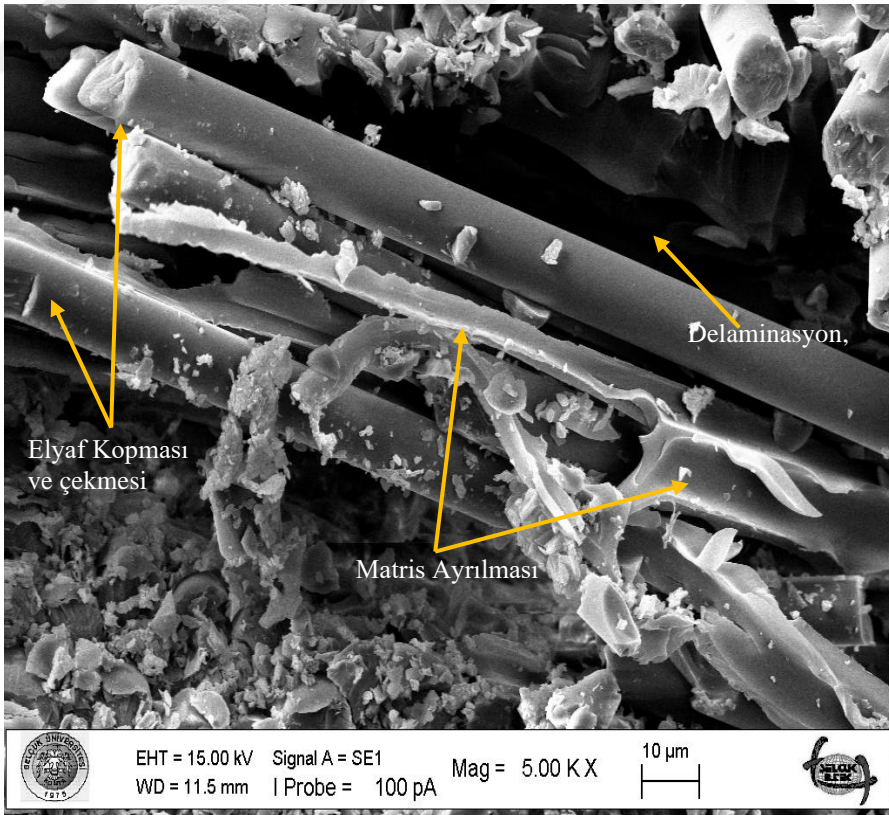


Şekil 4.38. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmamış BCGE Kompozitin SEM görüntüleri

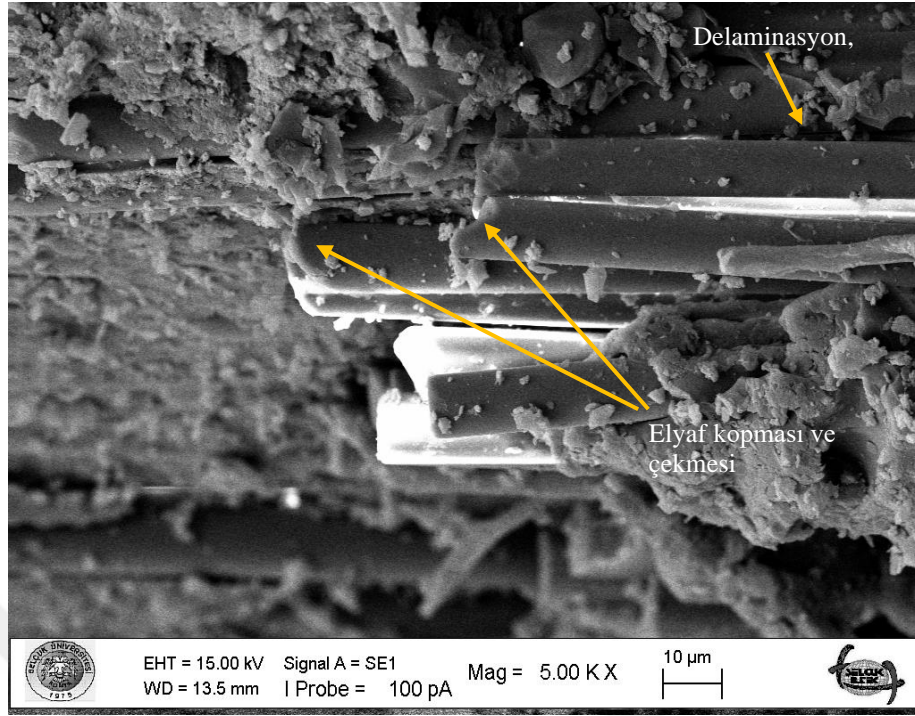
Son olarak, Şartlandırılmamış BCGE hibrit kompozitinin hasar modları Şekil 4.38. 'de gösterilmektedir. Şartlandırılmamış BCGE numuneleri, elyaf kopması ve elyaf kırılması ile yüksek oranda karakterize edilir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.39. Eğilme Yorulmasından Sonra şartlandırılmış BCGE Kompozitinin SEM görüntüleri
(a) İki aylık ve (b) Dört aylık (c) Altı aylık

Şekil 4.39. (a-c), iki aylık, dört aylık ve altı aylık şartlandırılmış BCGE hibrit numunelerinin eğilme yorulma testi sonrası SEM görüntülerini göstermektedir. Resimde elyaf çekme, elyaf ayırma, delaminasyon, elyaf ve matris kırılması gösterilmektedir. Ayrıca, dört ve altı aylık numunelerde görüldüğü gibi, şartlandırma periyodu ile hasar modları artmaktadır. Bu hibrit kompozitde gözlenen yüksek kütle kazancının ana nedeni budur. Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi, oluşan delikler ve çatlaklardaki su penetrasyonu daha yüksek kütle kazancına yol açacaktır. Ayrıca iki farklı elyaf arasındaki polimerizasyon etkisi ve epoksi reçinenin plastikleşmesi nedeniyle elyaf ayırma ve elyaf kopması artacaktır. Bu nedenle, SEM görüntülerinde gösterilen kırılma modları, yorulma özelliklerinin azalması nın kanıtıdır.

Şekil 4.39.(b), dört aylık şartlandırılmış BCGE hibrit kompozitlerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil, dört aylık şartlandırılmış BCGE hibrit kompozitindeki elyaf ayırma ve fiber çekmesinin, şartlandırılmamış ve iki aylık şartlandırılmış BCGE numunelerinden daha yüksek olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tasarım alanındaki yeni bir araştırma alanı, malzeme hibridizasyonu ve nanopartiküller yoluyla yapısal bileşenlerin özelliklerinden ödün vermeden ağırlığını ve maliyetini azaltmanın yollarını bulmaktır. Bu bağlamda, kompozitlerin özelliklerinin statik yükleme altında karakterizasyonu ele alınmış ve çeşitli çalışmalarla daha kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Bununla birlikte, çoğu yapısal bozulma yorulma yoluyla meydana geldiğinden, periyodik yükleme altındaki kompozitlerin özellikleri hakkında çok az çalışma vardır veya hiç çalışma yoktur. Örneğin, uçaklar gibi operasyon boyunca büyük yorulma yükleri yaşayan yeni yapılarda birincil yapısal malzeme olarak kompozitlerin kullanılması, uygun yorulma ömrü modellerinin tasarımını gerektirir. Bu konuyu ele almak için araştırmacılar, her kompozit yapının yorulma duyarlılığı endişelerini ele alınması gereken çok önemli bir konu olarak gördüler.

Dayanıklılık simülasyon prosedürlerinde yorulma ömrü tahmin metodolojilerinin kullanılması, bir ürünün dayanıklılık performansının erken değerlendirilmesini sağlar. Daha spesifik olarak, bazalt kompozitlerin yorulma özellikleri az sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yazarın bilgisine göre, uzun vadeli çevresel koşullar altında üç noktalı eğilme testleri kullanılarak bazalt fiber hibrit kompozitlerin yorulma davranışı üzerine bazı araştırmalar bulundu veya hiç araştırma yapılmadı. Bu nedenle tez, aşındırıcı bir ortam altında bazalt, karbon ve cam elyaflardan oluşan hibrit kompozitlerin yorulma özelliklerine ilişkin araştırma boşluğunu doldurmaya odaklanmaktadır.

Bu tezin temel amacı, epoksi ile güçlendirilmiş bazalt/karbon/cam elyafın ve bunların hibritlerinin korozyif bir ortamda yorulma davranışını ve mekanik özelliklerini araştırmak ve karakterize etmektir. Bu çalışmada, yorulma testlerinde numuneye uygun yerleştirme ve yönlendirme için üç noktalı fikstür üretilmiştir. İlk olarak kompozit numuneyi üretmek için VARTM kullanılır ve daha sonra çekme, eğilme ve eğilme yorulma testlerini gerçekleştirmek için 100 kN kapasiteli Instron 8801 kullanıldı. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarıldı:

Numunelerin kütlesi, önceki çalışmalara benzer şekilde, şartlandırma süresi ile artar. Bununla birlikte, artan bir şartlandırma süresi ile, epoksi reçinenin plastikleşmesi

meydana gelir ve bu da polimer zincirlerinin bağlarının zayıflamasına katkıda bulunur. Bu fenomen, kompozitlerde mikro boşluklara, çatlaklara ve gözenek oluşumuna yol açar. Bu nedenle kütle kazancındaki artışın temel nedeni, su moleküllerinin polimer matrisli kompozitlerin mikro boşluklarından, çatlaklarından ve deliklerinden girerek kütle kazancına yol açmasıdır. İki aylık şartlandırılmış numuneler için kütle kazancındaki maksimum ve minimum yüzde artışları BE kompozitleri için yüzde 0,34 ve BGE kompozit numuneleri için yüzde 0,012'dir.

Tüm kompozit numuneler, tuzlu su çözeltisindeki şartlandırma süresi arttıkça çekme ve eğilme özelliklerinde bir azalma sergiler. Ancak, daha önceki bulgulara benzer şekilde, CE, GE ve BCGE kompozit numuneleri için kopmadaki uzama yüzdesi artar. En heyecan verici kısım, bazalt ve Cam elyafların hibrit kompozitlerinin çekme mukavemetinin, çekme yüklemesi altında bazalt elyafların çekici bir özelliğinden dolayı bir gelişme göstermesidir. CE kompozit numunenin nihai çekme mukavemeti ve elastisite modülü sırasıyla en yüksek sonuç olan 837,43 MPa ve 39,52 GPa'dır. Ancak BE'nin kopma uzama yüzdesi, %4,69, diğerlerinden daha iyiydi. Numunelerin çoğu ölçüm alanında hasar oldu ve hasar delaminasyon, ayrılma, patlayıcılar ve yanal ile karakterize edildi. Ek olarak, bazı örnekler farklı yerlerde çok modlu bir hasar göstermiştir.

Ayrıca BE (%21.11) ve BGE (%23.50) numunelerinde daha yüksek bir çekme mukavemeti azalması gözlemlenmiştir. Sonuç ve tartışma bölümlerinde açıklandığı gibi, bunun nedeni epoksi reçinenin plastikleşmesi ve hibritlerde zayıf ara yüzey bağlanması olabilir. Tersine, en küçük çekme mukavemeti azalması %9.09 ile CE numunesinde gözlenmiştir.

Benzer şekilde, BE kompozitinin çekme modülü daha yüksek bir azalma (%17.12) gösterir. Modül azalması söz konusu olduğunda, CE numunesi (%15,29) BE'nin yanında daha yüksek bir bozulma gösterir ve modüldeki en küçük azalma %8,68 ile BCGE hibrit kompozitinde gözlenir. Şartlandırma periyodu arttıkça, CE ve BCGE numunelerinin davranışı kırılığandan sünek hale geldi. Başka bir deyişle, şartlandırma süresi ile birlikte kopmadaki uzama yüzdesi artar. Sonuç olarak, esneklik modülleri bir bozulma gösterir. Altı aylık şartlandırma döneminin sonunda CE örneğinin uzaması yüzde 41,75 artarken, BCGE örneğinin uzaması yüzde 14,38 arttı. Bununla birlikte, BE ve BGE kompozitlerinin uzaması, şartlandırma süresi arttıkça bozulma göstermiştir.

BE, BGE ve BCGE kompozitleri için çekme hasar modları arasında patlayıcı hasar, fiber çatlama, kırılma ve delaminasyon bulunur. Şartlandırma periyodu arttıkça

hasar bölgeleri (alanları) daha belirgin hale gelir. Buna karşılık, ölçüm alanındaki iki veya üç parçaya ayrılma, CE ve GE numunelerinin çekme kırılma modlarını ayırt eder. Ayrıca tuzlu suda şartlandırma periyodu ile hasar bölgeleri (alanları) artar.

CE numunesi daha yüksek eğilme bşd sergilemesine rağmen, eğilme sırasında en ihmal edilebilir % uzama sergiler. BE numunesi en düşük eğilme gerilmesini sergilerken, hibrit kompoziti (BGE) bazalt ve cam elyaf kompozitlerin ortasında bir değer gösterdi. GE kompozitleri, hibritlerinden (BGE & BCGE) ve önceki çalışmalara benzeyen BE numunelerinden daha yüksek eğilme gerilimi ve uzama yüzdesi gösterir. Eğilme testi, GE kompozitlerinin eğilme eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve uzama yüzdesinin CE hariç diğer kompozit numunelerden daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Altı aylık şartlandırılmış BE numuneleri için eğilme mukavemeti ve eğilme modülündeki en yüksek bozulma yüzdesi sırasıyla %47,87 ve %5,48'dir. Bunun nedeni, BE kompozitlerinin yüksek su absorpsiyonunun polimer zincirinin bağlantısını bozarak gözeneklilik yaratan ve eğilme özelliklerinin daha yüksek azalmasına yol açmasıdır. Ayrıca, altı aylık şartlandırılmış BE kompozit numuneleri için kopma uzama yüzdesindeki azalma %41,68'dir. Bununla birlikte, tuzlu su çözeltisinin CE kompozit numunelerin eğilme özellikleri üzerindeki etkisi diğer kompozitlere kıyasla önemsizdir. GE numunelerinin en yüksek eğilme mukavemeti ve eğilme modülü yüzdesi azalması sırasıyla %19,40 ve %12,66'dır. Ancak, CE örneklerine benzer şekilde dördüncü aydan sonra özellikler geri kazanıldı. Ayrıca, eğilmedeki uzama yüzdesi, şartlandırma periyodu boyunca bir azalma gösterir, en yüksek uzama yüzdesi %27,54'tür.

BGE ve BCGE hibrit kompozitlerinin maksimum eğilme mukavemeti yüzdesi bozulması sırasıyla %37,98 ve %29,02'dir. Eğilme modülünün yüzde bozulması BGE'de (%30,38) BCGE (%17,9) hibrit kompozitlerden daha yüksektir.

Test edilen eğilme numunelerinde, daha önceki araştırma çalışmalarında belirtildiği gibi hibrit kompozitlerdeki başlıca hasar dağılımları olan basma, çekme, kesme, delaminasyon, eğilme bantları, matris ayrışması ve elyaf kırılması gözlemlenmiştir. Ayrıca, tuzlu su çözeltisinde şartlandırma süresinin artmasıyla, tüm kompozit numunelerin hasarında bir artış vardır.

Ayrıca, dördüncü ve altı aylık şartlandırılmış BE numunelerindeki hasar, elyaf kırılması, kopma, eğilme bantları ve matris bağlarının ayrılması ile karakterize edilir. Şartlandırma süresi arttıkça fiber matris arayüzü zayıf olacaktır.

ICP-OES analizinin sonuçları, kompozitlerin elementlerinin tuzlu su çözeltisinde yayıldığını ve bunun da kompozit malzemenin daha fazla su emmesine neden olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, eğilme ve çekme testleri altında, kompozit tabakanın yüzeyi, mekanik özelliklerde bir azalmaya işaret eden mukavemette bozulma belirtileri gösterir. ICP-OES sonucu, iyonların fiber yapılardan yayıldığını gösterir. Ayrıca, SEM görüntüsü, tuzlu su şartlandırmasından sonra elyaf yüzeyinde mikro delikler (oyuklanma) göstermektedir.

Şartlandırma süresinin artmasıyla kompozitlerin yorulma ömrü azalır- BE kompozitlerinde daha yüksek bozulma gözlenir. Tersine, CE kompozitlerinde minimum yorulma ömrü bozulması görülür. Hafifçe etkilenen CE kompozitleri hariç, tuzlu su ortamı tüm kompozitlerin rijitlik kaybını oldukça etkiler.

Testten sonra hem koşullandırılmamış hem de koşullandırılmış eğilme yorulma numuneleri katmanlara ayrılma, elyafta kopma, bağ çözme ve elyaf ve matris kırılması gösterir.

5.2. Öneriler

Bu tez, tuzlu su ortamında Bazalt/Karbon/Cam-Epoksi hibrit kompozitlerin mekanik ve yorulma davranışını araştırmıştır. Ancak mekanik ve yorulma özellikleri sadece iki tip hibrit ile araştırılmıştır. Bu, hibridizasyon ve nanopartiküllerin yorulma özellikleri üzerindeki etkilerinin daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyduğu anlamına gelir. Ayrıca, hibridizasyonun farklı çevresel koşullar altında yorulma davranışı üzerindeki etkileri şiddetle tavsiye edilmektedir. Kompozit malzemelerin yorulmasındaki diğer en önemli konu, farklı çevresel koşullar altında hibrit kompozitlerin yorulma davranışı üzerindeki ilk çatlakların etkilerinin incelenmesidir.

KAYNAKLAR

- Abd El-Baky, M., Attia, M. A., Abdelhaleem, M. M. ve Hassan, M. A., 2020, Flax/basalt/E-glass fibers reinforced epoxy composites with enhanced mechanical properties, *Journal of Natural Fibers*, 1-15.
- Amiri, A. ve Cavalli, M., 2013, Experimental investigation of fatigue behavior of carbon fiber composites using fully reversed four point bending test, In: *Composite Materials and Joining Technologies for Composites*, Volume 7, Eds: Springer, p. 131-137.
- Assarar, M., Scida, D., El Mahi, A., Poilâne, C. ve Ayad, R., 2011, Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax–fibres and glass–fibres, *Materials & Design*, 32 (2), 788-795.
- Balcıoğlu, H. E., Sakin, R. ve Gün, H., 2021, The Effect of Different Environmental Condition on Flexural Strength and Fatigue Behavior of E-Glass/Epoxy Composites, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 45 (1), 165-180.
- Bames, G., Coles, I., Roberts, R., Adams, D. O. ve Gamer Jr, D. M., 2010, Crash safety assurance strategies for future plastic and composite intensive vehicles (PCIVs), *United States. National Highway Traffic Safety Administration*.
- Bandaru, A. K., Patel, S., Sachan, Y., Ahmad, S., Alagirusamy, R. ve Bhatnagar, N., 2016, Mechanical characterization of 3D angle-interlock Kevlar/basalt reinforced polypropylene composites, *Polymer Testing*, 55, 238-246.
- Belingardi, G., Cavatorta, M. ve Frasca, C., 2006, Bending fatigue behavior of glass–carbon/epoxy hybrid composites, *Composites science and technology*, 66 (2), 222-232.
- Ben Ameer, M., Mahi, A. E., Rebiere, J.-L., Beyaoui, M., Abdennadher, M. ve Haddar, M., 2021, Experimental fatigue behavior of carbon/flax hybrid composites under tensile loading, *Journal of Composite Materials*, 55 (5), 581-596.
- Bozkurt, Ö. Y., 2017, Hybridization effects on tensile and bending behavior of aramid/basalt fiber reinforced epoxy composites, *Polymer Composites*, 38 (6), 1144-1150.
- Broer, A., 2018, Fatigue life prediction of carbon fibre-reinforced epoxy laminates using a single SN curve, *Master of Science Thesis, Delft University of Technology*.

- Bulut, M., 2017, Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets, *Composites Part B: Engineering*, 122, 71-78.
- Bunsell, A. R., 2018, Handbook of properties of textile and technical fibres, Woodhead Publishing, p.
- Cantor, B., Grant, P. ve Johnston, C., 2008, Automotive engineering: lightweight, functional, and novel materials, CRC Press, p.
- Carlsson, L. A., Adams, D. F. ve Pipes, R. B., 2014, Experimental characterization of advanced composite materials, CRC press, p.
- Carmisciano, S., De Rosa, I. M., Sarasini, F., Tamburrano, A. ve Valente, M., 2011, Basalt woven fiber reinforced vinylester composites: Flexural and electrical properties, *Materials & Design*, 32 (1), 337-342.
- Chafiq, J., Oucht, I. ve El Fqih, M. A., 2021, Investigations of tensile behavior of basalt/glass/carbon/hybrid fiber composite, *Materials Today: Proceedings*.
- Chakraverty, A. P., Mohanty, U. K., Mishra, S. ve Satapathy, A., 2015, Sea water ageing of GFRP composites and the dissolved salts, *IOP conference series: materials science and engineering*, 012029.
- Cheloni, J. P. M., Silveira, M. E. ve Silva, L. J. d., 2018, Effects of amount of glass fiber laminate skins in sandwich composite of filled core, *Materials Research*, 22.
- Chen, D., Sun, G., Meng, M., Jin, X. ve Li, Q., 2019, Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates, *Thin-Walled Structures*, 142, 516-531.
- Chhorn, B. ve Jung, W., 2021, Experimental investigation of the flexural fatigue performance of plain woven basalt fiber/epoxy, *Science progress*, 104 (3), 00368504211029451.
- Colombo, C., Vergani, L. ve Burman, M., 2012, Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites, *Composite Structures*, 94 (3), 1165-1174.
- Cramer, S. D., Covino Jr, B. S., Moosbrugger, C., Sanders, B. R., Anton, G. J., Hrivnak, N., Kinson, J., Polakowski, C., Muldoon, K. ve Henry, S. D., 2003, ASM handbook, ASM international Materials Park, p.
- Darshan, S. ve Suresha, B., 2021, Effect of basalt fiber hybridization on mechanical properties of silk fiber reinforced epoxy composites, *Materials Today: Proceedings*, 43, 986-994.

- Demirci, İ., 2017, Karbon nanotüp ve nano silika takviyeli bazalt/epoksi hibrit nanokompozitlerin korozif ortamda darbe davranışları, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S.-J. ve Hui, D., 2015, A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180.
- Dorigato, A. ve Pegoretti, A., 2012, Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates, *Journal of Composite Materials*, 46 (15), 1773-1785.
- El-Wazery, M., 2018, Mechanical characterization of glass-basalt-carbon/polyester hybrid composites, *International Journal of Engineering*, 31 (7), 1139-1145.
- Elmahdy, A. ve Verleysen, P., 2021, Comparison between the mechanical behavior of woven basalt and glass epoxy composites at high strain rates, *Materials Today: Proceedings*, 34, 171-175.
- Fan, W., Dang, W., Liu, T., Li, J., Xue, L., Yuan, L. ve Dong, J., 2019, Fatigue behavior of the 3D orthogonal carbon/glass fibers hybrid composite under three-point bending load, *Materials & Design*, 183, 108112.
- Fiore, V., Di Bella, G. ve Valenza, A., 2011, Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications, *Materials & Design*, 32 (4), 2091-2099.
- Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G. ve Valenza, A., 2015, A review on basalt fibre and its composites, *Composites Part B: Engineering*, 74, 74-94.
- Fragassa, C., Pavlovic, A. ve Santulli, C., 2018, Mechanical and impact characterisation of flax and basalt fibre vinylester composites and their hybrids, *Composites Part B: Engineering*, 137, 247-259.
- Fricke, W., 2017, Fatigue and fracture of ship structures, *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, 1-12.
- Fuller, J. ve Wisnom, M., 2015, Exploration of the potential for pseudo-ductility in thin ply CFRP angle-ply laminates via an analytical method, *Composites science and technology*, 112, 8-15.
- Gao, X., Tao, N., Yang, X., Wang, C. ve Xu, F., 2019, Quasi-static three-point bending and fatigue behavior of 3-D orthogonal woven composites, *Composites Part B: Engineering*, 159, 173-183.
- Gay, D., 2014, Composite materials: design and applications, CRC press, p.

- Gonabadi, H., Oila, A., Yadav, A. ve Bull, S., 2021, Fatigue damage analysis of GFRP composites using digital image correlation, *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 7 (1), 25-40.
- Gupta, M. ve Srivastava, R., 2016, Mechanical properties of hybrid fibers-reinforced polymer composite: A review, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55 (6), 626-642.
- Gürol, Ö. ve Ahmet, A., 2009, YÜZEY ÇATLAKLI 5086 Al-Mg ALAŞIMININ EKSENEL YORULMA ÇATLAK İLERLEME DAVRANIŞI, *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 8 (3), 144-160.
- Halford, G. R., 2006, Fatigue and durability of structural materials, Asm International, p.
- Halfpenny, A., 2005, A practical introduction to fatigue, *Sheffield UK: company publication for nCode International Ltd.*
- Hawileh, R. A., Abdalla, J. A., Hasan, S. S., Ziyada, M. B. ve Abu-Obeidah, A., 2016, Models for predicting elastic modulus and tensile strength of carbon, basalt and hybrid carbon-basalt FRP laminates at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 114, 364-373.
- Hazizan, M. A. ve Cantwell, W., 2003, The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure, *Composites Part B: Engineering*, 34 (8), 679-687.
- He, B., Wang, B., Wang, Z., Qi, S., Tian, G. ve Wu, D., 2020, Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon fiber and high-strength and high-modulus polyimide fiber, *Polymer*, 204, 122830.
- Hernandez-Sanchez, B. A., Nicholas, J., Gunawan, B., Miller, D. A., Bonheyo, G. T., Presuel-Moreno, F. ve Hughes, S., 2019, Evaluation of composite materials for wave and current energy technologies, *Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).*
- International, A., 2012, ASTM D7774-12-Standard Test Method for Flexural Fatigue Properties of Plastics, ASTM International West Conshohocken.
- International, A., 2015, ASTM D3171-15-Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, ASTM International West Conshohocken.
- Jamison, R. D., Schulte, K., Reifsnider, K. L. ve Stinchcomb, W. W., 1984, Characterization and analysis of damage mechanisms in tension-tension fatigue

- of graphite/epoxy laminates, In: Effects of defects in composite materials, Eds: ASTM International, p.
- Jesthi, D. K. ve Nayak, R. K., 2019, Evaluation of mechanical properties and morphology of seawater aged carbon and glass fiber reinforced polymer hybrid composites, *Composites Part B: Engineering*, 174, 106980.
- Kedari, V. R., Farah, B. I. ve Hsiao, K.-T. J. J. o. C. M., 2011, Effects of vacuum pressure, inlet pressure, and mold temperature on the void content, volume fraction of polyester/e-glass fiber composites manufactured with VARTM process, 45 (26), 2727-2742.
- Keller, T., 2001, Recent all-composite and hybrid fibre-reinforced polymer bridges and buildings, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3 (2), 132-140.
- Kepir, Y., Gunoz, A. ve Memduh, K., 2021, Effects of environmental conditions on the mechanical properties of composite materials, *Advanced Engineering Journal*, 1 (1), 21-25.
- Khandelwal, S. ve Rhee, K. Y., 2020, Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: Tailoring the fiber-matrix interface, *Composites Part B: Engineering*, 192, 108011.
- Kim, D., Mittal, G., Kim, M., Kim, S. ve Rhee, K. Y., 2019, Surface modification of MMT and its effect on fatigue and fracture behavior of basalt/epoxy based composites in a seawater environment, *Applied Surface Science*, 473, 55-58.
- Kini, M. V. ve Pai, D., 2021, The Ageing Effect on Static and Dynamic Mechanical Properties of Fibre Reinforced Polymer Composites under Marine Environment-A Review, *Materials Today: Proceedings*.
- Kootsookos, A. ve Mouritz, A. P., 2004, Seawater durability of glass-and carbon-polymer composites, *Composites science and technology*, 64 (10-11), 1503-1511.
- Koricho, E., Adem, E., Didwania, E. M. ve Reddy, G. M., 2015, Experimental Analysis of E-Glass/Epoxy and E-Glass/Polyester Composites for Auto Body Panel.
- Lebedev, M., Startsev, O. ve Kychkin, A., 2020, The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics, *Heliyon*, 6 (3), e03481.
- Li, S., Guo, S., Yao, Y., Jin, Z., Shi, C. ve Zhu, D., 2021, The effects of aging in seawater and SWSSC and strain rate on the tensile performance of GFRP/BFRP composites: A critical review, *Construction and building materials*, 282, 122534.

- Liu, J., Chen, M., Yang, J. ve Wu, Z., 2020, Study on mechanical properties of basalt fibers superior to E-glass fibers, *Journal of Natural Fibers*, 1-13.
- Liu, Z., Li, P., Srikanth, N., Liu, T. ve Chai, G. B., 2016, Quantification of flexural fatigue life and 3D damage in carbon fibre reinforced polymer laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 778-785.
- Lu, Z., Xie, J., Zhang, H. ve Li, J., 2017, Long-term durability of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) sheets and the epoxy resin matrix under a wet-dry cyclic condition in a chloride-containing environment, *Polymers*, 9 (12), 652.
- Ma, G., Yan, L., Shen, W., Zhu, D., Huang, L. ve Kasal, B., 2018, Effects of water, alkali solution and temperature ageing on water absorption, morphology and mechanical properties of natural FRP composites: Plant-based jute vs. mineral-based basalt, *Composites Part B: Engineering*, 153, 398-412.
- Mayya, H. B., Pai, D., Kini, V. M. ve Padmaraj, N., 2021, Effect of Marine Environmental Conditions on Physical and Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Composites—A Review, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 1-7.
- Menail, Y., El Mahi, A. E. M., Assarar, M., Redjel, B. ve Kondratas, A., 2009, The effects of water aging on the mechanical properties of glass-fiber and kevlar-fiber epoxy composite materials, *Mechanika/Mechanics*, 76 (2), 28-32.
- Mészáros, L. ve Szakács, J., 2016, Low-cycle fatigue properties of basalt fiber and graphene reinforced polyamide 6 hybrid composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35 (22), 1671-1681.
- Nisini, E., Santulli, C. ve Liverani, A., 2017, Mechanical and impact characterization of hybrid composite laminates with carbon, basalt and flax fibres, *Composites Part B: Engineering*, 127, 92-99.
- Önal, G., 2002, Yüzey Çatlaklı 5086 Al-Mg Alaşımının Yorulma Davranışları, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- Organization, C., 2012, Composite Materials Handbook Volume-3 (CMH-17-3).
- Papa, I., Boccarusso, L., Langella, A. ve Lopresto, V., 2020, Carbon/glass hybrid composite laminates in vinylester resin: Bending and low velocity impact tests, *Composite Structures*, 232, 111571.

- Patel, N., Patel, K., Gohil, P. ve Chaudhry, V., 2018, Investigations on mechanical strength of hybrid basalt/glass polyester composites, *International Journal of Applied Engineering Research*, 13 (6), 4083-4088.
- Prabhakar, P., Garcia, R., Imam, M. A. ve Damodaran, V., 2020, Flexural fatigue life of woven carbon/vinyl ester composites under sea water saturation, *International journal of fatigue*, 137, 105641.
- Rajan, R., Riihivuori, J., Rainosalo, E., Skrifvars, M. ve Järvelä, P., 2014, Effect of viscose fabric modification on the mechanical and water absorption properties of composites prepared through vacuum infusion, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33 (15), 1416-1429.
- Ramakrishnan, G., Ramnath, B. V., Elanchezhian, C., Kumar, A. A. ve Gowtham, S., 2019, Investigation of Mechanical Behaviour of Basalt-Banana Hybrid Composites, *Silicon*, 11 (4), 1939-1948.
- Rege, S. ve Lakkad, S., 1983, Effect of salt water on mechanical properties of fibre reinforced plastics, *Fibre Science and Technology*, 19 (4), 317-324.
- Ricciardi, M., Papa, I., Lopresto, V., Langella, A. ve Antonucci, V., 2019, Effect of hybridization on the impact properties of flax/basalt epoxy composites: Influence of the stacking sequence, *Composite Structures*, 214, 476-485.
- Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F. ve Carlone, P., 2020, Marine application of fiber reinforced composites: a review, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (1), 26.
- Rutzke, M. A., 2018, Atomic Absorption, Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy, and Infrared Spectroscopy, In: *Encyclopedia of Geochemistry: A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth*, Eds: White, W. M., Cham: Springer International Publishing, p. 76-83.
- Saleem, A., Medina, L., Skrifvars, M. ve Berglin, L., 2020, Hybrid Polymer Composites of Bio-Based Bast Fibers with Glass, Carbon and Basalt Fibers for Automotive Applications—A Review, *Molecules*, 25 (21), 4933.
- Sapuan, S., Aulia, H., Ilyas, R., Atiqah, A., Dele-Afolabi, T., Nurazzi, M., Supian, A. ve Atikah, M., 2020, Mechanical properties of longitudinal basalt/woven-glass-fiber-reinforced unsaturated polyester-resin hybrid composites, *Polymers*, 12 (10), 2211.

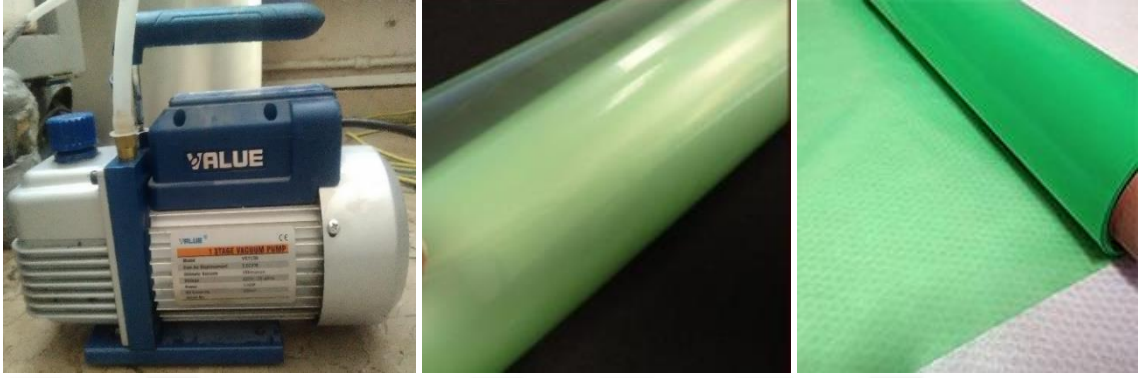
- Schijve, J., 2009, Fatigue damage in aircraft structures, not wanted, but tolerated?, *International journal of fatigue*, 31 (6), 998-1011.
- Seghini, M. C., Touchard, F., Sarasini, F., Chocinski–Arnault, L., Ricciardi, M. R., Antonucci, V. ve Tirillo, J., 2020, Fatigue behaviour of flax-basalt/epoxy hybrid composites in comparison with non-hybrid composites, *International journal of fatigue*, 139, 105800.
- Sharma, B., Chhibber, R. ve Mehta, R., 2018, Seawater ageing of glass fiber reinforced epoxy nanocomposites based on silylated clays, *Polymer Degradation and Stability*, 147, 103-114.
- Shi, J., Wang, X., Wu, Z. ve Zhu, Z., 2017, Fatigue behavior of basalt fiber-reinforced polymer tendons under a marine environment, *Construction and building materials*, 137, 46-54.
- Standard, A., D7264/D7264M-15 (2015), *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*.
- Standard, A., D3039-08, 2008. “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”. West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D3039-08.
- Subagia, I. A. ve Kim, Y., 2013, A study on flexural properties of carbon-basalt/epoxy hybrid composites, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27 (4), 987-992.
- Sukur, E. F. ve Onal, G., 2021, Long-term salt-water durability of GNPs reinforced basalt-epoxy multiscale composites for marine applications, *Tribology International*, 158, 106910.
- Sun, G., Tong, S., Chen, D., Gong, Z. ve Li, Q., 2018, Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers, *International Journal of Mechanical Sciences*, 148, 636-651.
- Suwarda, P., Fotouhi, M., Czél, G., Longana, M. ve Wisnom, M. R., 2019, Fatigue behaviour of pseudo-ductile unidirectional thin-ply carbon/epoxy-glass/epoxy hybrid composites, *Composite Structures*, 224, 110996.
- Swolfs, Y., Gorbatikh, L. ve Verpoest, I., 2014, Fibre hybridisation in polymer composites: A review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 67, 181-200.

- Swolfs, Y., Verpoest, I. ve Gorbatiikh, L., 2019, Recent advances in fibre-hybrid composites: materials selection, opportunities and applications, *International Materials Reviews*, 64 (4), 181-215.
- Thakur, V. K., Thakur, M. K. ve Pappu, A., 2017, Hybrid polymer composite materials: properties and characterisation, Woodhead Publishing, p.
- Ulus, H., Kaybal, H. B., Eskizeybek, V. ve Avci, A., 2019, Enhanced salty water durability of halloysite nanotube reinforced epoxy/basalt fiber hybrid composites, *Fibers and Polymers*, 20 (10), 2184-2199.
- Vassilopoulos, A. P., 2010, Fatigue life prediction of composites and composite structures, Elsevier, p.
- Wang, X., Zhao, X. ve Wu, Z., 2019, Fatigue degradation and life prediction of basalt fiber-reinforced polymer composites after saltwater corrosion, *Materials & Design*, 163, 107529.
- Wei, B., Cao, H. ve Song, S., 2011, Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater, *Corrosion Science*, 53 (1), 426-431.
- Wolter, N., Beber, V. C., Sandinge, A., Blomqvist, P., Goethals, F., Van Hove, M., Jubete, E., Mayer, B. ve Koschek, K., 2020, Carbon, glass and basalt fiber reinforced polybenzoxazine: The effects of fiber reinforcement on mechanical, fire, smoke and toxicity properties, *Polymers*, 12 (10), 2379.
- Wu, G., Wang, X., Wu, Z., Dong, Z. ve Zhang, G., 2015, Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments, *Journal of Composite Materials*, 49 (7), 873-887.
- Wu, Z., Yang, C., Tobe, Y., Ye, L. ve Harada, T., 2006, Electrical and mechanical characterization of hybrid CFRP sheets, *Journal of Composite Materials*, 40 (3), 227-244.
- Wu, Z., Wang, X., Iwashita, K., Sasaki, T. ve Hamaguchi, Y., 2010, Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets, *Composites Part B: Engineering*, 41 (5), 396-402.
- Xia, J., Lewandowski, J. J. ve Willard, M. A., 2020, Tension and fatigue behavior of Al-2124A/SiC-particulate metal matrix composites, *Materials Science and Engineering: A*, 770, 138518.

- Yan, X., Shen, H., Yu, L. ve Hamada, H., 2017, Polypropylene–glass fiber/basalt fiber hybrid composites fabricated by direct fiber feeding injection molding process, *Journal of Applied Polymer Science*, 134 (44), 45472.
- Yang, T., He, M.-H., Niu, X.-J. ve Du, Y., 2017, Experimental investigation of the three-point bending fatigue properties of carbon fiber composite laminates, *Advances in Material Science*, 1 (1), 12-18.
- Yu, H., Longana, M. L., Jalalvand, M., Wisnom, M. R. ve Potter, K. D., 2015, Pseudoductility in intermingled carbon/glass hybrid composites with highly aligned discontinuous fibres, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 73, 35-44.
- Zareei, N., Geranmayeh, A. ve Eslami-Farsani, R., 2019, Interlaminar shear strength and tensile properties of environmentally-friendly fiber metal laminates reinforced by hybrid basalt and jute fibers, *Polymer Testing*, 75, 205-212.
- Zhao, X., Wang, X., Wu, Z. ve Zhu, Z., 2016, Fatigue behavior and failure mechanism of basalt FRP composites under long-term cyclic loads, *International journal of fatigue*, 88, 58-67.
- Zhao, X., Wang, X., Wu, Z., Keller, T. ve Vassilopoulos, A. P., 2018, Effect of stress ratios on tension–tension fatigue behavior and micro-damage evolution of basalt fiber-reinforced epoxy polymer composites, *Journal of materials science*, 53 (13), 9545-9556.
- Zhao, X., Wang, X., Wu, Z., Keller, T. ve Vassilopoulos, A. P., 2019, Temperature effect on fatigue behavior of basalt fiber-reinforced polymer composites, *Polymer Composites*, 40 (6), 2273-2283.
- Živković, I., Fragassa, C., Pavlović, A. ve Brugo, T., 2017, Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber reinforced green composites, *Composites Part B: Engineering*, 111, 148-164.
- Zuo, P., Srinivasan, D. V. ve Vassilopoulos, A. P., 2021, Review of hybrid composites fatigue, *Composite Structures*, 274, 114358.

EKLER

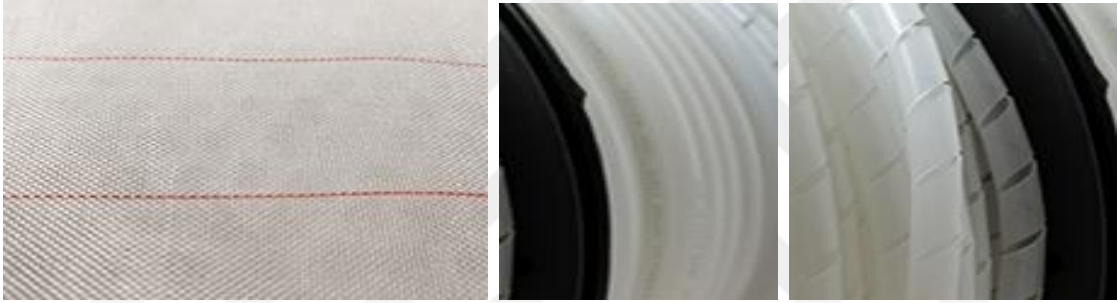
EK-A1 VARTM Materials ve Dekupaj Testere



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)



(g)

(h)

VARTM Malzemeleri (a) Vakum Pompası, (b) Vakum Torbası Naylon ve Kalıp Ayırıcı Naylon, (c) İnfüzyon Mesh, (d) Peel Ply, (e) İnfüzyon Vakum Hortumu, (f) İnfüzyon Spiral Hortumu, (g) T- ve L- Hortum Konnektörleri, (h) Vakum Sızdırmazlık Bandı



Kompozit Kesici PST 650 Dekupaj Testeresi

EK-A2 Eğilme Yorulma Fikstür Montaj Çizimleri

